



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica



Aplicação do ensaio de emissão acústica à inspeção de cabos de aço

NUNO AFONSO MACHADO DA PALMA GUERREIRO
(Licenciatura em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica – Ramo Produção

Orientador (es):

Doutoramento – Maria Amélia Ramos Loja
Doutoramento – Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão
Mestrado – Afonso Manuel da Costa de Sousa Leite
Mestrado - Rui João de Sousa Mendes

Júri:

Presidente: Doutoramento – Silvério João Crespo Marques
Vogais:

Doutoramento – Maria Alexandra Sousa Rodrigues
Doutoramento – Maria Amélia Ramos Loja

Julho de 2019

Página intencionalmente deixada em branco.



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Departamento de Engenharia Mecânica

Aplicação do ensaio de emissão acústica à inspeção de cabos de aço

NUNO AFONSO MACHADO DA PALMA GUERREIRO
(Mestre em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica – Ramo Produção

Orientador (es):

Doutoramento – Maria Amélia Ramos Loja
Doutoramento – Ivan Rodolfo Pereira Garcia de Galvão
Mestrado – Afonso Manuel da Costa de Sousa Leite
Mestrado - Rui João de Sousa Mendes

Júri:

Presidente: Doutoramento – Silvério João Crespo Marques
Vogais:

Doutoramento – Maria Alexandra Sousa Rodrigues
Doutoramento – Maria Amélia Ramos Loja

Julho de 2019

Página intencionalmente deixada em branco.

*“Eles não sabem que o sonho
É uma constante da vida
Tão concreta e definida
Como outra coisa qualquer”*

Pedra Filosofal, António Gedeão

Página intencionalmente deixada em branco.

RESUMO

Nos recentes anos, a presença dos ensaios não destrutivos na indústria tem-se revelado como essencial para o envolvimento da qualidade na produção e na manutenção dos mais diversos equipamentos.

Entre o vasto espectro de ensaios não destrutivos, este trabalho destaca a aplicação do ensaio de emissão acústica na inspeção de cabos de aço, um dos elementos de transmissão mecânica mais importantes atualmente.

Este trabalho inicia-se por uma revisão teórica sobre cabos de aço, ensaios não destrutivos, o ensaio de emissão acústica e o estado da arte da aplicação desta técnica aos cabos de aço.

Com base nesta revisão, são realizados dois ensaios experimentais, nomeadamente a análise do comportamento acústico de um cabo sob tração e a determinação da localização de fissuras através do *software* de processamento de sinal.

Palavras Chave

Emissão acústica; Cabos de Aço; Ensaio não destrutivos; Fissuras;

Página intencionalmente deixada em branco.

ABSTRACT

In recent years, nondestructive testing presence in industry has been revealed as essential for quality involvement in production and maintenance of several equipment's.

Between the diverse spectrum of nondestructive testing, this work highlights the acoustic emission testing application in wire rope inspection, one of the most important transmission elements today.

This work initiates with a theoretical review of wire ropes, nondestructive testing, acoustic emission testing and a state of the art of this technique applied in wire rope inspection.

Based in this review, two experimental tests were conducted namely the acoustic behavior analysis of a wire rope subjected to tensile stress and the second test was the location of cracks via a signal processing software.

Keywords

Acoustic Emission; Wire Rope; Nondestructive Testing; Cracks;

Página intencionalmente deixada em branco.

AGRADECIMENTOS

No decorrer da elaboração deste trabalho final de Mestrado, muitas foram as pessoas que deram o seu apoio e incentivo.

Agradeço em primeiro lugar à minha família, principalmente os meus pais e a minha irmã pelo seu apoio incondicional.

Um grande agradecimento ao Engenheiro Rui Mendes do ISQ, pela orientação, por todo o tempo disponibilizado e por todos os conhecimentos transmitidos não só durante a execução deste trabalho, mas também no exercício da minha profissão.

Aos professores do ISEL, a Doutora Amélia Loja, o Doutor Ivan Galvão e o Mestre Afonso Leite pela sua orientação e colaboração ao longo deste período.

Ao ISQ por me proporcionar os recursos necessários e me permitir dedicar tempo laboral na execução deste trabalho. Um especial agradecimento ao Laboratório de Ensaios Mecânicos e à Engenheira Marta Freitas pela disponibilidade para realizar os ensaios.

A todos os meus amigos e colegas pela firme insistência, incentivo e companheirismo ao longo de toda a minha experiência académica.

A todos estes, obrigado.

Página intencionalmente deixada em branco.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos.....	1
1.3	Estrutura.....	2
2	Fundamentos teóricos	3
2.1	Cabos de aço	3
2.1.1	Elementos do cabo	3
2.1.1.1	Arames.....	4
2.1.1.2	Alma	4
2.1.1.3	Cordão	5
2.1.1.4	Lubrificantes e agentes de preservação	6
2.1.1.5	Inserções	7
2.1.2	Classificação.....	7
2.1.2.1	Cabos de cordões	7
2.1.2.2	Cabos espiraloidais	8
2.1.2.3	Cabos com revestimento e/ou enchimento	9
2.1.3	Designação	10
2.1.3.1	Construção do cabo	10
2.1.3.2	Classes de Resistência	10
2.1.3.3	Acabamento da superfície do arame.....	11
2.1.3.4	Tipo e direção da cocha.....	11
2.1.4	Defeitos possíveis.....	12
2.1.4.1	Fratura de arames	12
2.1.4.2	Redução e aumento do diâmetro do cabo.....	12
2.1.4.3	Corrosão	13
2.1.4.4	“Birdcaging”	13
2.1.4.5	Desgaste externo.....	14

2.1.4.6	Dobras.....	14
2.1.4.7	Protrusão.....	14
2.1.5	Elementos auxiliares de cabos de aço	15
2.2	Ensaaios não destrutivos aplicados à inspeção de cabos de aço	16
2.2.1	Exame magnético-indutivo (MRT)	17
2.2.2	Raios X e γ	17
2.2.3	Teste de ultrassons por onda guiadas (GWT)	18
2.2.4	Visão computacional	19
2.2.5	Termografia por infravermelhos	20
2.2.6	Análise de corrente.....	20
2.2.7	Fibra ótica.....	21
2.3	Ensaio de emissão acústica.....	22
2.3.1	História	23
2.3.2	Instrumentação	23
2.3.2.1	Sensores.....	24
2.3.2.2	Meio de acoplamento	25
2.3.2.3	Sistema de condicionamento de sinal.....	26
2.3.3	Verificação/ Calibração do equipamento	27
2.3.3.1	Verificação do sensor	28
2.3.3.2	Verificação do pré-amplificador;	29
2.3.3.3	Verificação do condicionamento de sinal e do sistema de medição; ..	29
2.3.4	Medição do sinal de EA	30
2.3.5	Fontes de EA	31
2.3.5.1	Efeito de Kaiser e de Felicity	31
2.3.5.2	Ruído	32
2.3.6	Ondas acústicas	33
2.3.7	Localização de Defeitos	33
2.3.7.1	Técnica de localização linear.....	34

2.3.7.2	Técnica de localização zonal	34
2.3.7.3	Técnica de localização pontual.....	35
2.3.8	Vantagens e Desvantagens do ensaio.....	35
2.3.9	Aplicações	36
2.4	Ensaio de emissão acústica aplicado a cabos de aço	37
3	Desenvolvimento Experimental.....	43
3.1	Objetivo	43
3.2	Equipamento de ensaio	44
3.2.1	Cabos de Aço	44
3.2.2	Equipamento de Emissão Acústica	44
3.2.2.1	Sistema de aquisição e processamento de sinal.....	45
3.2.2.2	Software de processamento de dados	45
3.2.2.3	Sensores	46
3.2.2.4	Fixação dos sensores	46
3.2.2.5	Meio de acoplamento	46
3.2.3	Outros equipamentos/acessórios necessários.....	47
3.3	<i>Layout</i> utilizado	48
3.4	Procedimento	49
3.4.1	1º Ensaio - Testes efetuados com a máquina de tração	49
3.4.1.1	Provetes	49
3.4.1.2	Montagem.....	50
3.4.1.3	Avaliação da sensibilidade inicial	51
3.4.1.4	Verificação da atenuação.....	51
3.4.1.5	Testes efetuados.....	52
3.4.1.6	Avaliação da sensibilidade final.....	52
3.4.2	2º Ensaio - Teste da localização de rutura de arames.....	53
3.4.2.1	Provete.....	53
3.4.2.2	Montagem.....	53

3.4.2.3	Definição da posição dos sensores	53
3.4.2.4	Avaliação da sensibilidade inicial	54
3.4.2.5	Cálculo da velocidade de onda	54
3.4.2.6	Definição das localizações calculadas	54
3.5	Análise de Dados - Resultados	55
3.5.1	1º Ensaio - Testes efetuados com a máquina de tração	55
3.5.1.1	Avaliação da sensibilidade inicial	55
3.5.1.2	Verificação da Atenuação.....	55
3.5.1.3	1º Teste	56
3.5.1.4	2º Teste	57
3.5.1.5	3º Teste	57
3.5.1.6	4º Teste	57
3.5.1.7	5º Teste	57
3.5.1.8	6º Teste	58
3.5.1.9	7º Teste	58
3.5.1.10	Avaliação da sensibilidade final	59
3.5.1.11	8º teste.....	59
3.5.2	2º Ensaio - Teste da localização de rutura de arames.....	61
3.5.2.1	Avaliação da sensibilidade inicial	61
3.5.2.2	Velocidade da onda	62
3.5.2.3	Localizações obtidas.....	62
3.6	Interpretação de Resultados.....	63
4	Conclusões	69
	Referências.....	73
	Anexos.....	77
	Anexo I. Avaliação da Sensibilidade.....	77
	Anexo II. Tendência Força (kN) vs Tempo (s).....	78
	Anexo III. Gráficos e Listas obtidas para o 2º ensaio	81

Anexo IV. Correlações Amplitude vs Duração (μs) e Amplitude (dB) vs Tempo de subida (μs)	83
Anexo V. Tendências Energia vs Tempo e Amplitude vs Tempo e Correlação Energia vs Amplitude.....	87
Anexo VI. Tendência Amplitude vs Tempo do 8º Teste.....	91

Página intencionalmente deixada em branco.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de cabo de aço (Vornbäumen, 2018).....	4
Figura 2 - Exemplos de tipos de alma (ISO 17893:2004).....	5
Figura 3 - Exemplos de tipos de cordão (ISO 17893:2004).....	6
Figura 4 - Exemplos de cabos de cordão (ISO 17893:2004)	8
Figura 5 - Exemplos de cabos espiraloidais (ISO 17893:2004).....	9
Figura 6 - Exemplos de cabos com revestimento e/ou enchimento (ISO 17893:2004)..	9
Figura 7 – Direção da cocha (ISO 17893:2004)	11
Figura 8 - Fratura de arames (ISO 4309:2004)	12
Figura 9 – Redução e aumento do diâmetro do cabo (ISO 4309:2004).....	13
Figura 10 - Corrosão externa, à esquerda, e interna, à direita (ISO 4309:2004).....	13
Figura 11 - "Birdcaging" (ISO 4309:2004).....	13
Figura 12 - Desgaste Externo (ISO 4309:2004).....	14
Figura 13 – Dobras (ISO 4309:2004).....	14
Figura 14 - Protrusão de um arame, da alma e de um cordão (ISO 4309:2004).....	15
Figura 15 – MRT em cabo de aço com defeito (Collini & Degasperri, 2014).....	17
Figura 16 – Inspeção com radiação ionizante (Peng & Wang, 2015).....	18
Figura 17 - Propagação de ondas guiadas em cabo de aço – Adap. de Raisutis et al. ..	19
Figura 18 – Funcionamento da visão computacional na inspeção de cabos de aço (Patent US 8254660 B2, 2011)	19
Figura 19- Aplicação da análise de corrente a cabos de aço – Adap. de Henao et al. ..	21
Figura 20 – Teste a cabo de aço com recurso a fibra ótica – Adap. de Cortázer et al. ..	21
Figura 21 - Esquema do princípio das EA e da sua deteção (EN 13554:2011)	22
Figura 22 – Espectros de sinal contínuo, à esquerda, e de impulso, à direita – Adap. de EN 1330-9:2000.....	22
Figura 23 - Sensor de EA – Adap. de NDT Resource Center, 2018.....	24
Figura 24 – Diagrama simplificado de sistema de condicionamento de sinal – Adap. de NDT Resource Center, 2018.....	27
Figura 25 - Fonte Hsu-Nielson – Adap. de Teodorczyk, 2017	28
Figura 26 - Bloco de calibração acrílico	28
Figura 27 - Gerador de Sinais	29
Figura 28 - Parâmetros de definição do sinal – Adap. de Drummond et al., 2007	30
Figura 29 - Efeito de Kaiser – Adap. de Scott, 1991.	32
Figura 30 - Efeito da atenuação (Jacques, Flores, Strohaecker, & Reguly, 2009).....	33

Figura 31 - Técnicas de localização - Adap. de NDT Resource Center, 2018.....	34
Figura 32 - Ensaio de emissão acústica aplicado a reservatório enterrado – Adap.de FPrimeC Solutions.....	36
Figura 33 – Representações gráficas de amplitude e de energia absoluta- Adap. de Drummond et al, 2007	39
Figura 34 - DaisAE - Equipamento de monitorização para cabos de pontes suspensas (MISTRAS Group, 2015a).....	39
Figura 35 –Ensaio de tração dos cabos (Wenjie et al., 2013)	41
Figura 36 – Secção do cabo e representação desta (ISO 4309:2010)	44
Figura 37 - Placa de captação de sinais PCI-8 (MISTRAS Group, 2009).....	45
Figura 38- Sensor utilizado no ensaio experimental	46
Figura 39 – Máquina de tração.....	47
Figura 40 – 1º Provete	49
Figura 41 –Dimensões do 1º provete	49
Figura 42 – 2º Provete	50
Figura 43 – Dimensões do 2º Provete	50
Figura 44 – Esquema de montagem do 1º ensaio.....	51
Figura 45 – Esquema de montagem 2º ensaio.....	53
Figura 46 - Posicionamento dos sensores	53
Figura 47 –Montagem do 1º ensaio.....	55
Figura 48 - Sensibilidade (1) e Atenuação (2)	56
Figura 49 – 1º Provete danificado	58
Figura 50 - Gráfico Força vs Tempo do 7º teste	58
Figura 51 - Arames fragilizados do 2º provete	59
Figura 52 - Gráfico Força vs Tempo do 8º teste	59
Figura 53 – 2º Provete após o 8º Teste.....	60
Figura 54 - Montagem do 2º ensaio	61
Figura 55 - Sensibilidade inicial do 2º ensaio	61
Figura 56 - Representação dos pontos a testar	62
Figura 57 – Gráficos de Amplitude vs Duração da Avaliação da Sensibilidade e do 6º Teste.....	64
Figura 58 – Gráficos de Amplitude vs Tempo de subida da Avaliação da sensibilidade e do 6º Teste.....	64
Figura 59 - Gráficos Energia vs Tempo da Avaliação da sensibilidade e do 8º Teste..	66

Figura 60 - Gráficos Acontecimentos vs Energia e Acontecimentos vs Amplitude do 2º, 3º e 4º Teste.....	67
Figura 61 - Gráfico Amplitude vs Tempo do 8º Teste (Versão ampliada no Anexo VI) – a vermelho - sobreposto pelo gráfico Força vs Tempo (Figura 47) – a azul	68
Figura 62 - Gráfico Energia vs Amplitude do 8º Teste.....	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 6 - Classes de Resistência (ISO 2408:2017)	10
Tabela 7 - Acabamento da superfície do arame (NP EN 12385-2:2002)	11
Tabela 8 - Resumo dos testes efetuados.....	52
Tabela 9 - Atenuação	56
Tabela 10- Tempos de Chegada.....	62
Tabela 11 - Localização determinada.....	63
Tabela 12 –Teste da localização (Erro).....	68

Página intencionalmente deixada em branco.

LISTA DE SIGLAS, ACRÓNIMOS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas e Acrónimos

AEWG	<i>Acoustic Emission Working Group</i> (Grupo de trabalho de emissão acústica)
ASL	Média do nível de sinal
AST	<i>Auto Sensor Testing</i>
ASNT	<i>American Society for Nondestructive Testing</i> (Associação Americana para Ensaio não destrutivo)
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials</i> (Associação Americana de Ensaio de Materiais)
EA	Emissão acústica
EN	<i>European Norm</i> (Norma Europeia)
END	Ensaio não destrutivo
GWT	<i>Guided waves testing</i> (Teste de ondas guiadas por ultrassom)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para a Normalização)
ISQ	Instituto de Soldadura e Qualidade
LA	Limite de aquisição
LabLeak	Laboratório de emissão acústica do ISQ
LRUT	<i>Long range ultrasound testing</i> (Teste de ultrassom de longo alcance)
MARSE	<i>Measured area under the rectified signal envelope</i> (área medida abaixo dos sinais de tensão linear retificado)
MRT	<i>Magnetic Rope Testing</i> (Exame magnético-indutivo)
MsS	<i>Magnetostrictive Sensors</i> (Sensores magnetostrictivos)
NP	Norma Portuguesa
PZT	Titanato zirconato de chumbo
RMS	Média da raiz quadrada

SAMOS	Sistema acústico multicanal baseado em sensores
TFM	Trabalho final de Mestrado
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure</i> (Associação dos Engenheiros Alemães)

Lista de Símbolos

Δt	Diferença entre o tempo de chegada do sinal
$D_{m\acute{a}x}$	Distância máxima ao sensor
v_{onda}	Velocidade da onda no cabo
X	Distância da fonte ao ponto médio

NORMAS E LEGISLAÇÃO APLICÁVEL

EN 13477-2:2010	Non-destructive testing; Acoustic emission – Equipment characterization; Part 2: Verification of operating characteristic
EN 13554:2011	Non-destructive testing; Acoustic emission testing – General principles
EN 444	Non-destructive testing – General principles for radiographic examination of metallic material by X- and gamma rays.
ISO 17893:2004	Steel wire ropes — Vocabulary, designation and classification
ISO 2408:2017	Steel wire ropes – Requirements
ISO 4309:2010	Cranes - Wire ropes - Care and maintenance, inspection and discard
NP EN 12385-2:2002	Cabos de aço; Segurança; Parte 2: Definições, designação e classificação;
NP EN 1330-9:2017	Ensaio não destrutivo; Terminologia; Parte 9: Termos usados no ensaio de emissão acústica;
NP EN 13411-5:2003	Terminais para cabos de aço; Segurança; Parte 5: Serra-cabos em U;
NP EN 13477-1:2008	Ensaio não destrutivo; Emissão Acústica – Caracterização do equipamento; Parte 1: Descrição do equipamento;

Página intencionalmente deixada em branco.

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

No mercado atual, a evolução da indústria deve estar assente num desenvolvimento sustentável, na envolvimento de procedimentos de qualidade em diferentes processos empregues. O acréscimo do controlo da qualidade na indústria conduziu à crescente utilização dos ensaios não destrutivos (END).

Os END são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem implicar o seu dano ou destruição, sendo executadas em diferentes etapas da vida do produto, construção, montagem e manutenção. Os END tornam-se desta forma técnicas altamente viáveis e economicamente rentáveis, contribuindo para o aumento da competitividade para as empresas que os utilizam.

Métodos comuns de ensaios não destrutivos incluem o teste por ultrassons, a inspeção com líquidos penetrantes, a radiografia e o ensaio de emissão acústica (EA).

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho final de mestrado (TFM) tem como objetivo o estudo da aplicabilidade do ensaio de emissão acústica na inspeção de cabos de aço.

Para alcançar este objetivo, pretendem-se apresentar os fundamentos teóricos e os progressos feitos até à data no desenvolvimento desta técnica e ainda realizar dois ensaios distintos.

No 1º ensaio será analisado o comportamento acústico de um cabo sob tensão bem como confirmar a capacidade do equipamento de emissão acústica de detectar a presença de fissuras. O 2º ensaio permitirá estudar a aplicabilidade do ensaio de EA na localização de fissuras

1.3 ESTRUTURA

O presente trabalho foi estruturado em quatro capítulos, introdução, revisão teórica, desenvolvimento experimental e conclusão.

No primeiro capítulo é realizada uma introdução ao trabalho realizado, através de um enquadramento do tema, da exposição dos objetivos e da descrição da estrutura definida para o trabalho.

O segundo capítulo consiste na apresentação dos fundamentos teóricos do tema abordado. Este inicia-se pela descrição da composição e classificação dos cabos de aço, bem como os defeitos possíveis e os elementos auxiliares a serem usados nos cabos na sua fixação (capítulo 2.1).

Posteriormente são enumerados e sumariamente descritos os diferentes END possíveis de serem aplicados na inspeção de cabos de aço (capítulo 2.2), sendo que é dada especial incidência ao ensaio de emissão acústica (capítulo 2.3) por este ter sido estudado no desenvolvimento experimental.

Para finalizar o segundo capítulo é apresentado o estado da arte da aplicação do ensaio de emissão acústica aos cabos de aço (capítulo 2.4) desde a sua origem até à data.

No terceiro capítulo é descrita a componente experimental do presente trabalho. Neste capítulo são descritos os objetivos do ensaio, os equipamentos utilizados e o procedimento seguido. São ainda apresentados os resultados obtidos nos ensaios e a interpretação dos mesmos.

Por último são apresentadas as conclusões sobre o trabalho desenvolvido bem como algumas considerações a ter em conta em trabalho futuro.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 CABOS DE AÇO

Os cabos de aço são elementos de transmissão mecânica essenciais para a elevação de cargas e ligação de componentes. O propósito, as características e as suas potencialidades têm vindo a evoluir com o progresso da ciência.

As referências mais antigas da existência de cabos data 12 a 9 milénios antes de cristo, feitos com recurso a materiais existentes na natureza. No início do século XIX, o engenheiro de minas alemão Wilhelm Albert combinou a resistência à tração das correntes de ferro e orientação das fibras do cânhamo (matéria-prima muito utilizada em diferentes tipos de cabos) formando desta forma o primeiro cabo com a configuração semelhante aos cabos atualmente utilizados.

Após o seu aparecimento oficial foram surgindo um elevado número de aplicações para esta nova tecnologia e rapidamente começaram a ser tidos como preferenciais, relativamente ao uso de correntes no levantamento de cargas (Schlanbusch, Oland, & Bechhoefer, 2017).

Da mesma forma que a aplicação destes elementos se diversificou, também os cabos evoluíram. Surgiram então as almas de fibra e posteriormente a lubrificação, os enchimentos e os revestimentos.

Entre as diversas invenções emergentes, a empresa alemã Adolf Bleichert & Co. notabilizou-se pela construção de teleféricos, John A. Roebling pela criação das pontes suspensas (Hoffman & Zrnié, 2012) e a empresa *Lehigh Coal & Navigation Company* no transporte de matéria prima para a indústria mineira.

Para compreender melhor a evolução dos cabos de aço é necessário saber caracterizar os tipos de cabos existentes, as suas aplicações e a legislação e normas aplicáveis.

2.1.1 Elementos do cabo

A grande maioria dos cabos de aço (Figura 1) existentes na indústria são formados por três elementos, alma, cordão e arame. Cada cabo contém vários cordões em que cada um, é constituído por um conjunto de arames de forma e dimensões apropriadas, dispostos de

modo helicoidal no mesmo sentido em uma ou mais camadas em torno de uma alma. Incluídos na constituição dos cabos de aço é importante ainda salientar a presença de lubrificantes e agentes de preservação e ainda das inserções.

Nos sub-capítulos seguintes são descritos os elementos que constituem o cabo.

A definição, designação e a composição dos cabos de aço estão regulados pelas normas NP EN 12385-2:2002 e ISO 17893:2004.

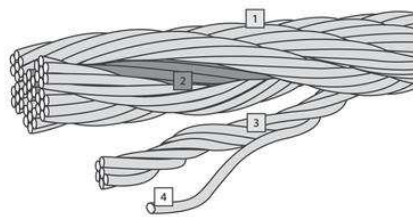


Figura 1 – Exemplo de cabo de aço (Vornbäumen, 2018)

Legenda: 1 – Cabo de aço; 2 – Alma; 3 – Cordão; 4 – Arame

2.1.1.1 *Arames*

Os arames, podem tomar diferentes denominações de acordo com a sua localização no cabo. Cada cordão é composto por arames exteriores, interiores e centrais correspondendo aos arames existentes, respetivamente na camada exterior, na camada interior e no eixo de cada cordão.

Podem ainda existir arames de enchimento que servem para encher os interstícios entre as camadas de arames e os arames da alma no caso de a alma ser um cordão de arames.

2.1.1.2 *Alma*

A alma é o elemento central de um cabo em torno do qual são cochados¹ helicoidalmente cordões (Figura 2). A alma pode ser do tipo:

- **FC** – Alma de fibra;
- **NFC** – Alma de fibra natural;
- **SFC** – Alma de fibra sintética;
- **SPC** – Alma polimérica sólida;

¹ Cochear designa o ato de torcer cabos.

- **WC** – Alma de aço;
- **WSC** – Alma com cordão de arames;
- **IWRC** – Alma com cabo de aço independente.

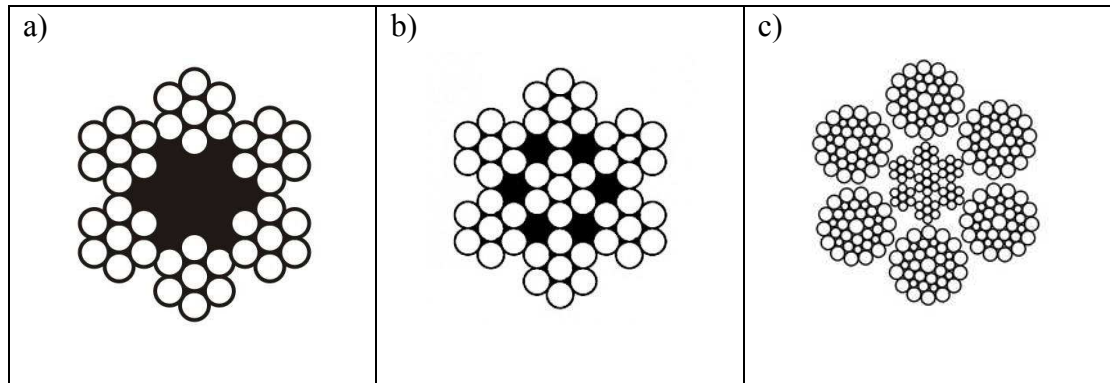


Figura 2 - Exemplos de tipos de alma (ISO 17893:2004)

Legenda: a) FC; b) WSC; c) IWRC

No quadro 4 da norma NP EN 12385-2:2002 são apresentados outros tipos de alma cuja a designação varia com a respetiva aplicação.

2.1.1.3 Cordão

A estrutura do cordão é definida em função da aplicação que se pretende dar ao cabo de aço. Abaixo são indicados os diferentes tipos de cordão alguns dos quais são ainda exemplificados na Figura 3.

- Cordão redondo;
- Cordão triangular;
- Cordão Oval;
- Cordão de fita plana;
- Cordão de uma camada simples de arames;
- Cordão de camadas paralelas (torção igual);
- Cordão *Seale* – cordões deste tipo são compostos por duas camadas adjacentes (no mínimo) com o mesmo número de arames;
- Cordão *Warrinton* – camada exterior constituída por arames de diâmetros diferentes e duas vezes o número de arames da camada interior;
- Cordão *Filler* – cordão no qual o número de arames exteriores é duas vezes superior ao número de arames interiores e contém arames de enchimento nos interstícios;

- Camadas paralelas combinadas – Cordão cujas camadas são compostas pela aglutinação das características dos cordões *Seale* e *Warrington*;
- Cordão de construção em operações múltiplas;
- Cordão de camadas cruzadas;
- Cordão de camadas compostas;
- Cordão compactado.

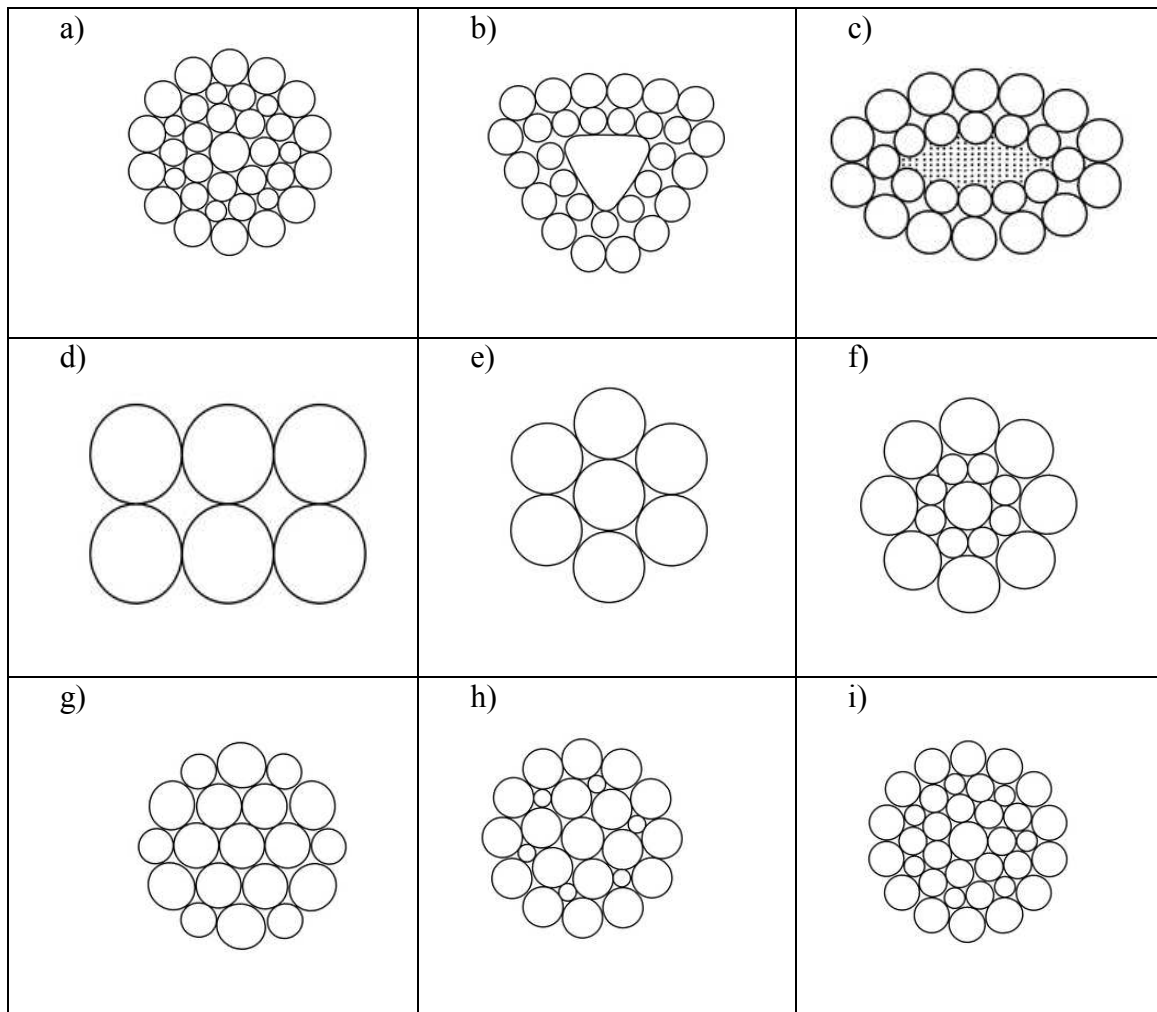


Figura 3 - Exemplos de tipos de cordão (ISO 17893:2004)

Legenda: a) Cordão redondo; b) Cordão triangular; c) Cordão oval; d) Cordão de fita plana; e) Cordão de uma camada simples de arames; f) Cordão Seale; g) Cordão Warrington; h) Cordão Filler; i) Cordão de camadas paralelas combinadas

2.1.1.4 Lubrificantes e agentes de preservação

Como forma de reduzir fricções internas entre os arames a proteger contra a corrosão podem ser utilizados lubrificantes, agentes de impregnação (no fabrico das almas NFC) e agentes de preservação (nas inserções e nos revestimentos).

2.1.1.5 *Inserções*

As inserções são fibras ou polímeros sólidos utilizados para separar cordões ou arames adjacentes nas diferentes camadas ou para preencher os interstícios do cabo de aço.

2.1.2 **Classificação**

A norma NP EN 12385-2:2002 classifica os cabos de aço em 3 categorias, nomeadamente cabos de cordões, cabos espiraloidais e cabos com revestimento e/ou enchimento.

2.1.2.1 *Cabos de cordões*

Os cabos de cordões, tal como o nome sugere, são cabos formados por cordões e uma alma central (que pode ser também um cordão). Desta forma verificam-se as seguintes possibilidades:

- **Cabo de camada única** – cabo formado apenas por uma camada de cordões em torno de uma alma;
- **Cabo antigiratório** – cabo projetado para gerar redução dos níveis de binário e rotação quando carregado;
- **Cabo de duplo paralelo** – cabo composto, no mínimo, por duas camadas de cordões colocados de forma helicoidal de um cordão ou alma têxtil;
- **Cabo de cordões compacto** - cabos submetidos a processos de compactação antes de serem fechados;
- **Cabo compactado (estampado)** - cabos submetidos a processos de compactação (nomeadamente estampagem) antes de serem fechados reduzindo o seu diâmetro;
- **Cabo calabroteado** – composição de diversos cabos (usualmente seis) em todo de uma alma (sétimo cabo);
- **Cabo entrançado** - cabo com os cordões entrançados;
- **Cabo eletromecânico** – Cabo com condutores elétricos no seu centro;
- **Cabo plano** – Conjunto de cabos unitários com 4 cordões orientações alternadas colocados lado a lado.

Na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** são apresentados exemplos dos diferentes tipos de cabos de cordões

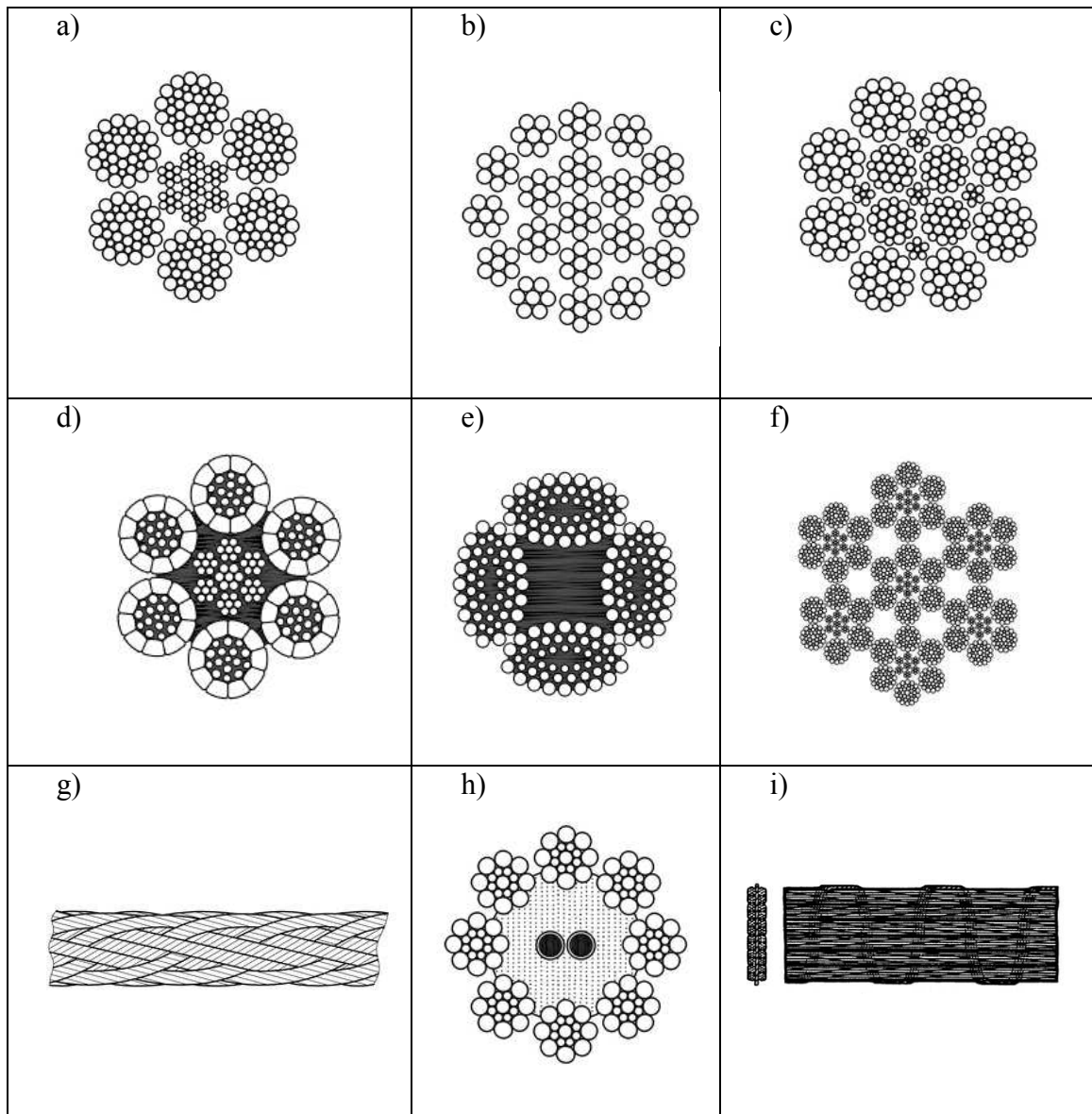


Figura 4 - Exemplos de cabos de cordão (ISO 17893:2004)

Legenda: a) Cabo de camada única; b) Cabo antigiratório; c) Cabo de duplo paralelo; d) Cabo de cordões compacto; e) Cabo compacto; f) Cabo calabroteado; g) Cabo entrançado; h) Cabo eletromecânico; i) Cabo plano;

2.1.2.2 Cabos espiraloidais

Os cabos espiraloidais caracterizam-se pela montagem de pelo menos duas camadas de arames cochados de forma helicoidal ao longo de um arame redondo central, cordão integrado ou cordão de passo paralelo. Pelo menos uma camada de arames é cochada em sentido oposto, ou seja, contra o sentido da outra camada(s) de forma a otimizar as características de rotação.

Estes tipos de cabos (Figura 5) podem-se subdividir em:

- **Cabo de cordão espiraloidal** - Cabo composto apenas por arames redondos;
- **Cabo meio fechado** – Cabo de cordão espiraloidal cuja a camada exterior é formada com arames alternadamente redondos e meio fechados (em forma de h);
- **Cabo fechado** – Cabo de cordão espiraloidal cuja a camada exterior é formada com arames fechados (em forma de z);

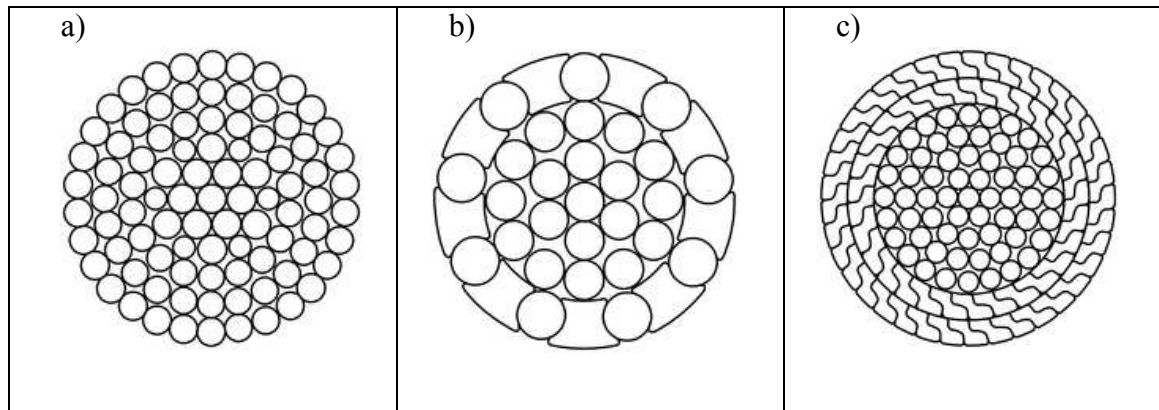


Figura 5 - Exemplos de cabos espiraloidais (ISO 17893:2004)

Legenda: a) Cabo de cordão espiraloidal; b) Cabo meio fechado; c) Cabo fechado

2.1.2.3 Cabos com revestimento e/ou enchimento

Como forma de diminuir o efeito da corrosão, os cabos podem conter revestimentos (para a corrosão dos arames externos) e/ou enchimento (para os arames interiores) recorrendo-se ao uso de polímeros sólidos (Figura 6).

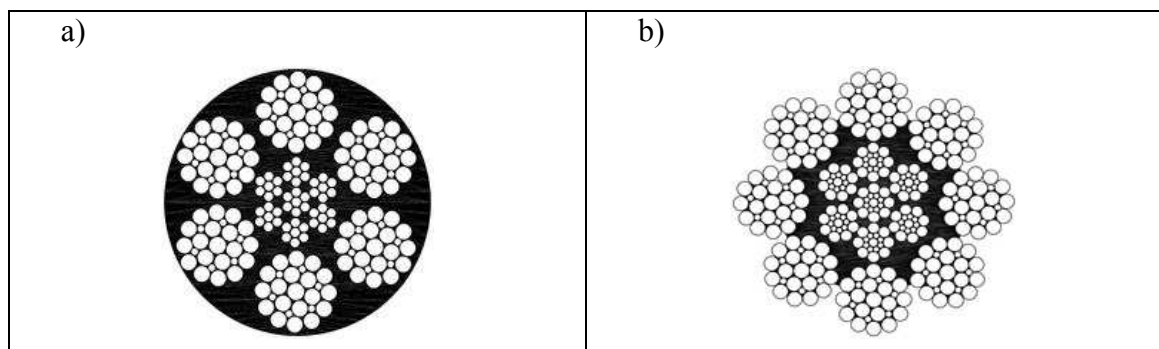


Figura 6 - Exemplos de cabos com revestimento e/ou enchimento (ISO 17893:2004)

Legenda: a) Cabo com revestimento; b) Cabo com enchimento;

2.1.3 Designação

Aplicando os diferentes parâmetros supramencionados, a norma NP EN 12385-2:2002 estipula que a designação do cabo deverá ter a seguinte parametrização:

(1) (2) (3) (4) (5) (6)

Sendo que os números correspondem aos seguintes parâmetros:

- (1) Dimensão(ões)
- (2) Construção do cabo
- (3) Construção da alma
- (4) Classe do cabo, c.a.
- (5) Acabamento do arame
- (6) Tipo e direção da cocha

2.1.3.1 *Construção do cabo*

No caso dos cabos de cordões, a construção do cabo tem a seguinte parametrização:

(1) x (2) - (3)

Sendo que os números correspondem aos seguintes parâmetros:

- (1) N° de cordões;
- (2) N° de arames em cada cordão exterior e correspondente designação do cordão;
- (3) Tipo de Alma;

2.1.3.2 *Classes de Resistência*

Existem inúmeras classes de cabos de aço consoante a gama de resistência à tracção necessária para as diversas aplicações. As classes principais estão definidas na Tabela 1:

Tabela 1 - Classes de resistência à tração de cabos de aço (ISO 2408:2017)

Classe	Intervalo de resistência à tração [N/mm²]
1570	1370 a 1770
1770	1570 a 1960
1960	1770 a 2160
2160	1960 a 2360

2.1.3.3 *Acabamento da superfície do arame*

Como forma de garantir maior proteção da superfície dos arames do cabo, pode ser definido o tipo de acabamento dos arames exteriores. O acabamento da superfície deve ser designado usando o símbolo indicado na Tabela 2:

Tabela 2 - Acabamento da superfície do arame (NP EN 12385-2:2002)

Tipo de revestimento	
Sem revestimento (ou brilhante)	U
Revestimento em zinco classe B	B
Revestimento em zinco classe A	A
Revestimento em liga de zinco classe B	B(Zn/Al)
Revestimento em liga de zinco classe A	A(Zn/Al)

2.1.3.4 *Tipo e direção da cocha*

De acordo com a norma ISO 17893:2004, a torção dos arames e cordões da camada exterior ao longo da extensão do cabo de aço influencia diversas características que condicionam o funcionamento apropriado dos mesmos. Os arames podem ser cochados da esquerda para a direita (Z) ou da direita para a esquerda (S). No caso dos cabos de cordões a orientação dos arames da camada de cordões exterior face aos próprios cordões pode ser diferente (cocha cruzada) ou ser igual (cocha Lang). A Figura 7 apresenta as diferentes hipóteses (sZ, zS, zZ e sS).

A cocha do cabo pode ainda ser do tipo alternada ou de camadas cruzadas (contra cocha).

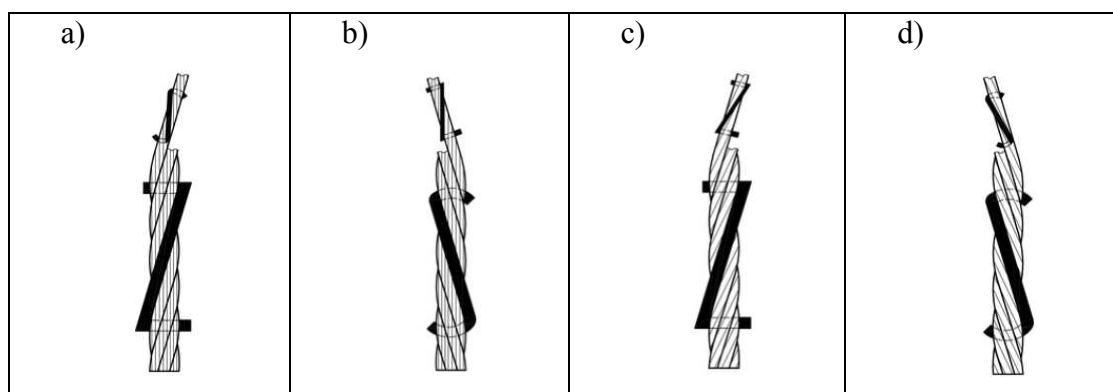


Figura 7 – Direção da cocha em cabos de aço (ISO 17893:2004)

Legenda: a) sZ; b) zS; c) zZ; d) sS;

2.1.4 Defeitos possíveis

O cabo de aço por ser um elemento de ligação inserido em diferentes estruturas é sujeito ao aparecimento de defeitos em grandes quantidades e das mais variadas formas. No anexo D da ISO 4309:2004 são apresentados alguns dos defeitos mais comuns nos cabos de aço, que se passa a sintetizar.

2.1.4.1 *Fratura de arames*

A fratura de arames é um defeito bastante comum e a probabilidade de ocorrer aumenta circunstancialmente ao longo da vida do cabo (Figura 8). Deve-se a vários fatores, um dos quais é o movimento de carácter cíclico das polias em que o cabo se apoia (Rice, 2017).

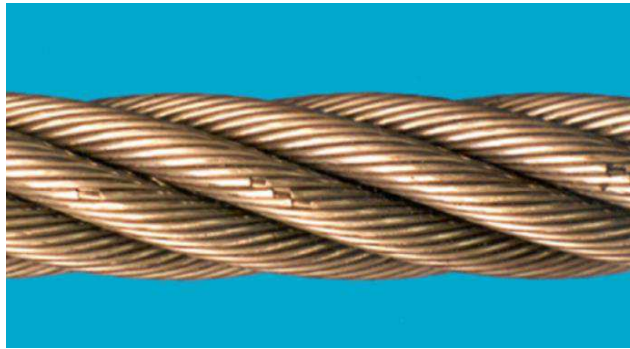


Figura 8 - Fratura de arames (ISO 4309:2004)

2.1.4.2 *Redução e aumento do diâmetro do cabo*

A redução do diâmetro do cabo pode ser consequência de abrasão, corrosão ou defeitos locais na alma do cabo. A sua substituição é recomendada no momento que o seu diâmetro seja inferior a 90% do diâmetro nominal (Rice, 2017).

O caso do aumento do diâmetro surge como resultado de impactos exteriores ao cabo ou ainda absorção de humidade.

Na Figura 9 são apresentados dois exemplos de cabos cujo o seu diâmetro é inferior ou superior ao diâmetro de origem

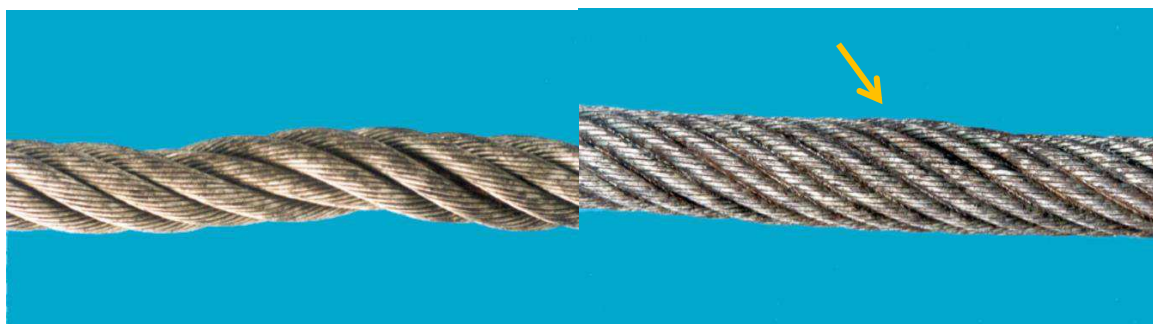


Figura 9 – Redução (à esquerda) e aumento (à direita) do diâmetro do cabo (ISO 4309:2004)

2.1.4.3 **Corrosão**

A corrosão do cabo pode ser interna ou externa (Figura 10), generalizada ou localizada. A sua existência pode conduzir à diminuição da secção do cabo e da sua tensão de rutura.



Figura 10 – Cabo com corrosão externa, à esquerda, e interna, à direita (Adap. de ISO 4309:2004)

2.1.4.4 **“Birdcaging”**

Esta deformação caracteriza-se por ter a camada de arames exteriores afastada da camada interior ou da alma (Figura 11). Surge como resultados de montagem incorreta ou terminais apertados (Rice, 2017).



Figura 11 – Cabo exibindo "Birdcaging" (ISO 4309:2004)

2.1.4.5 *Desgaste externo*

Surge como consequência de embates do cabo (em carga) com outros equipamentos adjacentes. Afeta principalmente os arames exteriores. Quando o desgaste (Figura 12) se propaga paralelamente ao eixo do cabo é possível afirmar que este foi arrastado sobre a superfície de um objeto (Verreet & Ridge, 2006).

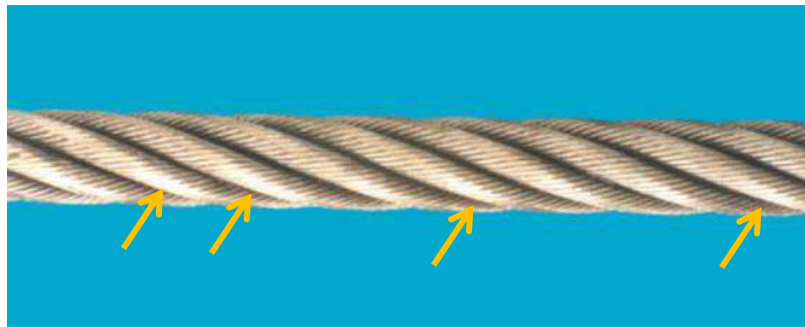


Figura 12 – Cabo com desgaste externo (Adap. de ISO 4309:2004)

2.1.4.6 *Dobras*

As dobras são deformações causadas pela resistência que o cabo oferece quando sujeito a forças de torção (Figura 13).

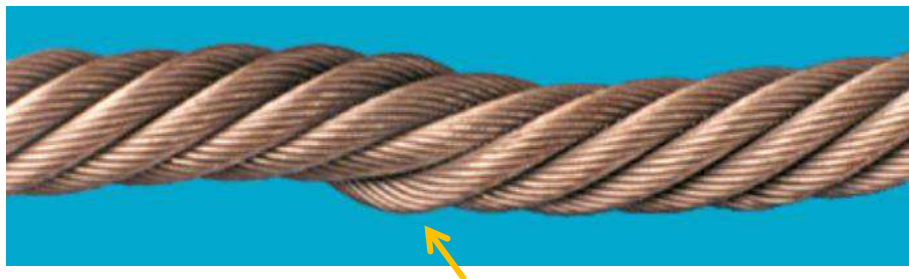


Figura 13 – Dobras (ISO 4309:2004)

2.1.4.7 *Protrusão*

A protrusão caracteriza-se pela movimentação de um arame, de um cordão ou de uma alma num cabo de aço (Figura 14).

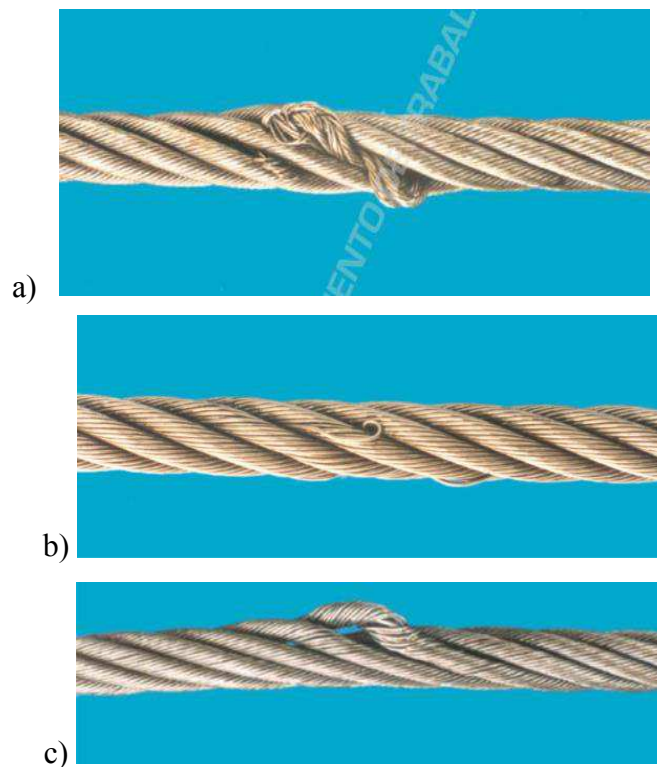


Figura 14 – Fenómeno de protrusão em diferentes elementos do cabo (ISO 4309:2004)

Legenda: a) Protrusão na alma; b) Protrusão num arame; c) Protrusão num cordão;

2.1.5 Elementos auxiliares de cabos de aço

Para a correta aplicação dos cabos de aço numa estrutura ou equipamento, estes por si só não são suficientes. É necessário recorrer a elementos auxiliares, ou terminais. Entre os possíveis, a norma EN 13411, nas suas diferentes partes, referencia os seguintes elementos:

- Parte 1. Sapatilhos para estropos de cabo de aço;
- Parte 2. Costuras de olhal para estropos de cabo de aço;
- Parte 3. Mangas e prensagem de mangas;
- Parte 4. Enchimento de casquilhos com metal ou resina;
- Parte 5. Serra-cabos em U
- Parte 6. Terminal em cunha assimétrica;
- Parte 7. Terminal em cunha simétrica;
- Parte 8. Terminais prensados.

Na componente prática deste trabalho serão aplicados nos cabos de aço vários serra-cabos em U.

2.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS APLICADOS À INSPEÇÃO DE CABOS DE AÇO

A Associação Americana para Ensaio não destrutivo (ASNT) define ensaios não destrutivos como processo de inspecionar e detectar fissuras, corrosão ou outros potenciais defeitos em qualquer tipo de estrutura, desde pontes a carros, máquinas a componentes de máquinas. Ao contrário de outras formas de inspeção, os END não provocam danos ao objeto a inspecionar (ASTN - American Society for Nondestructive Testing, 2018).

Os END são aplicados através de diversas técnicas e métodos, entre as quais se incluem a utilização de ultrassons, radiação X e gama entre outros.

Devido à existência de uma grande panóplia de END para testar os mais variados objetos, as possibilidades são inúmeras.

Na inspeção de cabos de aço a técnica principal é a inspeção visual do cabo. Os END são utilizados como testes complementares de forma a garantir resultados mais assertivos. Existem diversos END com capacidade de inspecionar cabos de aço. Nos últimos cinco anos, o exame magnético-indutivo tem sido distintamente a técnica mais desenvolvida e com maior uso a nível internacional, no entanto outras técnicas começam a emergir com resultados bastante positivos (Schlanbusch et al., 2017), designadamente:

- Exame magnético-indutivo (MRT)
- Raios X e γ
- Teste de ultrassons por ondas guiadas (GWT)
- Visão computacional
- Termografia por infravermelhos
- Assinatura de corrente
- Fibra ótica
- Emissão acústica (EA)

Entre as técnicas supramencionadas verifica-se, no entanto, que nem todas são referidas em normas técnicas de equipamentos que contêm cabos de aço como elemento de transmissão.

Nas instalações por cabo, para transporte de pessoas, a norma técnica EN 12927-7:2004 referencia o MRT e a inspeção com recurso a raios X e γ como técnicas complementares à

inspeção visual. Estas técnicas devem estar de acordo com as normas EN 12927-8:2004 e EN 444, respetivamente.

2.2.1 Exame magnético-indutivo (MRT)

Os equipamentos de medição do MRT (Figura 15) permitem a inspeção do cabo através da sua magnetização e a posterior análise do campo magnético através de um ou mais sensores (Schlanbusch et al., 2017).

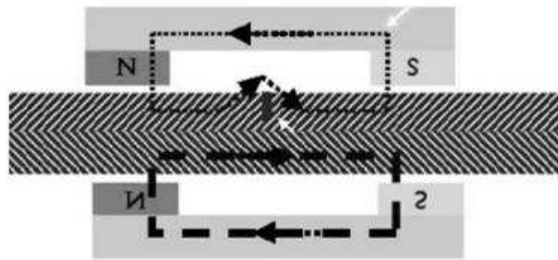


Figura 15 – MRT em cabo de aço com defeito (Collini & Degasperi, 2014)

De acordo com a norma EN 12927-8:2004 o método eletromagnético consiste na colocação de duas bobinas (primária e secundária) enroladas no cabo de aço, atuando este como induzido, em que a bobina primária é submetida a uma corrente alternada de baixa frequência e a secundária mede a magnetização do cabo. Caso o cabo tenha uma descontinuidade, será verificada uma oscilação da tensão na bobina secundária.

A mesma norma indica ainda que o método MRT baseia-se na magnetização do cabo até ao nível de saturação através de um forte campo magnético, permitindo desta forma, detetar a presença de arames quebrados ou de corrosão no cabo.

2.2.2 Raios X e γ

A radiação X e a radiação γ tem a particularidade de penetrar a maioria dos materiais existentes, incluindo o aço. Ao submeter um comprimento do cabo de aço à radiação, parte do sinal é absorvida e o restante penetra no cabo. As imagens captadas são impressas em duas dimensões tornando possível detetar irregularidades ou diminuição da secção.

A aplicação da radiação γ , por ter mais energia, permite analisar menores diâmetros e dispensa a utilização de ligação à corrente e água de arrefecimento, elementos essenciais para a utilização de raios X (Schlanbusch et al., 2017).

Contrariamente, a utilização de raios X tem a vantagem de produzir imagens com maior contraste, por sua vez com maior qualidade e não emitem radiação continuamente, ou seja, o manuseamento torna-se mais seguro (Schlanbusch et al., 2017).

Contrariamente com as restantes técnicas, as radiações ionizantes têm a vantagem de analisar cabos com revestimentos exteriores, tal como é possível observar na Figura 16 (Peng & Wang, 2015).

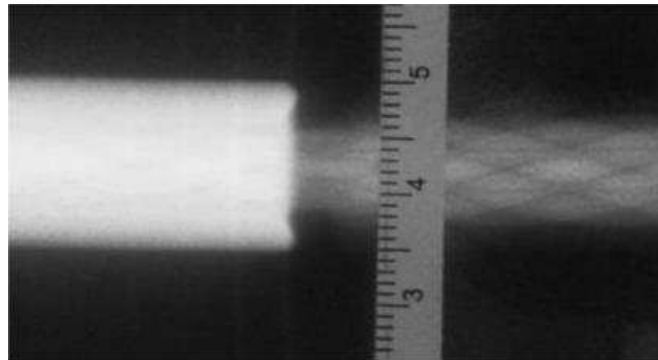


Figura 16 – Inspeção com radiação ionizante (Peng & Wang, 2015)

2.2.3 Teste de ultrassons por onda guiadas (GWT)

O GWT ou teste de ultrassons de longo alcance (LRUT) é uma variante do teste por ultrassons devido a recorrer ao uso de ultrassons. Possibilita aumentar a área de inspeção e assim permite a análise de estruturas com maiores comprimentos (Raisutis, Kazys, Mazeika, Samaitis, & Zukauskas, 2016).

Este teste é maioritariamente utilizado na inspeção de estruturas tubulares, no entanto pode ser aplicado na inspeção de cabos de aço recorrendo ao uso de transdutores piezoelétricos ou sensores magnetorestritivos - MsS - (Xu, Wu, & Sun, 2013). De notar que enquanto os transdutores piezoelétricos necessitam de contacto direto com o cabo, os MsS podem gerar sinais sem qualquer contacto.

Algumas vantagens deste método são (Hay, 2012):

- Capacidade de detetar corrosão ou quebras de arames no interior do cabo;
- Permite inspecionar até 90 m de cabo com o sensor posicionado apenas num local;
- O sensor e o equipamento de ensaio são leves e fáceis de transportar.

Na Figura 17 é representado um exemplo da aplicação da técnica em cabos de aço.

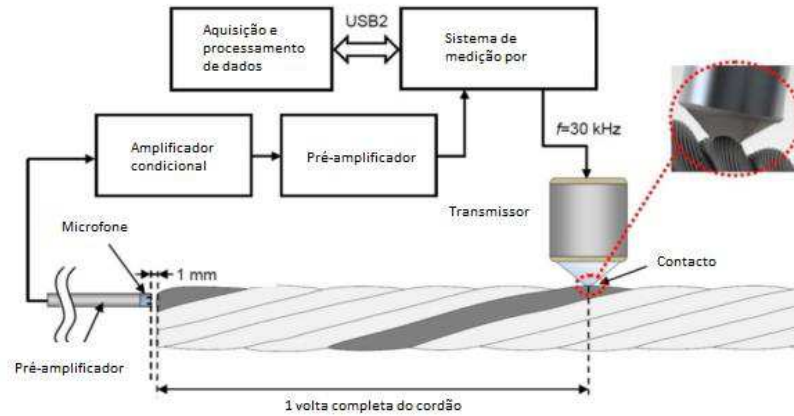


Figura 17 - Propagação de ondas guiadas em cabo de aço – Adap. de Raisutis et al.

2.2.4 Visão computacional

Tendo em conta, que na inspeção de cabos de aço, a inspeção visual é a técnica utilizada como primeiro recurso, foi desenvolvida a visão computacional que, através de câmaras devidamente posicionadas, executa de forma proeminente a inspeção visual.

Esta técnica pode ser verificada na tecnologia patenteada por Verret (Patent US 8254660 B2, 2011), no qual três câmaras são posicionadas de forma estacionária enquanto que os cabos são movimentados. Desta forma, o cabo é examinado na sua totalidade (Figura 18).

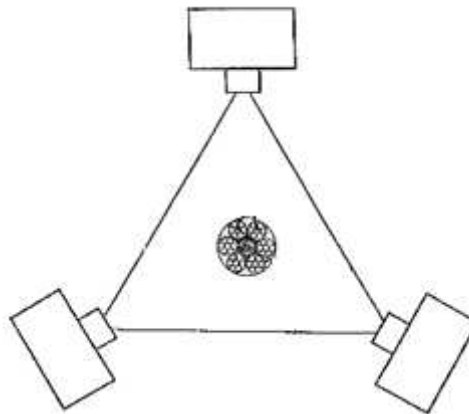


Figura 18 – Funcionamento da visão computacional na inspeção de cabos de aço (Patent US 8254660 B2, 2011)

Com a pretensão de determinar os defeitos existentes no cabo de aço é desenvolvido um modelo tridimensional do mesmo (Wacker & Denzler, 2013). Uma representação deste modelo é sobreposta com a imagem do cabo real e analisada computacionalmente. As diferenças apresentadas entre as duas imagens são representativas dos defeitos existentes.

Ao submeter o cabo ao ensaio (no qual foram aplicadas quatro câmaras, invés de três) foi possível analisar a totalidade da superfície do cabo e obter 95% dos defeitos existentes e apenas 1,5% de falsos alarmes (Patent US 8718352 B2, 2014).

2.2.5 Termografia por infravermelhos

Num estudo realizado em 2014, um cabo de aço foi submetido a uma variação de tensão, e com o apoio de câmaras de alta definição (HD) e elevada sensibilidade, foi possível verificar que a sua temperatura se manteve constante até ser atingida 72% da tensão de rutura do cabo. Após esta tensão verificou-se uma variação da temperatura em diferentes pontos do cabo nomeadamente nas zonas com menor resistência (Peterka et al., 2014).

A pesquisa demonstra que, nas condições indicadas, a termografia por infravermelhos (comprimento de onda de 70 nm a 1 mm) é ideal para a deteção de zonas de concentrações de tensões em cabos em carga.

2.2.6 Análise de corrente

Uma das técnicas mais recentes e emergentes na inspeção de cabos de aço é a análise de corrente. Entre as aplicações estudadas destaca-se a deteção do efeito “*birdcaging*” (ver 2.1.4.4). Num estudo realizado em 2011 (Henao, Fatemi, Capolino, & Sieg-Zieba, 2011), foi colocado o cabo de aço numa polia e induzido um momento torsor através de um motor elétrico no qual foi retirada a assinatura de corrente do mesmo. Obteve-se, desta forma, uma relação entre a frequência da corrente e o momento torsor provocado, necessária para o aparecimento do defeito (Figura 19).

Esta técnica apresenta uma vantagem relativamente às demais por não necessitar de sensores adicionais. No entanto, por estar em fase de desenvolvimento, os custos associados são elevados e ainda não é aplicável à generalidade dos cabos.

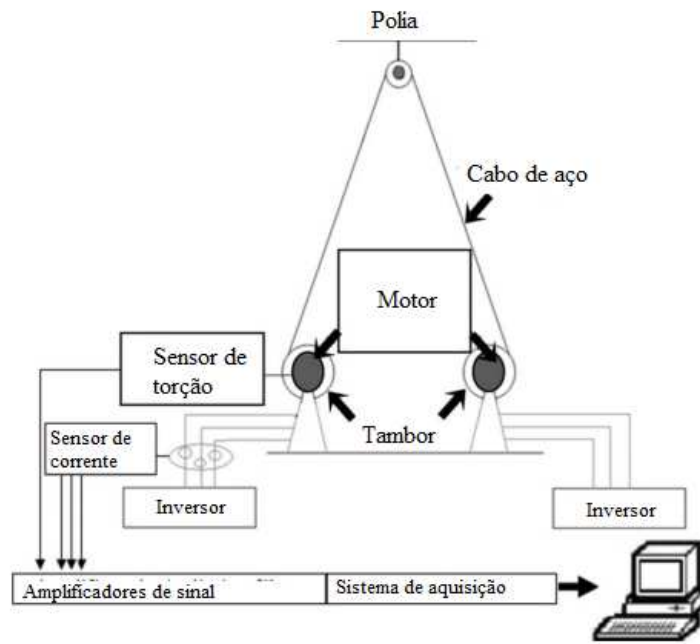


Figura 19- Aplicação da análise de corrente a cabos de aço – Adap. de Henao et al.

2.2.7 Fibra ótica

A utilização da fibra ótica na inspeção de cabos de aço, em comparação com os demais END, tem apresentado poucos estudos e desta forma não se encontra muito desenvolvida (Schlanbusch et al., 2017). Entre os estudos realizados verifica-se o caso de Córdazar *et al.*, no qual aplicou esta técnica na detecção de rutura de arames individuais. Este ensaio foi realizado através da emissão de impulsos *laser* numa fibra ótica e o cálculo da distância foi obtido pelo tempo de ida e de retorno do sinal (Cortázer, Larrondo, Laura, & Avalos, 1996). A Figura 20 representa a montagem do equipamento para realização do ensaio.

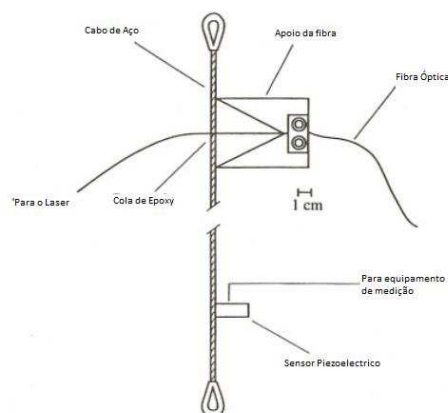


Figura 20 – Teste a cabo de aço com recurso a fibra ótica – Adap. de Cortázer et al.

2.3 ENSAIO DE EMISSÃO ACÚSTICA

A emissão acústica (EA) é o fenómeno da libertação de ondas elásticas em materiais, quando estes sofrem alterações internas irreversíveis resultantes de, por exemplo, formação de fissuras, deformação plástica por fadiga, gradientes de temperatura e cargas mecânicas externas (Huang, M., Jiang L., Liaw, P.K., Brooks, C. R., Seeley, R., and Klarstrom, 1998).

Com base no esquema da Figura 21, quando é aplicada uma carga (8) a um determinado exemplar (6), este começa a sofrer modificações internas estruturais como deformação plástica local, crescimento de grão ou corrosão (1) que provoca, a libertação de ondas elásticas (7) ao longo do corpo do espécime. Estas ondas ao atingirem a superfície, e ao propagarem-se nesta (2) são detetadas através do uso de um transdutor elétrico (4) que, com o apoio de amplificadores (3), converte os movimentos superficiais do material num sinal elétrico (5).

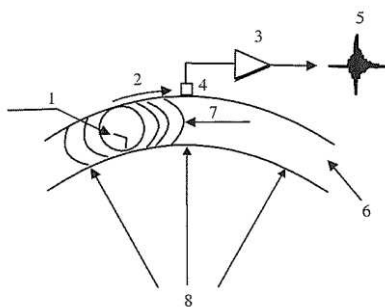


Figura 21 - Esquema do princípio das EA e da sua deteção (EN 13554:2011)

O sinal elétrico ou sinal de EA (Figura 22) é desta forma, diretamente dependente da fonte que o produz. Fontes como rotação de rolamentos emitem sinais contínuos no tempo enquanto que a rotura de arames emitem sinais de impulsos (Miller & Mc Intire, 1987). Por outro lado e de acordo com a norma, EN 1330-9:2000, o sinal contínuo existe quando os eventos de emissão acústica não podem ser divididos no tempo, enquanto que o sinal de impulso pode ser dividido.

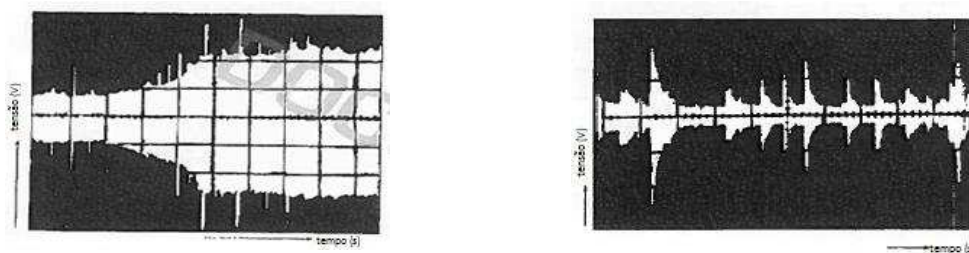


Figura 22 – Espectros de sinal contínuo, à esquerda, e de impulso, à direita – Adap. de EN 1330-9:2000

2.3.1 História

De acordo com os estudos executados por Ian G. Scott, as primeiras observações da emissão acústica rondam os anos 6500 a.C. ao serem escutados sons audíveis no processo de arrefecimento de cerâmicos. Posteriormente, nos anos 3700 a.C., surge na metalurgia o termo “*tin cry*” (som emitido por estanho puro na deformação plástica) na região da Anatólia. A primeira observação escrita surge, no entanto, no século VIII pelo alquimista árabe Jabir in Hayyan ao verificar que no processo de forjamento, o som produzido por ferro e por estanho é substancialmente diferente (Scott, 1991).

Já no século XIX, muitos foram os estudos que se seguiram com objetivo de obter correlações entre emissões de diferentes materiais e de diferentes ligas destacando cientistas como Czochralski, Albert Portevin e Francois Le Chatelier (Miller & Mc Intire, 1987). Começou-se também a estudar emissão dos materiais quando sujeitos a diferentes esforços nomeadamente por Robert Anderson e Friedrich Forster. (Miller & Mc Intire, 1987). A grande quantidade de estudos culminou na elaboração da tese de doutoramento de Joseph Kaiser no qual enfatizou todos os resultados e conclusões numa pesquisa que ficou reconhecida com o início do atual teste de emissão acústica (Kaiser, 1950).

Devido ao elevado número de publicações sobre a técnica em 1968 foi criado o AEWG - *Acoustic Emission Working Group* em Idaho nos Estados Unidos da América. Desta forma foi possível reunir investigadores, técnicas aplicadas e ainda definir terminologias. Com o passar dos anos foi fundado o IIIAE – *International Institute of Innovative Acoustic Emission* formado pelo AEWG, o JCAE - *Japanese Committee on Acoustic Emission* e pelo EWGAE - *European Working Group on Acoustic Emission*. O IIIAE é atualmente, a entidade maior no estudo e no desenvolvimento desta técnica.

2.3.2 Instrumentação

Tipicamente, o equipamento de inspeção da EA é formado por três elementos individuais: o sensor, o meio de acoplamento e o sistema de condicionamento de sinal. A instrumentação deve estar de acordo com as normas NP EN 13477-1:2008 e EN 13477-2:2010.

2.3.2.1 Sensores

A detecção das EA é normalmente efectuada através da aplicação de cristais piezoelétricos de titanato zirconato de chumbo (PZT) inseridos nos sensores (Ohtsu, 2008). Este fornece o modo mais eficiente de conversão das ondas elásticas - EA - num sinal elétrico (NP EN 13477-1:2008). A maioria dos sensores opera na gama de frequências de 20 kHz a 1MHz (NDT Resource Center, 2018)

De acordo com a norma NP EN 13477-1:2008 e conforme a Figura 23, o invólucro do sensor envolve o cristal e fornece uma proteção eletromagnética do elemento sensor e tem normalmente um pólo comum ao elemento sensor. No conjunto existe ainda uma sola cerâmica ou epóxida colocada entre o cristal (PZT) e o objeto de ensaio, que promove o isolamento elétrico do sensor.

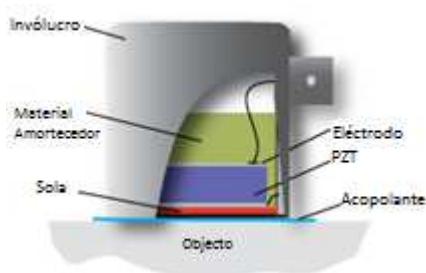


Figura 23 - Sensor de EA – Adap. de NDT Resource Center, 2018

Em função do método de montagem, o sensor pode ser de ponta simples, no qual a proteção do cabo coaxial é ligada ao invólucro do sensor e a um dos lados do cristal (Figura 23), ou diferencial, onde é utilizado um cabo blindado entrelaçado duplo. Estes possuem melhor imunidade ao ruído eletromagnético quando comparado com o sensor de ponta simples.

Relativamente à frequência, os sensores piezoelétricos são caracterizados em dois tipos: ressonantes ou de banda larga. Os ressonantes têm o conteúdo em frequência do sinal transitório maioritariamente determinado pela frequência de ressonância do cristal, enquanto que, os de banda larga têm uma resposta em frequência muito plana, quando amortecidos corretamente (NP EN 13477-1:2008).

Os sensores são ainda caracterizados de acordo com a sua direccionalidade (ou resposta polar), a sua resposta ao modo de onda e à temperatura de operação.

Os critérios de seleção do sensor e da frequência de operação, segundo a EN 13554:2011, dependem dos seguintes parâmetros:

- Objetivo do ensaio;
- Requisitos da norma de referência ou especificação;
- Tipo ou formato da estrutura ou componente;
- Temperatura de operação da superfície da estrutura ou componente (isolamento, pintura, revestimento, corrosão superficial, etc);
- Ambiente;
- Propriedades do material;
- Ruído de fundo;
- Atenuação;
- Espessura do material.

Para o correto funcionamento do teste de EA, os sensores devem ser fixos ao objeto utilizando um acoplante acústico, um dispositivo de aperto ou uma fita adesiva. A dimensão, a forma e a montagem do sensor, afetam diretamente a sensibilidade, direccionalidade, resposta em frequência e resposta ao modo de onda (NP EN 13477-1:2008).

Os sensores devem ser verificados com recurso a uma fonte Hsu-Nielson (ver 2.3.3) e/ou por outro método adequado (EN 13554:2011).

2.3.2.2 *Meio de acoplamento*

A remoção do ar, na interface da superfície do espécime e do sensor é crucial para a correta receção das EA visto que, a impedância acústica do ar tem uma magnitude cinco vezes menor à superfície de contacto. A correta escolha e colocação do acoplante é, deste modo essencial na realização do ensaio de EA. A eficiência do acoplante pode variar em função da impedância acústica, absorção acústica, espessura aplicada e viscosidade (Theobald, Zeqiri, & Avison, 2008).

Entre os diversos tipos de acoplantes, a norma EN 1354:2011 propõe os seguintes:

- Massa solúvel em água;
- Massa solúvel em reagente;
- Óleo;

- Gordura;
- Cera;
- Fita adesiva.

2.3.2.3 *Sistema de condicionamento de sinal*

Este sistema é composto pela transmissão do sinal, amplificação, filtração e extração das características do sinal de EA (Figura 24).

Pré-amplificador

O sinal, após ser detetado pelo sensor, é submetido a uma pré-amplificação em tensão ou em carga. Quando em tensão, a pré-amplificação converte a saída do sensor, normalmente um sinal de baixo nível com alta impedância, para um sinal de alto nível com baixa impedância para a transmissão em cabos longos. Um pré amplificador típico tem uma alta impedância de entrada, 40 dB de ganho e 50 Ω de impedância de saída para alimentar um cabo coaxial (NP EN 13477-1:2008).

No caso de ser em carga, o efeito da capacitância do cabo no sinal é eliminado. Esta pré-amplificação é menos utilizada.

Para minimizar interferências, o pré-amplificador (de baixo ruído) pode ser integrado no sensor (NDT Resource Center, 2018). Desta forma, é conferida robustez, fiabilidade e redução da perda do sinal. Como consequência o invólucro do sensor apresenta maiores dimensões, a temperatura máxima de funcionamento diminui e o pré-amplificador perde a intermutabilidade (NP EN 13477-1:2008).

Cabos

Entre os cabos que envolvem o sistema destaca-se o cabo sensor ao pré-amplificador, que deverá ter uma baixa capacitância (< 100 pF/m), ser completamente blindado e ser o mais curto possível e o cabo de instrumentação ao pré-amplificador, do tipo coaxial com 50 Ω de impedância.

Pós-amplificador

Segue-se o pós-amplificador que promove a amplificação resultante do sinal (até 60 dB, conforme EN 13554:2011). Ambos amplificadores contêm filtros para supressão do ruído.

Após o sistema principal do teste de EA, o sinal é conduzido por um sistema de medição, no qual é sujeito a um *threshold*, ou limite de detecção, que tal como o nome indica, limita a emissão de impulsos com tensão superior a um valor definido pelo utilizador. Todos os impulsos não limitados pelo *threshold* emitidos no tempo de ensaio são armazenados e devidamente analisados.

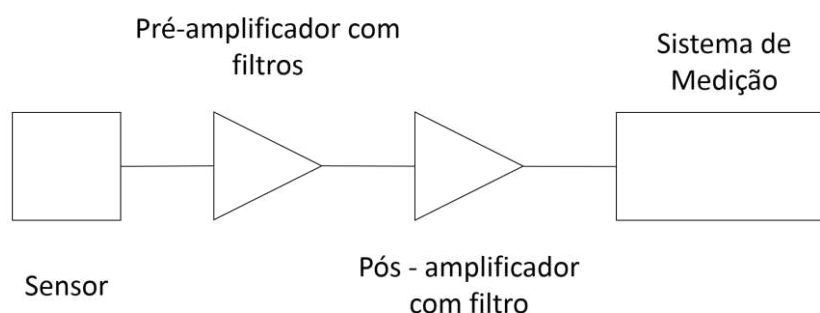


Figura 24 – Diagrama simplificado de sistema de condicionamento de sinal – Adap. de NDT Resource Center, 2018

2.3.3 Verificação/ Calibração do equipamento

Segundo as normas aplicáveis, é recomendável executar a verificação das características de medição, quando é adquirido ou sempre que sejam realizadas modificações ou reparações do equipamento, seja na suspeita de mau funcionamento ou quando este é utilizado em condições extraordinárias. Para este efeito a norma EN 13477-2:2010 define os métodos de verificação do desempenho do equipamento de EA, utilizando um ou mais canais.

Um conceito a salientar na verificação do equipamento de EA é a fonte de Hsu-Nielson. Esta fonte consiste numa mina de lapiseira, que ao ser quebrada permite simular um evento de emissão acústica (EN 1330-9:2000). A mina deve ser do tipo 2H e ser quebrada com aproximadamente 3 mm de comprimento e diâmetro de 0,5 mm a um ângulo de 30° da superfície (Teodorczyk, 2017).

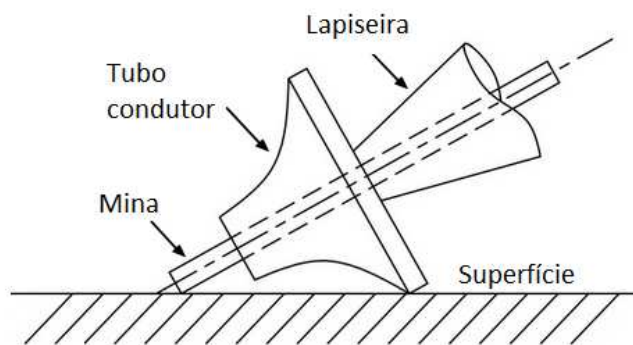


Figura 25 - Fonte Hsu-Nielson – Adap. de Teodorczyk, 2017

A calibração do equipamento de EA compõem os seguintes processos:

- Verificação do sensor;
- Verificação do pré-amplificador;
- Verificação do condicionamento de sinal e do sistema de medição;

2.3.3.1 Verificação do sensor

Os sensores de EA (ponto 2.3.2.1) quando a sua utilização, são sujeitos à diminuição da sua sensibilidade resultante de exposições a elevadas temperaturas, ambientes corrosivos, choques mecânicos ou danos nos conectores.

Após uma verificação visual do estado físico do sensor, é verificada sua sensibilidade. Este teste consiste em acoplar o sensor num bloco de calibração (por exemplo um cilindro de acrílico) e, utilizando a fonte Hsu-Nielson, quebrar no mínimo 3 vezes a mina numa posição predefinida do bloco de calibração (Figura 26). O sensor que se encontra conectado ao equipamento de EA, deve captar o sinal com diferenças não superiores a 3 dB de amplitude.



Figura 26 - Bloco de calibração acrílico

2.3.3.2 *Verificação do pré-amplificador;*

Os pré-amplificadores comumente utilizados nos equipamentos de EA são pré-amplificadores de tensão ou de amplitude. Sendo que os de amplitude são, na maioria, incorporados nos sensores, esta verificação apenas se aplica ao pré-amplificadores de tensão.

Nestes instrumentos é verificado o seu consumo da corrente e as suas características, entre as quais o ganho, a gama de frequências e o ruído eletrônico.

2.3.3.3 *Verificação do condicionamento de sinal e do sistema de medição;*

A verificação deste sistema, consiste na comparação dos parâmetros de EA medidos pelo sistema, com os parâmetros de um sinal emitido por um gerador de sinais, devidamente calibrado (Figura 27). Neste processo é avaliada a medição da amplitude de pico, da duração, do tempo de subida, do número de cortes, da energia e do sinal contínuo.

A norma aplicável recomenda, nesta verificação, ser utilizado um *DC-blocker*, isto é um componente coaxial essencial para impedir o fluxo de corrente contínua gerado pela fonte de energia (EN 13477-2:2010).

Antes de verificada a medição dos parâmetros de EA deve-se proceder à verificação da largura de banda, do ruído existente e da capacidade de deteção do *threshold*.

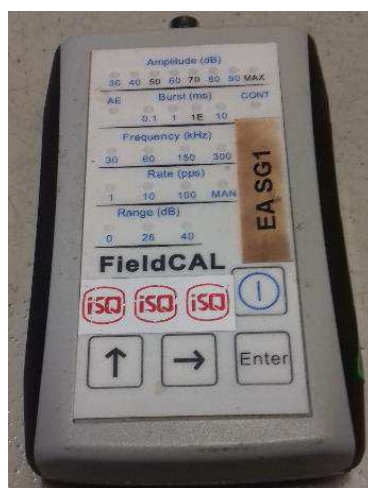


Figura 27 - Gerador de Sinais

2.3.4 Medição do sinal de EA

Visto que o sinal de emissão acústica pode ser caracterizado em dois tipos diferentes, contínuo e de impulso (Figura 22), o processo de medição do sinal é igualmente diferente.

O sinal contínuo é caracterizado pela medição da média da raiz quadrada (RMS) ou média do nível de sinal (ASL) com uma constante de tempo particular (NP EN 13477-1:2008). Os sistemas de medição de sinal contínuo são utilizados quando não é necessário identificar emissões individuais.

Caso a intenção seja identificar e caracterizar emissões acústicas individuais ao longo do tempo, recorre-se a sistemas de medição de sinal de impulso.

Os parâmetros de estudo convencionais utilizados para interpretar o sinal de impulso (Figura 28) são o número de contagens e de acontecimentos, o tempo de subida, a duração, a amplitude e a energia libertada.

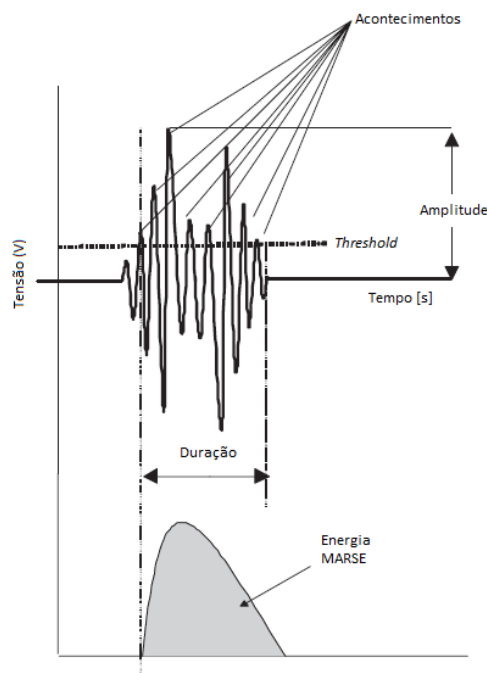


Figura 28 - Parâmetros de definição do sinal – Adap. de Drummond et al., 2007

O parâmetro mais simples no estudo do sinal de EA é o nº de acontecimentos (ou *Acontecimentos*) que é definido pelo número de vezes que um impulso ultrapassa o valor de *threshold* definido. Por outro lado, o nº de contagens (*Counts*) engloba todos os acontecimentos e todos os outros inferiores ao *threshold*.

O tempo de subida (ou *Rise Time*) corresponde ao tempo desde que é contabilizado o primeiro acontecimento até ser atingida a amplitude de pico. A duração (ou *Duration*) define o tempo entre o primeiro e o último acontecimento superior ao *threshold* (Shiotani, 2008).

A amplitude (em decibéis, dB) é o parâmetro mais significativo no estudo da EA. Pode ser calculada com recurso à fórmula (1) na qual, V_p corresponde à tensão máxima obtida pelo transdutor e V_{ref} é a tensão de referência (Drummond, Watson, & Acarnley, 2007).

$$A = 20 \log \frac{V_p}{V_{ref}} \quad (1)$$

A energia MARSE (*Energy*), define-se pela área medida abaixo dos sinais de tensão linear retificado provenientes do transdutor, sensível à amplitude do sinal e à duração, mas independentemente do *threshold* pré-definido ou do número de acontecimentos (NDT Resource Center, 2018).

A reflexão autêntica da energia provocada pela EA é representada pela Energia Absoluta (*Absolute Energy*) que pode ser calculada através da fórmula abaixo, onde V_i representa a tensão no instante i , ΔT o intervalo de tempo em análise, m representa a duração e R representa a impedância de entrada do circuito de medida (Dong, Xiangdong, & Libin, 2014).

$$E_{abs} = \frac{\Delta T}{R} \cdot \sum_{t=0}^m V_i^2 \quad (2)$$

2.3.5 Fontes de EA

Conforme iniciado acima, a EA surge quando é aplicada uma carga. A intensidade da carga aplicada e as propriedades do material são determinantes para a deteção de EA no material, desta forma, a aproximação da carga aplicada à tensão de cedência do material permite detetar EA com amplitudes mais elevadas. Verifica-se então que existe uma relação entre a energia libertada e a amplitude da onda com a intensidade da carga.

2.3.5.1 Efeito de Kaiser e de Felicity

Quando a aplicação da carga é realizada de uma forma fracionada, as discontinuidades criadas não se propagam sem exceder a carga anteriormente aplicada. Este fenómeno, denominado de efeito Kaiser, pode ser verificado no gráfico de eventos de EA acumulados

em função da carga aplicada apresentado na Figura 29 (Scott, 1991). Ao ser aplicada uma carga (troço AB) é emitida EA de forma constante. Quando o esforço é removido e aplicado novamente (troço BCB), só se verifica EA quando se ultrapassa a intensidade indicada em B.

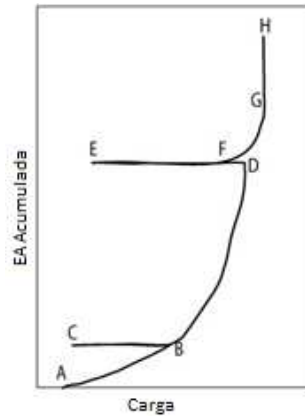


Figura 29 - Efeito de Kaiser – Adap. de Scott, 1991.

Contrariamente ao que acontece anteriormente, quando se retira e se aplica novamente a carga (DEF), começam-se a verificar emissões antes de alcançar a carga em D. Este novo acontecimento surge pelo facto de existir uma carga muito elevada quando se alcança o ponto F. Verifica-se a presença do Efeito Felicity. Este efeito pode ser quantificado com a razão de Felicity que se obtém dividindo a carga na qual as emissões retornam pela carga máxima aplicada (F/D).

Estes dois efeitos são essenciais na determinação de elevados defeitos estruturais.

2.3.5.2 Ruído

Uma das fontes de EA que afeta negativamente os ensaios é o ruído causado pelos fatores existentes no ambiente circundante. Exemplos destes fatores, poderão ser equipamentos que provoquem e transmitam vibrações mecânicas nas áreas a ser testadas, como bombas bem como elementos atmosféricos como a chuva ou o vento.

Para compensar o efeito destas fontes podem ser implementados diversos métodos incluindo a utilização de sensores com barreiras para redução de ruído, colocar os sensores o mais afastado possível destas fontes ou utilizar filtros eletrónicos.

2.3.6 Ondas acústicas

As ondas acústicas são emitidas numa vasta gama de frequências, no entanto, o teste de EA realizado nos END é geralmente realizado com recurso a sensores que abrangem apenas uma reduzida gama de frequências.

O sinal captado pelos sensores é uma combinação de várias partes da onda emitida pela fonte visto que a onda é propagada de forma esférica e constantemente refletida nos limites do objeto em estudo. A intensidade do sinal é, em função da distância, consideravelmente inferior à intensidade verificada na fonte. Verifica-se então o efeito da atenuação.

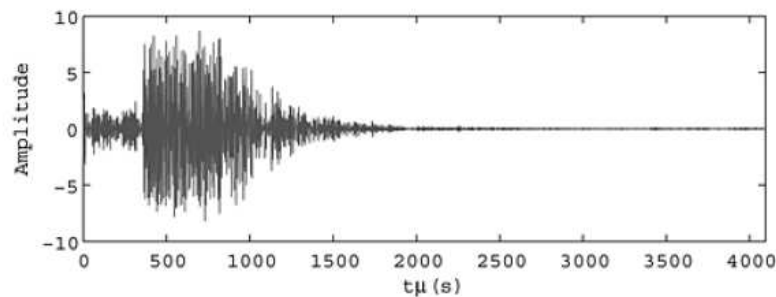


Figura 30 - Efeito da atenuação (Jacques, Flores, Strohaecker, & Reguly, 2009)

A atenuação do sinal ocorre devido a três fenómenos principais entre os quais a propagação geométrica do sinal, chegando a diminuir em 50% a amplitude de sinal em comparação com o estado original. A atenuação também pode surgir devido ao amortecimento do material, visto que a energia cinética criada pela transmissão de EA no material é convertida em calor que é em parte dissipado. Por fim, pode existir atenuação devido à dispersão das ondas no material como consequência das consecutivas reflexões do sinal quando alcançam o limite da peça ou descontinuidades existentes (NDT Resource Center, 2018).

A medição dos efeitos da atenuação pode ser executada com recurso à fonte de Hsu-Nielson (ver 2.3.3).

2.3.7 Localização de Defeitos

A localização de possíveis defeitos é um dos principais objetivos do teste de EA. A maioria dos sistemas de EA permite a utilização de vários canais em simultâneo, deste

modo, conhecendo a velocidade de propagação da onda no material e a diferença entre o tempo de chegada a cada sensor facilmente se obtém a localização da fonte de EA.

O comportamento da onda varia, no entanto com vários fatores, entre os quais a geometria do objeto de teste, desta forma surgem variadas técnicas. Entre estas podem salientar-se as técnicas de localização linear, zonal e pontual.

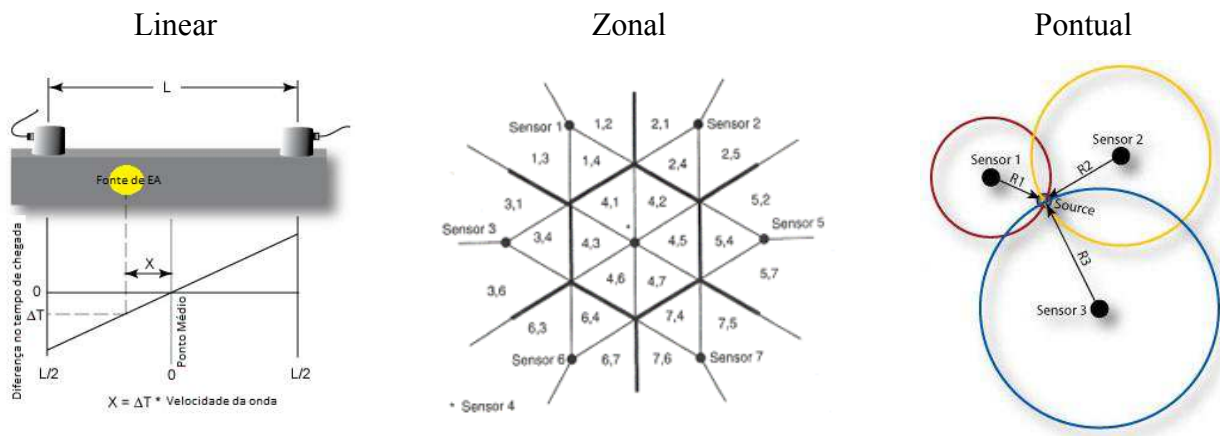


Figura 31 - Técnicas de localização - Adap. de NDT Resource Center, 2018

2.3.7.1 Técnica de localização linear

Uma das técnicas mais comuns é a localização linear de acordo com o princípio indicado na Figura 31. Nesta técnica são utilizados dois sensores com uma distância L entre si. Caso a fonte de EA se localize a igual distância entre os sensores, a diferença entre o tempo de chegada do sinal (Δt) a cada um dos sensores é nula. Caso contrário deve ser calculada a distância da fonte ao ponto médio (X), através da multiplicação entre Δt e a velocidade da onda (v_{onda}).

$$X = \Delta t \cdot v_{onda} \quad (3)$$

A aplicação desta técnica implica, no entanto que a fonte é colinear com os dois sensores, o que caso não aconteça se deverá recorrer a uma localização zonal ou pontual.

2.3.7.2 Técnica de localização zonal

Tal como o nome indica, esta técnica permite determinar ondas em zonas ou regiões em torno do sensor. Esta é utilizada em materiais anisotrópicos, em estruturas nas quais os sensores estão muito afastados ou quando o material promove atenuação elevada do sinal (Figura 31).

2.3.7.3 *Técnica de localização pontual*

A técnica de localização pontual é utilizada com recurso a um número mínimo de sensores, isto é, dois sensores para linear, três para planar e quatro para volumétrica. Ao considerar que a distância da fonte de EA a cada um dos sensores como o raio, a intersecção entre estes é a localização exata da fonte.

Esta técnica requer que os tempos de chegada sejam precisos e que seja conhecida a velocidade de propagação da onda e a localização do sensor.

2.3.8 **Vantagens e Desvantagens do ensaio**

De acordo com a norma EN 13554:2011 o ensaio de EA apresenta as seguintes vantagens e características:

- “É um método de deteção passivo que monitoriza a resposta dinâmica de um material a um esforço aplicado ou ao ambiente circundante;
- Permite a deteção de fontes, consoante as propriedades do material, a longas distâncias;
- Permite a monitorização da totalidade do objeto de teste;
- É mais sensível ao crescimento do defeito e alterações de estrutura do que à presença de defeitos estáticos;
- Não é invasivo;
- Oferece uma monitorização dinâmica e em tempo real de cada descontinuidade que cresça com aplicação de tensões;
- Pode ser aplicado na monitorização de estruturas durante condições de operação;
- Pode ser usado para prevenir falhas catastróficas das estruturas e controlar os efeitos da aplicação de carga;
- Com a utilização suficiente número de sensores, é capaz de localizar nas estruturas descontinuidades em crescimento;
- Dependendo da aplicação, a gama de frequências utilizada varia entre 20 kHz a 2MHz.

Este método tem, porém, limitações entre as quais se destacam:

- O não crescimento das descontinuidades impossibilita a produção de EA;

- A aplicação de esforços após ser alcançado o nível de tensão máxima irá apenas apresentar descontinuidades que ainda continuam ativas;
- É sensível a ruído interno ou exterior ao objeto de teste.”

Estas são, no entanto, limitações que poderão ser minimizadas se forem tidas em atenção antes de serem realizados os ensaios.

2.3.9 Aplicações

O ensaio de emissão acústica, pelas diversas vantagens que apresenta é muito versátil e sendo por isso aplicado em diversas áreas distintas. Entre as aplicações evidenciam-se a inspeção e monitorização de tubagens, equipamentos sob pressão, pontes, guindastes e uma variedade de componentes compósitos e cerâmicos (NDT Resource Center, 2018).

O ensaio pode ainda ser aplicado na monitorização de processos de soldadura, nomeadamente no crescimento de microfissuras. A ASTM E 749-96 define procedimentos para aplicação deste ensaio em processos de soldadura.

Segundo a legislação portuguesa, o ensaio de EA encontra-se referenciado como complemento a inspeções de equipamentos sob pressão segundo o Decreto-Lei nº 90/2010 e de equipamentos de transporte de matérias perigosas de acordo com o Decreto-Lei nº 111-A/2017. Na Figura 32 é apresentado um exemplo desta aplicação (FPrimeC Solutions, 2017).

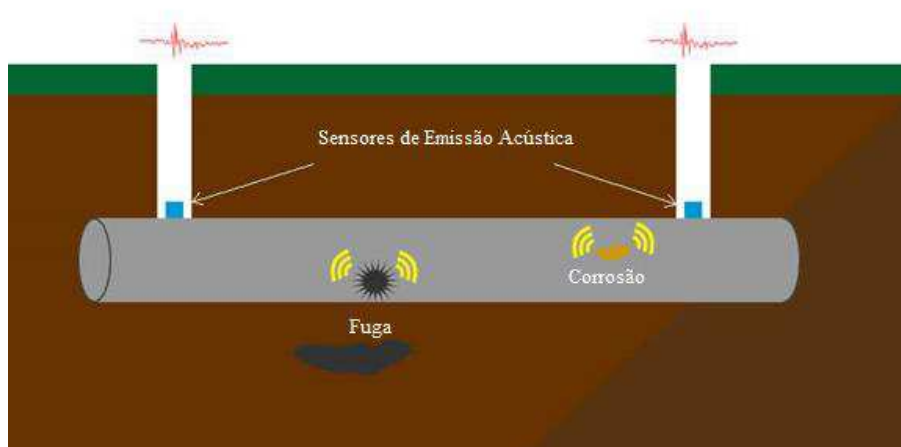


Figura 32 - Ensaio de emissão acústica aplicado a reservatório enterrado – Adap.de FPrimeC Solutions

2.4 ENSAIO DE EMISSÃO ACÚSTICA APLICADO A CABOS DE AÇO

O primeiro estudo da aplicabilidade do ensaio de emissão acústica aos cabos de aço foi conduzido por Laura *et al.* no ano 1969. Neste estudo foram utilizados acelerómetros acoplados a cabos de 10 mm de diâmetro de vários tipos e comprimentos, aplicando 95% da força máxima suportada pelos mesmos. O estudo demonstrou, que as quebras dos arames detetadas antes da rutura do cabo apresentam amplitudes 15 a 20 dB superiores ao ruído ambiente (Laura, Vanderveldt, & Gaffney, 1969).

Como seguimento deste primeiro estudo, Harris conduziu ensaios experimentais em cabos de aço presentes em pontes suspensas (Harris, 1972). Dois anos depois, em conjunto com Dunegan e com recurso a equipamentos mais sensíveis e sofisticados, foram estudadas as EA através da realização de ensaios de tração e de fadiga (Harris & Dunegan, 1974). Estes ensaios permitiram concluir aos autores que:

- As técnicas de emissão acústica podem ser aplicadas para a deteção do número de arames que se rompem para um certo valor de tensão;
- Cabos com fissuras podem ser identificados pelo ensaio de emissão acústica.

No ano de 1978, Fritz *et al.* produziram um protótipo de um sistema da deteção de EA utilizando parâmetros como o tipo de cabo a testar, o comprimento do cabo, o acoplamento final, o tipo de construção e o diâmetro do cabo (Fritz, 1978). Um ano depois, Babel resume os requisitos essenciais de qualquer equipamento de emissão acústica (Babel, 1979). Desta forma o equipamento deve:

- Ser leve e fácil de manusear;
- Permitir a execução do ensaio sem grandes interrupções;
- Garantir que o cabo não é danificado;
- Deve permitir a execução de ajustes de acordo com o tipo de cabo utilizado.

Nos anos de 1984 e 1987, como resultado de trabalho realizado na Universidade de Cardiff, Reino Unido, são publicadas as teses de doutoramento de Holford e Casey que, entre as diversas conclusões, afirmam que o sinal perto da fonte apresenta um tipo de onda predominantemente longitudinal e transversal, no entanto longe da fonte, esta tende a converter-se para onda superficial (Casey, 1984), que o transdutor utilizado na técnica de EA não necessita de ter contacto direto com o cabo para captar o sinal e ainda que a técnica

de localização linear é um método preciso para determinar o ponto exato em que ocorreu a rutura de arames (Holford, 1987).

Em 1996, Casey e Laura desenvolveram um trabalho de revisão sobre todo o estudo realizado até a data, relativo ao ensaio da emissão acústica aplicado aos cabos de aço (Casey & Laura, 1997). Desta forma reúnem as publicações de cerca de 30 anos de investigação referenciando 28 artigos publicados de mais de 22 investigadores distintos, entre os quais Casey e Laura se incluíam. Esta revisão bibliográfica teve uma importância significativa como uma descrição atenta do estado da arte do tema. Neste artigo, os autores apresentam as seguintes conclusões:

- A aplicação mais fiável da tecnologia EA aos cabos de aço é na deteção e localização das ruturas dos arames ao longo do cabo;
- Esta deteção e localização deve ser parametrizada de acordo com o tipo de construção do cabo, o diâmetro, o comprimento e o nº de arames fissurados;
- A rutura sucessiva de um número elevado de arames é prejudicial para a aplicação da técnica, no entanto, o número tem tendência a ser elevado apenas em ensaio de fadiga;
- Apesar da técnica ser bastante útil quando ensaiada em laboratório verifica-se, que em serviço esta pode ter qualidades limitadas;
- Trabalhos futuros implicam, o desenvolvimento de equipamento e *software* baseado no reconhecimento de padrões e filtros de ruído mais eficientes. (Casey & Laura, 1997)

No término do antigo milénio, o estudo do comportamento acústico dos cabos de aço foi introduzido na China em primeiro lugar por Shao Yongbo e a sua equipa em 1998, incidindo a sua pesquisa na fratura de cabos de aço, dano por fadiga, eliminação de ruído e reconhecimento de padrões (Shao, Yu, & Wang., 1998).

No ano 2007, Drummond, Watson e Acarnley em Aberdeen, no Reino Unido, publicaram um artigo a descrever uma investigação experimental, com o objetivo de aprimorar o ensaio de fadiga e de tração de cabos de aço incorporando os parâmetros obtidos pelos sensores de EA (Drummond et al., 2007). Nesta investigação, Drummond *et al.* afirmam que os parâmetros mais determinantes da rotura de arames são a energia absoluta e da amplitude. Segundo os gráficos da Figura 33, a afirmação é confirmada nos instantes 1250 s e 1600 s, nos quais a amplitude e a energia absoluta é substancialmente

superior ao restante período. Em cada um destes instantes verificou-se a quebra de um arame.

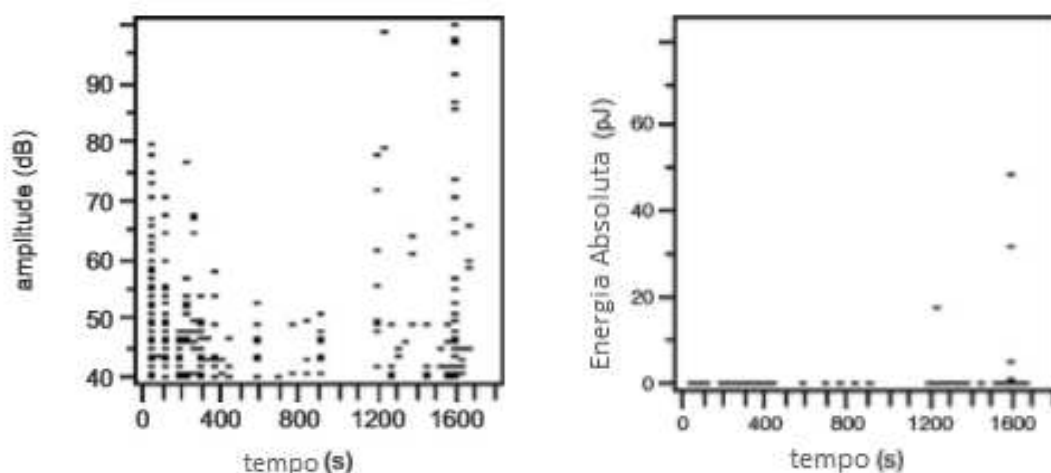


Figura 33 – Representações gráficas de amplitude e de energia absoluta- Adap. de Drummond et al, 2007

Em 2009, na sequência de uma conferência de END em Nantes - França, foram apresentados dois artigos centrados na aplicação do ensaio de EA em cabos de aço de pontes suspensas. No primeiro foi realizado um estudo do comportamento da rutura de arames de um cabo sob tensão quando sujeito a uma vibração transversal (Gaillet et al., 2009). No segundo foi apresentado um dispositivo inovador para realizar leituras contínuas de AE em pontes suspensas (Le Cam, Gaillet, Perrin, Tessier, & Cottineau, 2009). Este equipamento, com recurso à tecnologia wireless e GPS, permite a monitorização contínua de cabos de aço no local onde se encontram inseridos. Reduz-se, desta forma, a substituição precoce de cabos que se encontrem em tempo de vida útil.

No mercado atual, é possível encontrar um sucessor deste equipamento denominado como DaisAE (Figura 34). Este equipamento permite utilizar o sistema wireless, no entanto, para instalações permanentes é recomendado um sistema de cabos Ethernet.



Figura 34 - DaisAE - Equipamento de monitorização para cabos de pontes suspensas (MISTRAS Group, 2015a)

No ano indicado foi também publicado, no Brasil, o trabalho de Jacques *et al.* relativo à aplicação deste ensaio a cabos de aço submersos (Jacques et al., 2009). Neste estudo foram comparados os dois tipos de transdutores existentes, de ressonância e de banda. Conclui-se que os transdutores de ressonância são mais indicados para a análise baseada em acontecimentos, enquanto que os transdutores de banda são mais eficientes análises baseadas em frequências.

No ano de 2012, investigadores de 3 universidade da Republica Popular da China, apresentaram um artigo sobre o efeito da corrosão de cabos de aço (Li, Ou, Lan, & Li, 2012). Neste estudo procedeu-se à análise do comportamento dos cabos quando sujeitos a testes de fadiga. Entre as conclusões obtidas, é afirmado que a tensão de cedência, a tensão de rutura e a taxa de alongamento são altamente sensíveis à presença de corrosão no cabo de aço, ao contrário do módulo de elasticidade que se mantém constante.

De acordo com Lembersky *et al.* o ensaio de emissão acústica tem uma probabilidade superior a 90% de detetar a rotura de um arame, tornando este, um ensaio economicamente mais vantajoso (Lembersky, Adams, Tamutus, & Watson, 2012).

Em 2013 na Universidade de Xi'an, China, realizou-se um estudo comparativo das emissões acústica em cabos com alma IWRC e FC (Wenjie, Mengyu, Lichan, Yongquan, & Quan, 2013). Para executar este estudo, os cabos foram submetidos a um ensaio de tração. Através de diversos gráficos obtidos pelo sistema de EA, concluíram que a Amplitude (dB) a Energia Absoluta (mV.s) são os parâmetros mais descritivos para a deteção do sinal de EA. Para uma análise mais específica do sinal, é recomendada a utilização de espectros e representações da onda que esta forma. A Figura 35 ilustra a instalação utilizada para o referido ensaio.



Figura 35 –Ensaio de tração dos cabos (Wenjie et al., 2013)

A publicação mais recente sobre este tema é referente a 2017 e foi realizada por Schlanbusch, Oland e Bechhoefer. Neste artigo foi publicada uma revisão dos diversos métodos existentes no mercado utilizados para a monitorização de cabos de aço de guindastes (ponto 2.2). Neste trabalho é concluído que, no mercado atual, nenhuma das tecnologias é, por si só, suficientemente eficaz para a total monitorização destes equipamentos, sendo desta forma, inevitável a combinação de diferentes técnicas (Schlanbusch et al., 2017).

Página intencionalmente deixada em branco.

3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 OBJETIVO

Na componente experimental deste trabalho final de mestrado foram realizados dois tipos de ensaios aplicando o teste de EA a cabos de aço.

No primeiro ensaio, o cabo de aço foi submetido a um conjunto de testes com aplicação gradual de uma força de tração. A carga foi aplicada através de uma máquina de tração disponibilizada pelo Laboratório de Ensaio Mecânicos do ISQ.

No segundo ensaio foi testada a capacidade de localização de defeitos no cabo, utilizando a técnica de localização linear (ver 2.3.7.1).

Em conformidade com os objetivos apresentados na introdução do presente trabalho (ver 1.2), estes ensaios foram executados com os seguintes objetivos específicos:

- Comprovar a ocorrência do efeito de Kaiser neste tipo de ensaio;
- Comparar o comportamento acústico da fonte Hsu-Nielson com roturas de arames;
- Analisar o desenvolvimento da energia e da amplitude nas diferentes fases do ensaio de EA.
- Estudar a capacidade de detecção da localização no cabo de aço;

3.2 EQUIPAMENTO DE ENSAIO

3.2.1 Cabos de Aço

Os cabos de aço utilizados nestes ensaios são aplicados em diferentes modelos de elevadores. Estes apresentam a configuração do tipo 8x19S – IWRC (ver 2.1.3.1), ou seja, cada cabo é composto por 8 cordões em que cada um contém 19 arames, do tipo *Seale* e pela alma de cabo de aço independente (Figura 36). O cabo tem um diâmetro de 7 mm.

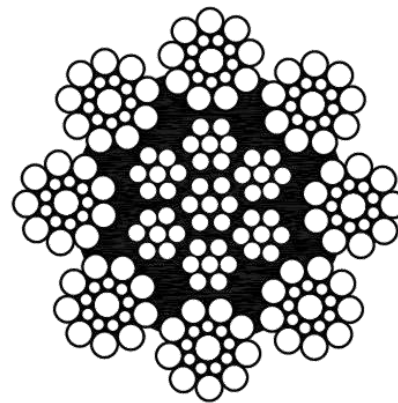


Figura 36 – Secção do cabo e representação desta (ISO 4309:2010)

Segundo a tabela D.8 da norma ISO 2408:2017 para um diâmetro nominal de 7 mm e para a classe 1570 a força de rutura mínima é de 27,4 kN.

3.2.2 Equipamento de Emissão Acústica

O equipamento de EA é uma cadeia de processamento de sinal constituído por:

- Sistema de aquisição e processamento de sinal;
- *Software* de processamento de dados;
- Sensores;
- Fixação dos sensores;
- Meio de acoplamento.

3.2.2.1 *Sistema de aquisição e processamento de sinal*

O equipamento de emissão acústica utilizado nos ensaios é composto principalmente por uma placa de captação de sinais (PCI), inserida no chassis de um computador, essencial para o processamento de elementos acústicos e ondas de sinal. O conjunto do computador com a PCI fornecido pelo Grupo MISTRAS denomina-se SAMOS (MISTRAS Group, 2009).

No ensaio foi utilizada a placa PCI-8 composta por 8 canais diferenciados capaz de ser instalada em diversos tipos de computadores (Figura 37).



Figura 37 - Placa de captação de sinais PCI-8 (MISTRAS Group, 2009)

3.2.2.2 *Software de processamento de dados*

O sistema SAMOS foi operado com recurso ao *software* AEWin, fornecido pela Physical Acoustics Corporation (MISTRAS Group, 2014).

Este *software* destaca-se como essencial na visualização das EA em tempo real admitindo a disposição de diversos gráficos (*layout*) que descrevem o comportamento acústico do equipamento a testar (MISTRAS Group, 2014).

O *layout* usado no ensaio, pode ser guardado sob forma de ficheiro e conserva toda a parametrização do processamento de dados e o modo de visualização utilizados nos diferentes testes efetuados (ver 3.3).

3.2.2.3 *Sensores*

No ensaio experimental foram utilizados sensores R151-AST fabricado pela *Physical Acoustics Group* (Figura 38). Este sensor caracteriza-se por operar numa gama de frequências de 50 a 400 kHz, incorporar um pré-amplificador de 40 dB, um filtro inicial e ainda a tecnologia *Auto Sensor Test – AST*, que permite ao sistema de EA controlar o acoplamento do sensor bem como o seu próprio funcionamento ao longo do ensaio (MISTRAS Group, 2015b).



Figura 38- Sensor utilizado no ensaio experimental

3.2.2.4 *Fixação dos sensores*

De modo a garantir a fixação dos sensores ao cabo de aço, no 1º ensaio o sensor foi apoiado a um suporte metálico utilizando um acoplante acústico e fita adesiva.

No 2º ensaio foram utilizados grampos metálicos para a fixação dos sensores à mesa e não foi utilizado acoplante acústico para a sua realização.

3.2.2.5 *Meio de acoplamento*

Empregando as disposições indicadas no ponto 2.3.2.2, no 1º ensaio foi utilizada massa de lítio como meio de acoplamento.

3.2.3 Outros equipamentos/acessórios necessários

Para aplicação da carga recorreu-se a máquina de tração Instron 8504 (Figura 39) existente no Laboratório de ensaios mecânicos do ISQ. A máquina de tração utilizada tem uma gama de carregamento de 5 a 500 kN e é auxiliada pelo *software* Wavematrix da Instron para verificação e análise em simultâneo de variáveis como a carga e o deslocamento das amarras.



Figura 39 – Máquina de tração

Em conjunto com os dispositivos mencionados, recorreu-se a uma variedade de outros acessórios essenciais para a realização do desenvolvimento experimental. Entre este realçam-se os seguintes:

- Manilha;
- Serra-cabos com diâmetro de 8 cm;
- Alicates;
- Suporte para o sensor de EA;
- Esponjas para eventual queda do sensor;
- Fita métrica;
- Suporte de madeira;
- Grampos metálicos.

3.3 LAYOUT UTILIZADO

Para os ensaios efetuados, no *software* AEWin (MISTRAS Group, 2014) , foi criado um *layout* composto por diversos gráficos representando diferentes parâmetros de estudo na EA. No estudo da EA os gráficos são categorizados em tendências e correlações.

Os gráficos de tendências representam o comportamento de um parâmetro em função do tempo (s). Os gráficos de correlações, em conformidade com a sua denominação, fazem a correlação entre dois parâmetros característicos do sinal.

Nos ensaios foram extraídos e representadas as seguintes tendências e correlações:

Tendências

- Amplitude (dB) vs Tempo (s)
- Energia vs Tempo (s)
- Força (kN) vs Tempo (s)

Correlações

- Amplitude (dB) vs Tempo de subida (μ s)
- Amplitude (dB) vs Duração (μ s)
- Acontecimentos vs Amplitude (dB)
- Acontecimentos vs Energia
- Energia vs Amplitude (dB)
- Acontecimentos vs Posição

No layout foi definido um *threshold* de 40 dB visto que os acontecimentos com amplitudes abaixo deste valor não são considerados relevantes para os ensaios efectuados (Miller & Mc Intire, 1987) .

3.4 PROCEDIMENTO

3.4.1 Testes efetuados com a máquina de tração

3.4.1.1 *Provetes*

Os provetes utilizados no primeiro ensaio foram realizados através de troços de 1 m de cabo com a configuração indicada no ponto 3.2.1.

Para o 1º provete (Figura 40) do ensaio foram utilizados 3 serra-cabos em cada terminal e criada uma argola de 50 mm de diâmetro de forma a ser possível unir a manilha ao cabo. Neste provete os últimos serra-cabos foram distanciados a 300 mm (Figura 41)



Figura 40 – 1º Provede utilizado no 1º ao 7º teste efectuado com a máquina de tração

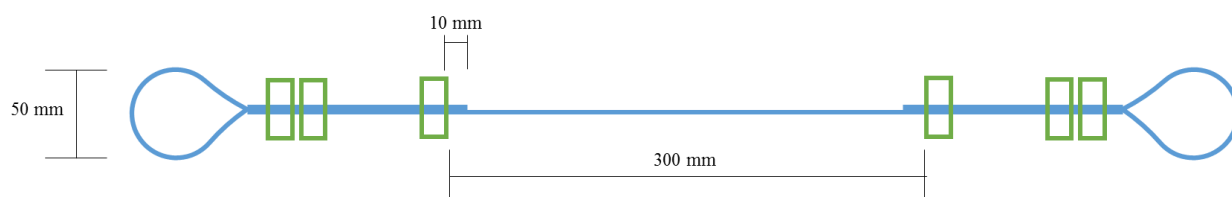


Figura 41 – Dimensões do 1º provede

Na sequência do sucedido no 7º teste (ver 3.5.1.9) verificou-se a necessidade de criar um novo provede (Figura 42). Tendo em conta o escorregamento dos serra-cabos, ao 2º provede foi adicionado mais um serra-cabos em cada terminal com maior afastamento da ponta do cabo (50 mm).

Devido a esta nova configuração, a zona entre os últimos serra-cabos foi reduzida para 200 mm (Figura 43).



Figura 42 – 2º Provete utilizado no 8º teste efectuado com a máquina de tracção

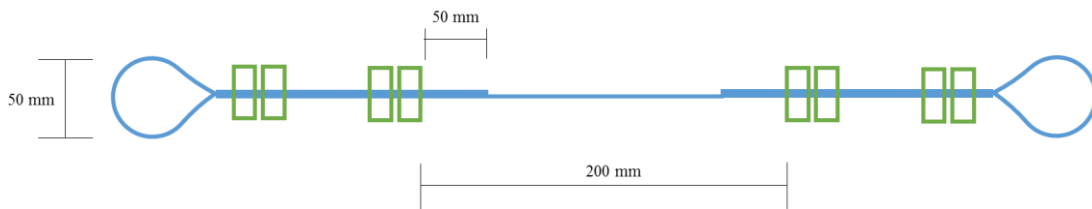


Figura 43 – Dimensões do 2º Provete

3.4.1.2 Montagem

Neste primeiro ensaio, foi introduzida a manilha ao provete e fixada aos mordentes da máquina de tração. Posteriormente foi introduzido o sensor e o seu suporte, conforme indicado no 3.2.2.4, na zona inferior do provete. Como prevenção de eventuais quedas do sensor foram colocadas duas esponjas na proximidade do sensor (Figura 47).

Na Figura 44 encontra-se representado o esquema de montagem.

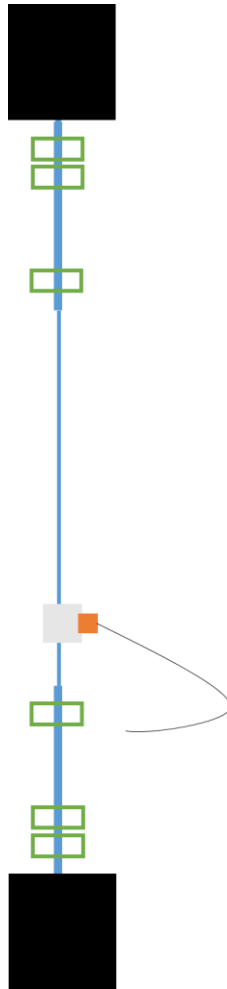


Figura 44 – Esquema de montagem do 1º ensaio

3.4.1.3 *Avaliação da sensibilidade inicial*

Conforme indicação da norma EN 13554:2011, como ponto inicial do ensaio de EA deve ser avaliada a sensibilidade (inicial) do sensor. Para tal foi quebrada uma mina (fonte Hsu-Nielson), no suporte do sensor, cinco vezes e registadas as amplitudes máximas obtidas.

3.4.1.4 *Verificação da atenuação*

De seguida, para verificar a atenuação do sensor ao longo do cabo de aço, recorreu-se à fonte Hsu-Nielson em pontos distanciados de 5 cm entre si até alcançar o limite de aquisição (LA).

Para o ensaio realizado foi definido um LA de 55 dBA, ou seja, os valores detetados pelo sistema de aquisição entre 40 e 55 dBA serão considerados irrelevantes para posterior análise.

3.4.1.5 Testes efetuados

Em concordância com o descrito nos objetivos do desenvolvimento experimental (ver 3.1), o ensaio com a máquina de tração procedeu-se através de um conjunto de testes nos quais a carga foi aplicada de forma gradual.

Os testes foram executados com a sequência apresentada na Tabela 3 com indicação do provete aplicado.

Tabela 3 - Resumo dos testes efetuados

Descrição dos testes	Teste	Proвете utilizado
Carregamento do cabo com uma carga de 0 a 5 kN para verificação do comportamento do cabo quando tracionado;	1º Teste	1º Proвете
	2º Teste	
Carregamento de 0 a 7,5 kN de forma a comprovar a existência do efeito de Kaiser;	3º Teste	
	4º Teste	
Carregamento de 0 a 10 kN com o cabo fragilizado de modo a simular o comportamento acústico de um cabo danificado;	5º Teste	
	6º Teste	
Carregamento do cabo até à sua rutura parametrizando a máquina de tração com uma velocidade de 10 mm/s e uma carga máxima de 30 kN;	7º Teste	
	8º Teste	

3.4.1.6 Avaliação da sensibilidade final

Imediatamente após a realização do ensaio foi novamente verificada a sensibilidade do sistema, conforme disposição indicada na norma EN 13554:2011.

3.4.2 Teste de localização de rutura de arames

3.4.2.1 *Provete*

Para a execução do segundo ensaio não foi desenvolvido nenhum provete visto não ter sido aplicado numa máquina de tração ou semelhante. Deste modo, o ensaio foi realizado com um troço de 1 m do cabo indicado (ver 3.2.1).

3.4.2.2 *Montagem*

Neste ensaio foram acoplados a um cabo de aço, dois sensores de EA dispostos em duas posições do cabo. A distância entre estes dois sensores corresponde a duas vezes a distância máxima para aquisição do sinal acústico (Figura 45), distância na qual o limite de aquisição é alcançado ($D_{máx}$). Este valor foi obtido na verificação da atenuação do 1º ensaio.

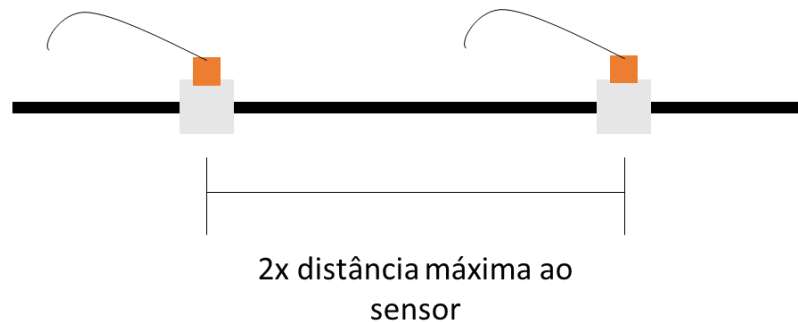


Figura 45 – Esquema de montagem 2º ensaio

3.4.2.3 *Definição da posição dos sensores*

Antes de iniciar o ensaio é essencial definir a posição dos sensores no *software*. Através do menu *AE Sensor Placement* foi definida a localização dos sensores no cabo com as medidas anteriormente referidas (Figura 46).

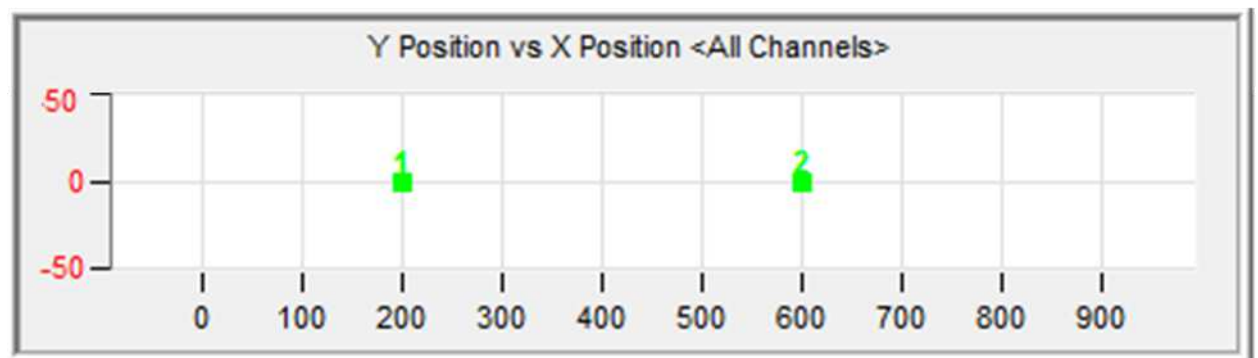


Figura 46 - Posicionamento dos sensores

3.4.2.4 *Avaliação da sensibilidade inicial*

Após o posicionamento dos sensores o ensaio inicia-se, em semelhança com o procedimento utilizado no 1º ensaio, pela avaliação da sensibilidade dos sensores com recurso à fonte Hsu-Nielson. A mina foi quebrada a 50 mm de cada sensor.

3.4.2.5 *Cálculo da velocidade de onda*

Em concordância com Holford, a técnica de localização linear (2.3.7.1) apresenta-se como a técnica indicada para localizar roturas em cabos de aço (Holford, 1987).

Desta forma procedeu-se à determinação do valor da velocidade da onda no cabo (v_{onda}). Para tal uma mina é partida a 200 mm do 1º sensor. Através do *software* determina-se o tempo de chegada do impulso aos dois sensores. Este teste é repetido 3 vezes.

Através destes 4 valores determina-se o Δt médio e calcula-se a velocidade da onda através da fórmula (4).

$$v_{onda} = \frac{200 + D_{m\acute{a}x}}{\Delta t \text{ m\acute{e}dio}} \quad (4)$$

3.4.2.6 *Definição das localizações calculadas*

Conclui-se o ensaio com a determinação das localizações no gráfico Acontecimentos vs Posição. Para tal é quebrada a mina em 3 pontos equidistantes do cabo e registados os valores obtidos.

3.5 ANÁLISE DE DADOS - RESULTADOS

3.5.1 1º Ensaio - Testes efetuados com a máquina de tração

Após executada a montagem do provete de acordo com a esquema apresentado (Figura 47) ligou-se o sistema de aquisição e processamento de sinal e conectou-se o cabo coaxial ao sensor (Figura 47).



Figura 47 –Montagem do 1º ensaio

3.5.1.1 Avaliação da sensibilidade inicial

De acordo com o indicado no ponto 3.4.1, antes de iniciar o ensaio foi verificada a sensibilidade dos sensores. Dos acontecimentos provocados pela mina obtiveram-se valores entre 95 e 98 dB, os quais comprovam a elevada sensibilidade dos sensores (Figura 48).

3.5.1.2 Verificação da Atenuação

Para verificar a atenuação do sinal ao longo dos provetes foi utilizada a fonte Hsu-Nielson em diferentes distâncias ao sensor. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Atenuação

Distância ao sensor	Amplitude
5 cm	66 dBA
10 cm	61 dBA
15 cm	57 dBA
20 cm	55 dBA (LA)

Os valores obtidos provaram ser satisfatórios, visto ser possível definir que a aquisição de sinal poderá ser realizada no máximo a 20 cm do sensor (valor no qual é alcançado o LA). O conhecimento deste valor permite determinar a localização ideal dos sensores caso seja necessário utilizar dois sensores no mesmo cabo (Figura 48).

No Anexo I é apresentada a Figura 48 de forma ampliada.

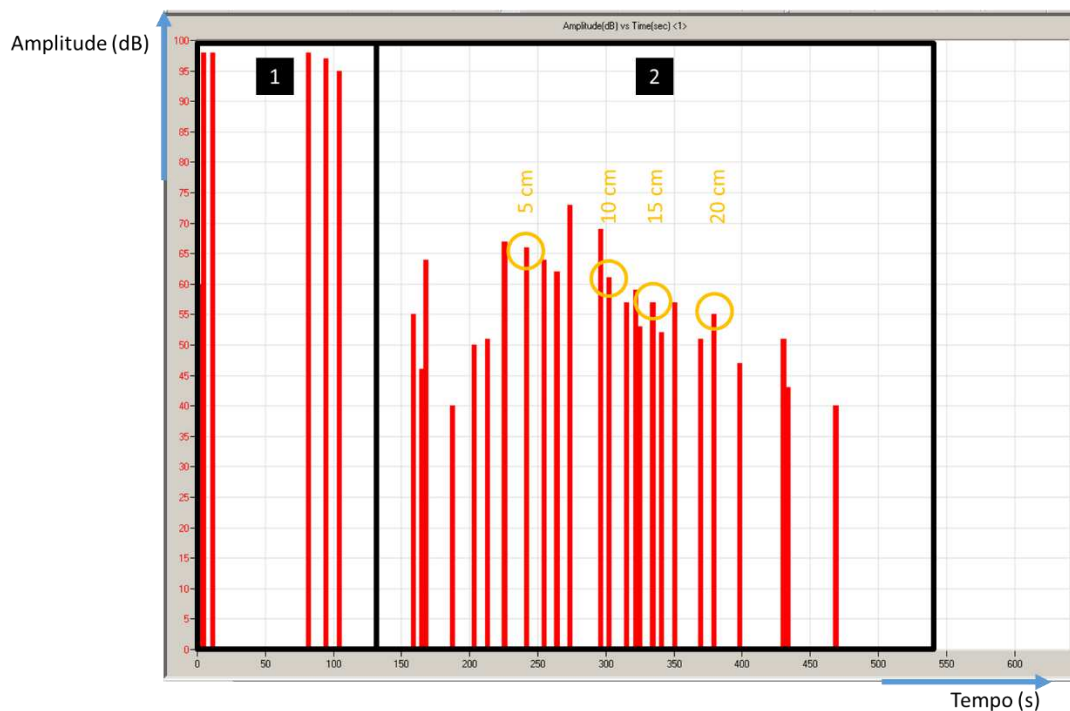


Figura 48 - Sensibilidade (1) e Atenuação (2)

3.5.1.3 1º Teste

Os testes iniciaram-se pela análise do comportamento do provete quando aplicada uma determinada carga. Atendendo que o cabo em causa tem aproximadamente uma força de rutura mínima de 27,4 kN, seleccionou-se uma carga inicial de 5 kN.

O carregamento do cabo foi controlado de forma manual visto que a força aplicada é muito inferior às forças normais de carregamento da máquina. A aplicação da força com velocidade automática provocaria o *overshoot* do sistema de tração.

Neste primeiro teste verificou-se que, apesar de ser alcançada a marca dos 5 kN, o provete não permaneceu tracionado com este valor, retornando à sua posição inicial. Este acontecimento pode ser justificado visto ter sido utilizado um cabo de aço novo que apresenta várias folgas entre os diversos arames que o compõem.

3.5.1.4 *2º Teste*

Após ter sido analisado o comportamento do cabo quando submetido a uma carga, foi repetido o carregamento do 1º teste, ou seja, de 0 a 5 kN. Nesta fase, verificou-se que o provete já permite estabilizar a carga imposta.

Neste teste, não se verificaram acontecimentos relevantes.

3.5.1.5 *3º Teste*

No 3º teste foi aplicada elevação de carga de 0 a 7,5 kN. No decorrer do teste, após ser ultrapassada a carga de 5 kN, foram evidenciados acontecimentos nos arames exteriores do provete. Nesta fase fica comprovada a existência do efeito de Kaiser.

Ao alcançar a carga de 7,5 kN verificou-se que, em concordância com o sucedido no 1º teste, não foi possível manter esta marca retomando ao valor inicial.

3.5.1.6 *4º Teste*

Em semelhança ao sucedido no 2º teste, replicou-se a elevação de 0 a 7,5 kN. Foi então possível manter a carga na marca dos 7,5 kN.

3.5.1.7 *5º Teste*

Como forma de simular, de forma controlada, o comportamento acústico de um cabo danificado, foram fragilizados os arames exteriores de um cordão do provete (Figura 49). Posteriormente foi aplicada uma carga de 7,5 kN.

Tendo em conta os defeitos existentes no provete, a quantidade de acontecimentos de EA aumentou significativamente. Verificou-se ainda a rotura de alguns arames mais fragilizados.



Figura 49 – Arames exteriores do 1º provete para fragilização do mesmo

3.5.1.8 6º Teste

Posteriormente foi elevada a carga para 10 kN. A aproximação desta marca provocou a rutura dos restantes arames do cordão danificado.

3.5.1.9 7º Teste

Neste teste foi provocado um carregamento até à sua rutura. Para este efeito, foi considerada um carga máxima de 30 kN a uma velocidade contante de 10 mm/s.

Alcançada uma carga de 8,4 kN, o serra-cabos deslocou-se no provete, impedindo a continuação do teste (Figura 50).

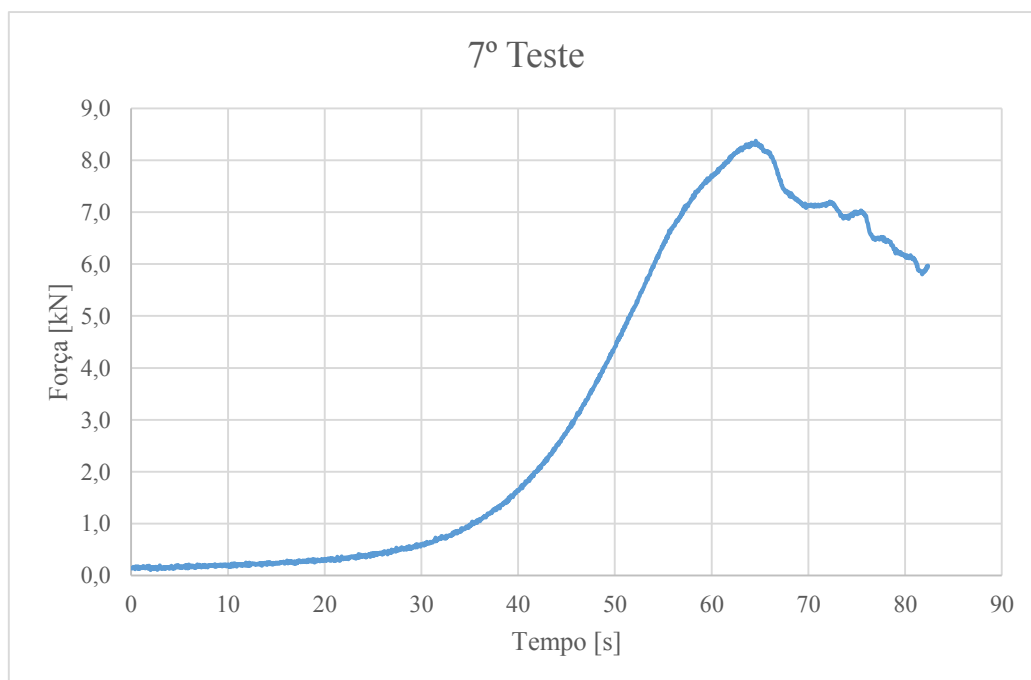


Figura 50 - Gráfico Força vs Tempo do 7º teste

3.5.1.10 *Avaliação da sensibilidade final*

Visto não ser possível realizar mais ensaios com o 1º provete verificou-se novamente a sensibilidade na proximidade do sensor. Os valores obtidos foram consistentes com os medidos na fase inicial.

3.5.1.11 *8º teste*

Após a alteração do provete, o sensor e o respetivo suporte foram reposicionados para a parte superior do novo provete. Neste provete foram ainda cortados vários arames, de vários cordões do cabo, deixando apenas a alma e 2 cordões inalterados. (Figura 51).



Figura 51 – Arames do 2º provete cortados com o alicate

Após obter resultados satisfatórios numa nova medição da sensibilidade, foi iniciado o carregamento do cabo até à sua divisão.

No decorrer do teste, o cabo apresentou diversas roturas, iniciando pelos arames mais fragilizados. A quebra sucessiva dos arames provocou uma diminuição da carga aplicada (Figura 52).

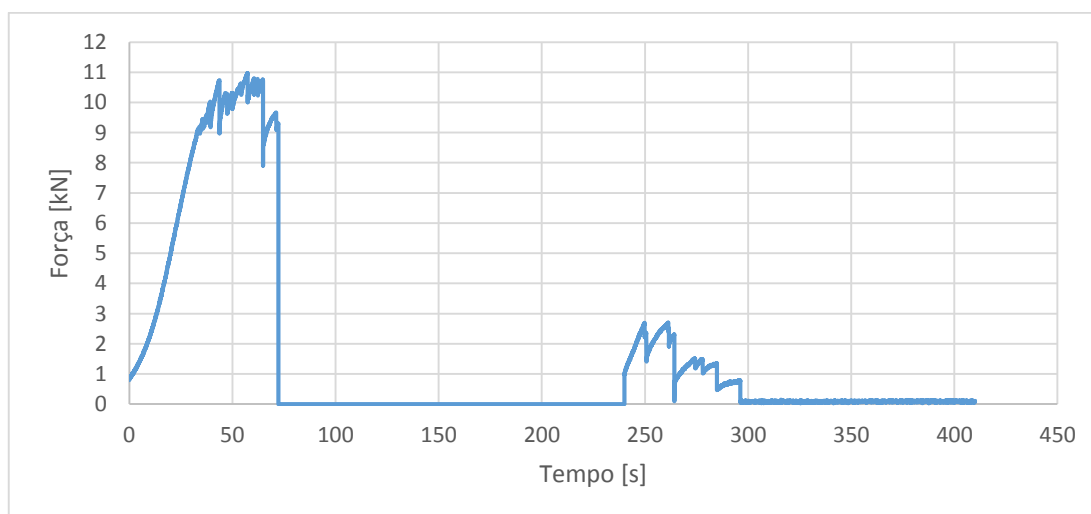


Figura 52 - Gráfico Força vs Tempo do 8º teste

Neste gráfico é possível assinalar os instantes nos quais se presenciou a rutura dos cordões não danificados previamente ($t = 64.85s$ e $t = 264.3s$) e o instante da rutura da alma ($t = 72.3s$). A divisão do cabo em duas partes verificou-se no instante $t = 296.25s$.

No Anexo II é disponibilizado os gráfico da Figura 50 e Figura 52 em maior escala

Na Figura 53 é apresentado o 2º provete após a divisão. Neste provete, os cordões por cortar, fissuraram na zona que foi danificada e a alma do cabo fissurou junto do primeiro serra-cabos. Esta situação surge devido à alma ser do tipo IWRC, ou seja, a alma do cabo é um cordão independente dos demais.

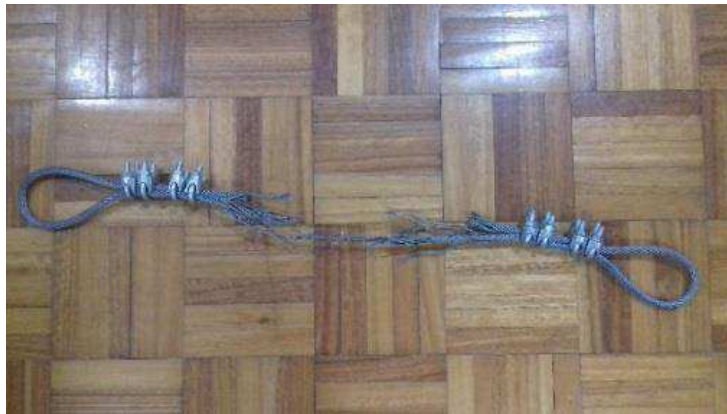


Figura 53 – 2º Proвете após o 8º Teste

3.5.2 2º Ensaio - Teste da localização de rutura de arames

Após a montagem do equipamento de ensaio e do cabo conforme o esquema apresentado na Figura 45 foi determinada a posição dos sensores. Atendendo que na verificação da atenuação o $D_{m\acute{a}x}$ determinado foi 200 mm, os sensores foram distanciados entre si em 400 mm (ver 3.4.1.2). A Figura 54 apresenta a montagem final do ensaio.

Estes valores foram, de seguida introduzidos no *software* AEwin colocando a origem ($x = 0$) no ponto X (Figura 56).



Figura 54 - Montagem do 2º ensaio

3.5.2.1 Avaliação da sensibilidade inicial

Finda a montagem, foi avaliada a sensibilidade inicial do sistema. Foram obtidos valores na gama de 85 a 97 dB de amplitude em ambos os sensores (Figura 55).

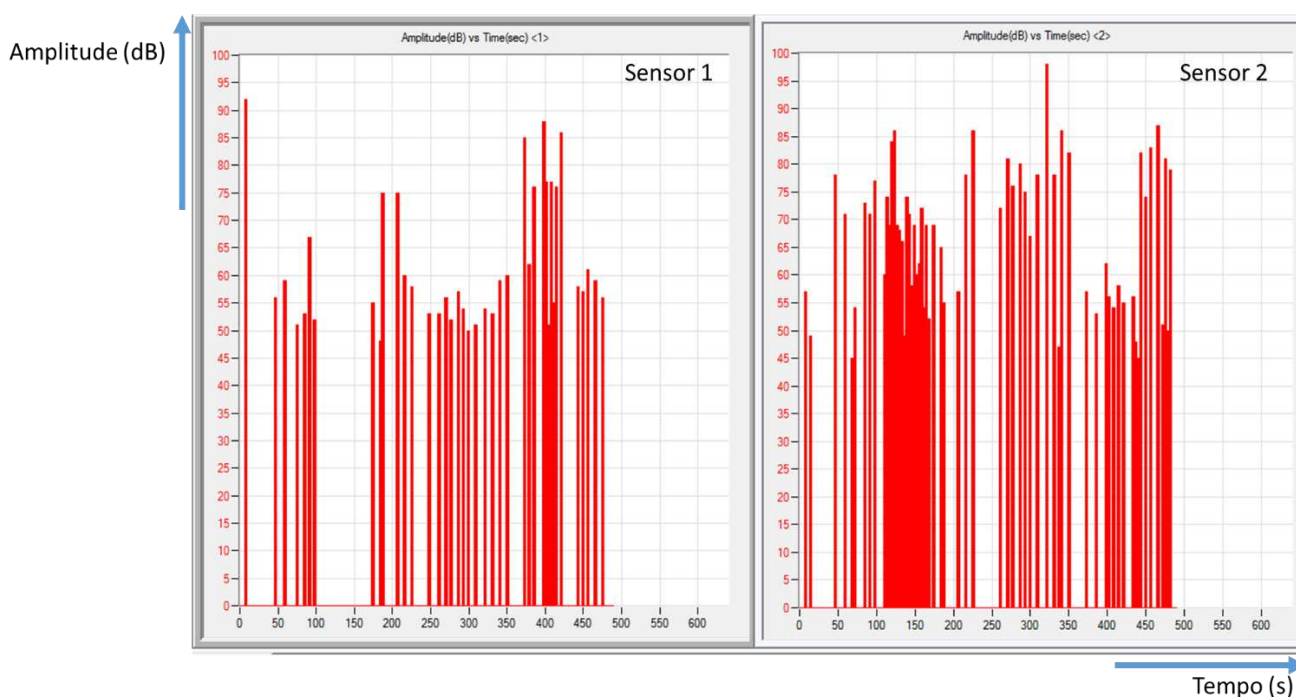


Figura 55 - Sensibilidade inicial do 2º ensaio

3.5.2.2 Velocidade da onda

Com o objetivo de determinar a velocidade da onda no sistema foi utilizada a fonte Hsu-Nielson a 200 mm do sensor 1 (Ponto X da Figura 56) e obtiveram-se os tempos de chegada apresentados na Tabela 5 (ver Anexo III).

Tabela 5- Tempos de Chegada

Tempos de chegada (s)		Δt (s)
Sensor 1	Sensor 2	
0,8173750	0,8174747	0,0000997
0,8610440	0,8611430	0,0000990
0,6029360	0,6030340	0,0000980
0,7911733	0,7912710	0,0000977
Δt médio (s)		0,0000986
$\Delta t = \text{Tempo de chegada}_{\text{sensor 2}} - \text{Tempo de chegada}_{\text{sensor 1}}$		

Determinado o Δt médio e utilizando um $D_{\text{máx}}$ de 200 mm foi calculada a velocidade da onda segundo a fórmula (4), no qual se obteve um valor de 4056795 mm/s.

Este valor foi introduzido no *software* AWin para a determinação das localizações.

3.5.2.3 Localizações obtidas

De acordo com o indicado previamente (ver 3.4.2.6) as localizações foram obtidas através da quebra da mina nos pontos A, B e C da Figura 56 distanciados a 100 mm entre si e de ambos os sensores.

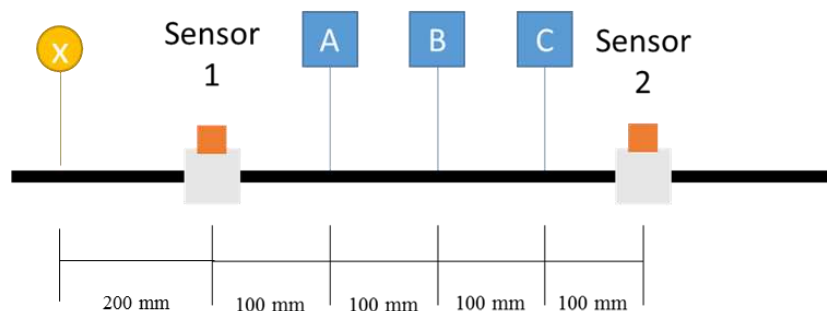


Figura 56 - Representação dos pontos a testar

Os valores de localização obtidos pelo sistema foram apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Localização determinada

Pontos	Localização (Distância à origem)	
	Real	Determinada
A	300	302
B	400	400
C	500	514,3

3.6 INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS

Após serem executados os dois ensaios e obtidos os devidos resultados foi possível alcançar os objetivos indicados anteriormente (ver 3.1) e, por consequência, compreender melhor o comportamento acústico do cabo de aço utilizado.

No 1º ensaio, ao executar a sequência de testes proposta (ver 3.4.1.5) os objetivos apresentados foram alcançados de forma gradual.

No decorrer do 2º e 3º teste foi possível comprovar a existência do efeito de Kaiser neste ensaio. A sua presença era, no entanto, espectável visto terem sido utilizados cabos novos e sem defeitos críticos.

No caso do ensaio ter sido realizado num cabo com defeitos estruturais críticos ou com defeitos dependentes do tempo (como a corrosão ou a fragilização por hidrogénio) o comportamento acústico do cabo poderia não comprovar este efeito (NDT Resource Center, 2018).

Confirmado este pressuposto, foram comparados os efeitos acústicos proveniente da fonte Hsu-Nielson com os efeitos provocados pela rotura de arames no cabo. Para este objetivo foram comparadas as correlações Amplitude vs Tempo de subida e Amplitude vs Duração da avaliação da sensibilidade e do 6º Teste (Figura 57 e Figura 58).

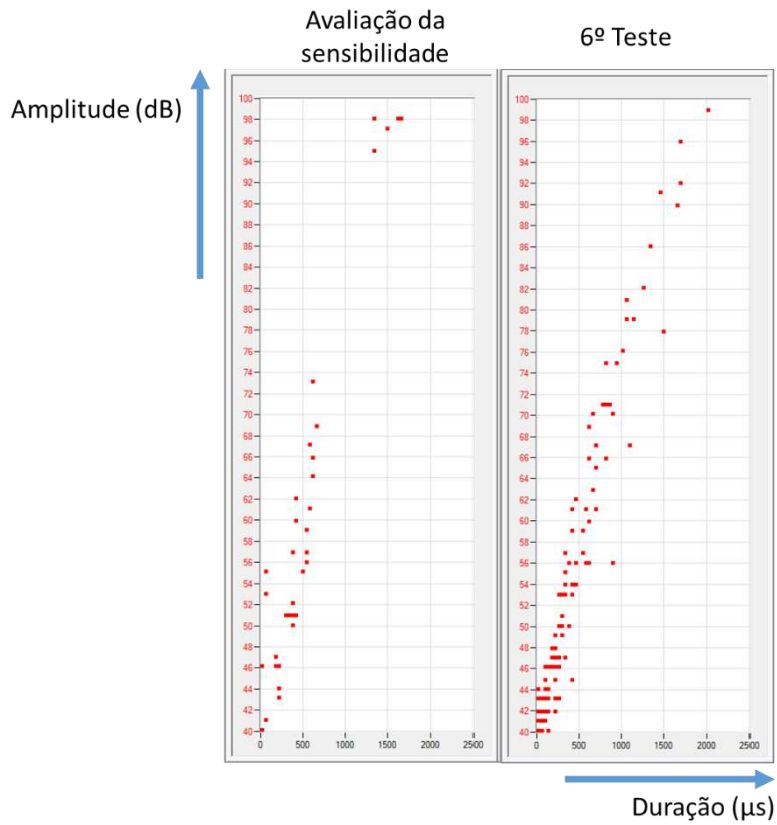


Figura 57 – Gráficos de Amplitude vs Duração da Avaliação da Sensibilidade e do 6º Teste

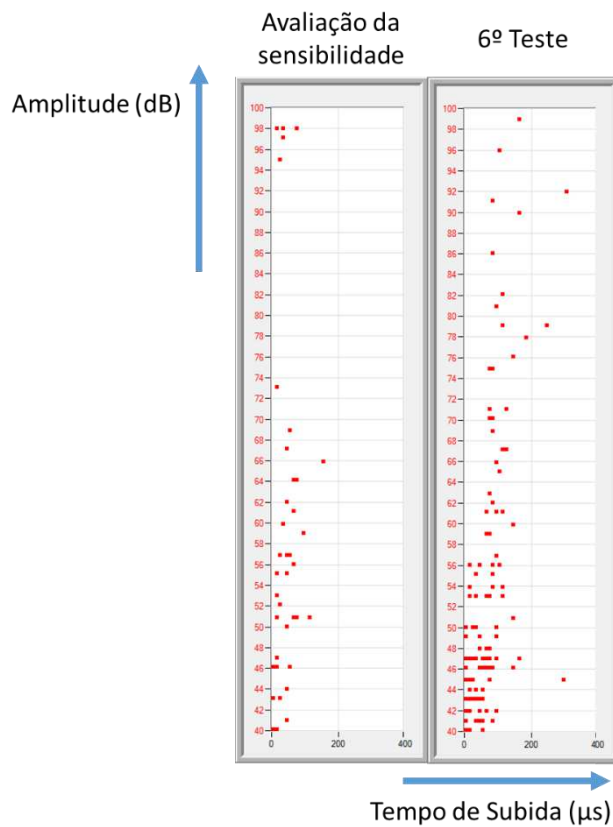


Figura 58 – Gráficos de Amplitude vs Tempo de subida da Avaliação da sensibilidade e do 6º Teste

Ao analisar estas correlações é possível verificar as semelhanças entre o comportamento acústico proveniente das duas fontes distintas. Ainda que o 6º teste apresente mais acontecimentos que a Avaliação da sensibilidade, ambos os testes apresentam valores de duração na gama de 0 a 2000 μ s e valores de Tempo de subida na gama de 0 a 200 μ s.

Este comportamento é igualmente verificado nos restantes testes em que se verificaram roturas de arames.

No Anexo IV é possível verificar os gráficos apresentados na Figura 57 e Figura 58 bem como os gráficos Amplitude vs Duração e Amplitude vs Tempo de subida do 5º e 8º testes.

Comprova-se, deste modo, que a fonte Hsu-Nielson poderá ser aplicada ao ensaio de EA para o cabo do aço com as configurações apresentadas.

Posteriormente foi analisado o desenvolvimento da energia e da amplitude nas diferentes fases do 1º ensaio. Compreender a evolução destes parâmetros apresenta-se como essencial no estudo da EA visto serem os parâmetros mais significativas na análise de fissuras em cabos de aço (ver 2.4).

Qualquer ensaio de EA inicia-se pela verificação da sensibilidade, que por se comportar como uma simulação de um evento acústico apresenta constantemente valores de amplitude superiores a 90 dB.

É, no entanto, possível verificar que a energia gerada pela mina é inferior à energia gerada por uma rotura e superior aos valores apresentados pelo ruído.

Esta afirmação é confirmada através da análise dos gráficos energia vs tempo da avaliação da sensibilidade inicial e o do 8º teste, no qual verificou-se a rotura do cabo (Figura 59).

Nestes dois verifica-se que o valor de energia provocada pela fonte Hsu-Nielson apresenta valores de 1500 e 1800 e quando provocada pela rotura de arames apresenta valores de 4000 e 5500. Estes valores de energia foram igualmente evidenciados no 5º e no 6º teste (gráficos disponibilizados no Anexo V).

De salientar ainda que o ruído apresenta constantemente valores inferiores a 1000, sendo observável em todos os testes efetuados.

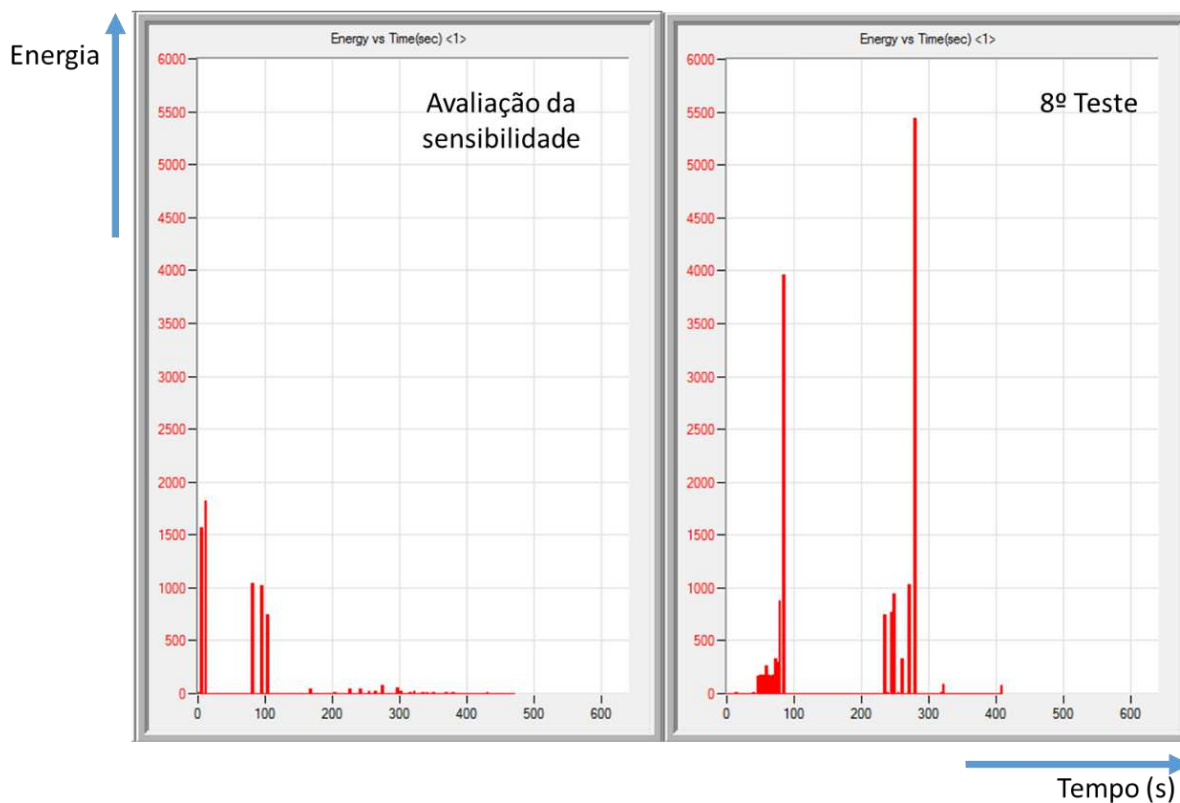


Figura 59 - Gráficos Energia vs Tempo da Avaliação da sensibilidade e do 8º Teste

Em oposição ao 5º, 6º e 8º teste, na fase do ensaio em que se procedeu ao carregamento do cabo e em que não se presenciou rotura de arames (1º ao 4º teste), verificou-se que os parâmetros mais significativos, amplitude e energia, não atingiram valores relevantes.

Este facto é verificável nos gráficos Acontecimentos vs Amplitude e Acontecimentos vs Energia nos quais, em regra geral, os valores de energia e de amplitude são relativamente reduzidos em comparação com os restantes testes.

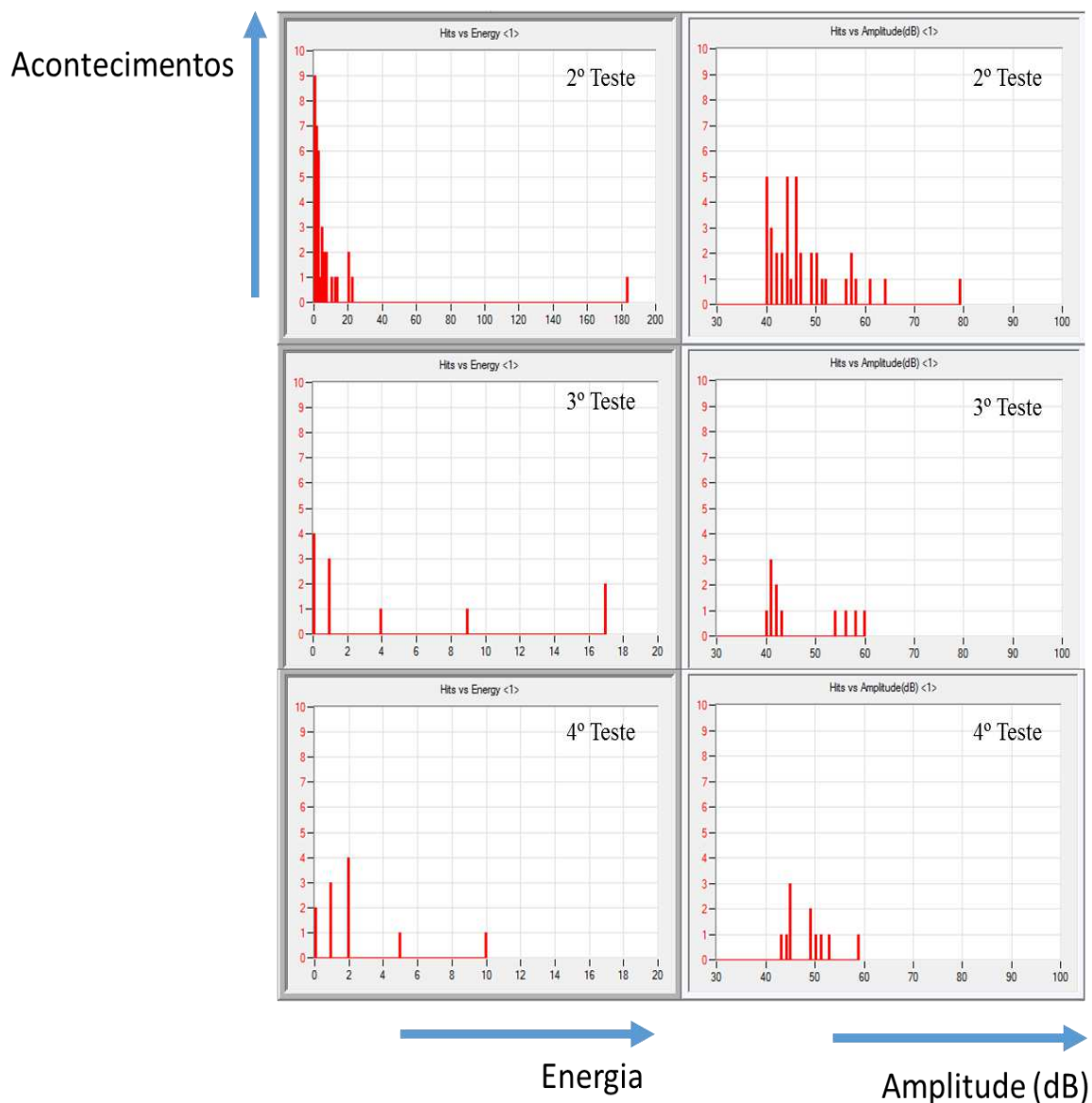


Figura 60 - Gráficos Acontecimentos vs Energia e Acontecimentos vs Amplitude do 2º, 3º e 4º Teste

Nestes testes de EA, a variação da energia e da amplitude ao longo do tempo são evidentemente as tendências mais relevantes do comportamento acústico. No entanto, é necessário considerar a variação da força aplicada no cabo ao longo do tempo para avaliar o comportamento físico do cabo.

Ao relacionar as tendências da Força vs Tempo e Amplitude vs Tempo (Figura 61) confirmam-se as semelhanças de ambas nas diferentes etapas do 8º Teste.

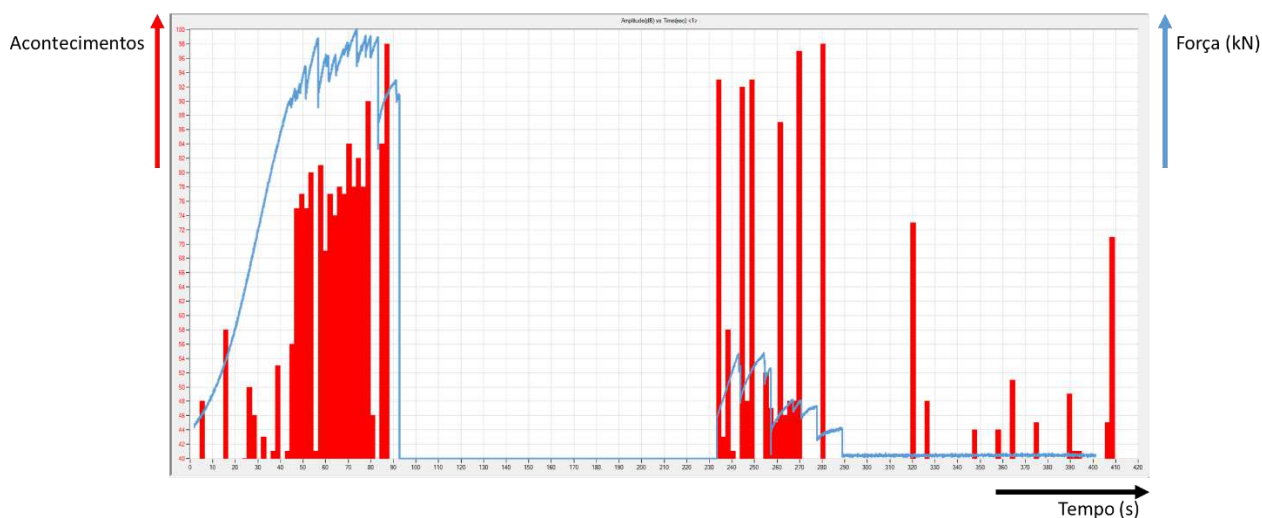


Figura 61 - Gráfico Amplitude vs Tempo do 8º Teste (Versão ampliada no Anexo VI) – a vermelho - sobreposto pelo gráfico Força vs Tempo (Figura 52) – a azul

Neste gráfico é possível observar que os momentos com amplitudes mais elevadas se verificam quando se presenciam mais roturas de arames, tais como a fissura de cordões e a fissura da alma.

Após a execução do 2º ensaio, verifica-se que as localizações obtidas apresentam valores com um erro não superior a 3% (Tabela 7).

Tabela 7 –Teste da localização (Erro)

Pontos	Localização (Distância à origem)		Erro
	Real	Determinada	
A	300	302	0,66 %
B	400	400	0 %
C	500	514,3	2,76%

Os resultados obtidos nesta tabela comprovam a eficiência da técnica de localização linear quando aplicada a fonte Hsu-Nielson a cabos de aço.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho final de mestrado permitiu verificar o objetivo principal que se pretendia e que se traduz no facto de que o ensaio de emissão acústica pode ser aplicado à inspeção de cabos de aço.

Atualmente o ensaio de EA, apesar de se encontrar em franca expansão, representa uma fração reduzida na grande panóplia de ensaios não destrutivos aplicados na indústria. Este facto sucede-se por ser um ensaio relativamente recente face aos demais e, por consequência, existirem poucos procedimentos definidos para a sua aplicação deste.

Ao analisar os diferentes artigos publicados no *Journal of Acoustic Emission* pelo IIIAE e pelo AEWG, verifica-se que os mais recentes desenvolvimentos do ensaio de emissão acústica centram o foco na inspeção de equipamentos sob pressão, na monitorização de soldaduras e de estruturas de betão e ainda no aperfeiçoamento da análise do sinal de EA.

Relativamente à aplicação deste ensaio à inspeção de cabos de aço, o número de estudos e artigos publicados representam uma percentagem muito limitada, sendo a maioria, referenciado no presente trabalho (ver 2.4).

Os dois ensaios concretizados permitiram compreender e verificar conclusões já identificadas por outros investigadores.

É, no entanto, necessário salientar que apenas foi utilizado um tipo de cabo (ver 3.2.1) e que a alteração deste por um cabo com uma configuração distinta afectaria os resultados obtidos neste trabalho.

Recorrente do 1º ensaio, foi comprovada a importância dos parâmetros Amplitude e Energia como os maiores indicadores da presença de rotura de arames. Por esta razão considera-se essencial a presença de uma correlação Amplitude vs Energia no *layout* utilizado.

Esta correlação apresenta-se como uma forma simplificada de revelar instantaneamente a presença de eventuais fissuras do cabo (Figura 62).

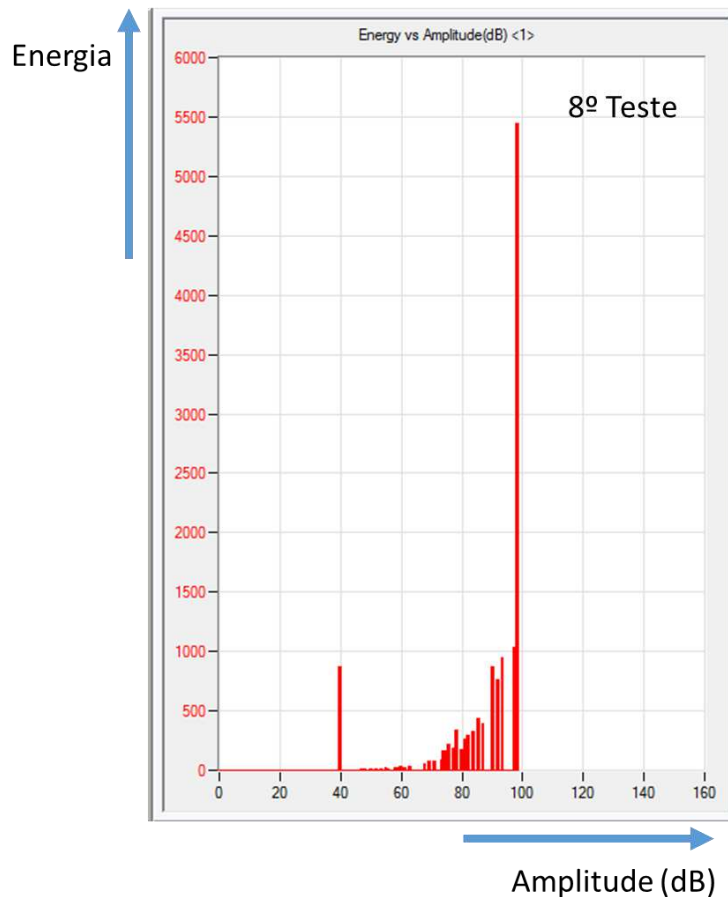


Figura 62 - Gráfico Energia vs Amplitude do 8º Teste

Na aplicação deste ensaio verifica-se igualmente a necessidade de serem definidos critérios de aceitação e/ou reprovação dos cabos inspecionados. Estes critérios deverão ser baseados em amplitude e energia e relacionados com a elevação da carga.

Neste ensaio, ao executar a sequência de testes proposta (ver 3.4.1.5), para além dos objetivos que foram alcançados de forma gradual, foram obtidas algumas conclusões que não eram de início previsíveis.

Decorrente do deslizamento de um dos cabos de aço, verificou-se a necessidade de criar um novo provete, tendo em atenção a possibilidade de deslocamento dos serra-cabos no decorrer do carregamento do cabo. Conclui-se por isso que é necessário procurar diferentes métodos de fixação dos cabos de aço aplicando outros possíveis terminais (ver 2.1.5).

No caso do 2º ensaio, é de salientar o sucesso obtido para a localização de fissuras nos cabos, alcançados erros inferiores a 3% (ver 3.6).

Proposta de trabalho futuro

O trabalho apresentado foi desenvolvido e baseado tanto nos artigos e normas consultadas como no conhecimento técnico dos profissionais que acompanharam a sua execução, no entanto mais testes deverão ser realizados para a construção de um procedimento de ensaio definido.

Entre os demais definidos anteriormente, o trabalho futuro que se considere necessário para o desenvolvimento deste ensaio baseia-se em:

- Repetir os ensaios para cabos com outras configurações, nomeadamente cabos com alma de fibra (ver 2.1), cuja utilização na indústria se encontra em crescimento;
- Conexão do sistema de aquisição e processamento de sinal com o equipamento de tracção, permitindo a inclusão da força como um parâmetro característico do sinal e no qual, o seu desenvolvimento possa ser visível no *software* utilizado;
- Verificar o comportamento acústico de cabos com diferentes defeitos;
- Aplicação do ensaio a cabos incorporados nos respetivos equipamentos durante o seu funcionamento;
- Melhoria no sistema de acoplamento do sensor;
- Desenvolvimento de métodos tendo em conta os efeitos da ressonância e o ruído envolvente.

Página intencionalmente deixada em branco.

REFERÊNCIAS

- ASTN - American Society for Nondestructive Testing. (2018). Discover Nondestructive Testing (NDT). Obtido 20 de Dezembro de 2018, de https://www.asnt.org/MinorSiteSections/AboutASNT/What_is_NDT.aspx
- Babel, H. (1979). Destructive and non-destructive methods to determine the life of wire ropes. *Wire*, 28, 2663–270.
- Casey, N. F. (1984). The evaluation of wire ropes by acoustic emission and other techniques. *British Journal of non-destructive testing*, (Nov.), 351–356.
- Casey, N. F., & Laura, P. A. A. (1997). A review of the acoustic-emission monitoring of wire rope. *Ocean Engineering*, 24(10), 935–947.
- Collini, L., & Degasperi, F. (2014). MRT detection of fretting fatigue cracks in a cableway locked coil rope. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 2, 64–70.
- Cortázer, D., Larrondo, H. A., Laura, P. A. A., & Avalos, D. R. (1996). A low-cost fiber-optic system for monitoring the state of structural health of a mechanical cable. *Ocean Engineering*, 23(2), 193–199.
- Dong, D., Xiangdong, Z., & Libin, L. (2014). Research on Relationship Between Parameters Correlation of Acoustic Emission and Rock Failure. *Sensors & Transducers*, 183(12), 147–154.
- Drummond, G., Watson, J. F., & Acarnley, P. P. (2007). Acoustic emission from wire ropes during proof load and fatigue testing. *NDT & E International*, 40(1), 94–101.
- FPrimeC Solutions. (2017). Structural Health Monitoring. Obtido 12 de Dezembro de 2018, de <https://www.fprimec.com/acoustic-emission-monitoring/>
- Fritz, J. T. D. et al. (1978). *Experimental Development of a Wire Rope Monitoring Device for Laboratory Fatigue Testing*. CSIR control report Me1593, Pretoria, South Africa.
- Gaillet, L., Zejli, H., Laksimi, A., Tessier, C., Drissi-Habti, M., & Benmedakhene, S. (2009). Detection by acoustic emission of damage in cable anchorage. Em *NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. Nantes, França.
- Harris, D. O. (1972). Acoustic Emission Monitoring of Life Span Cables on Dumbarton

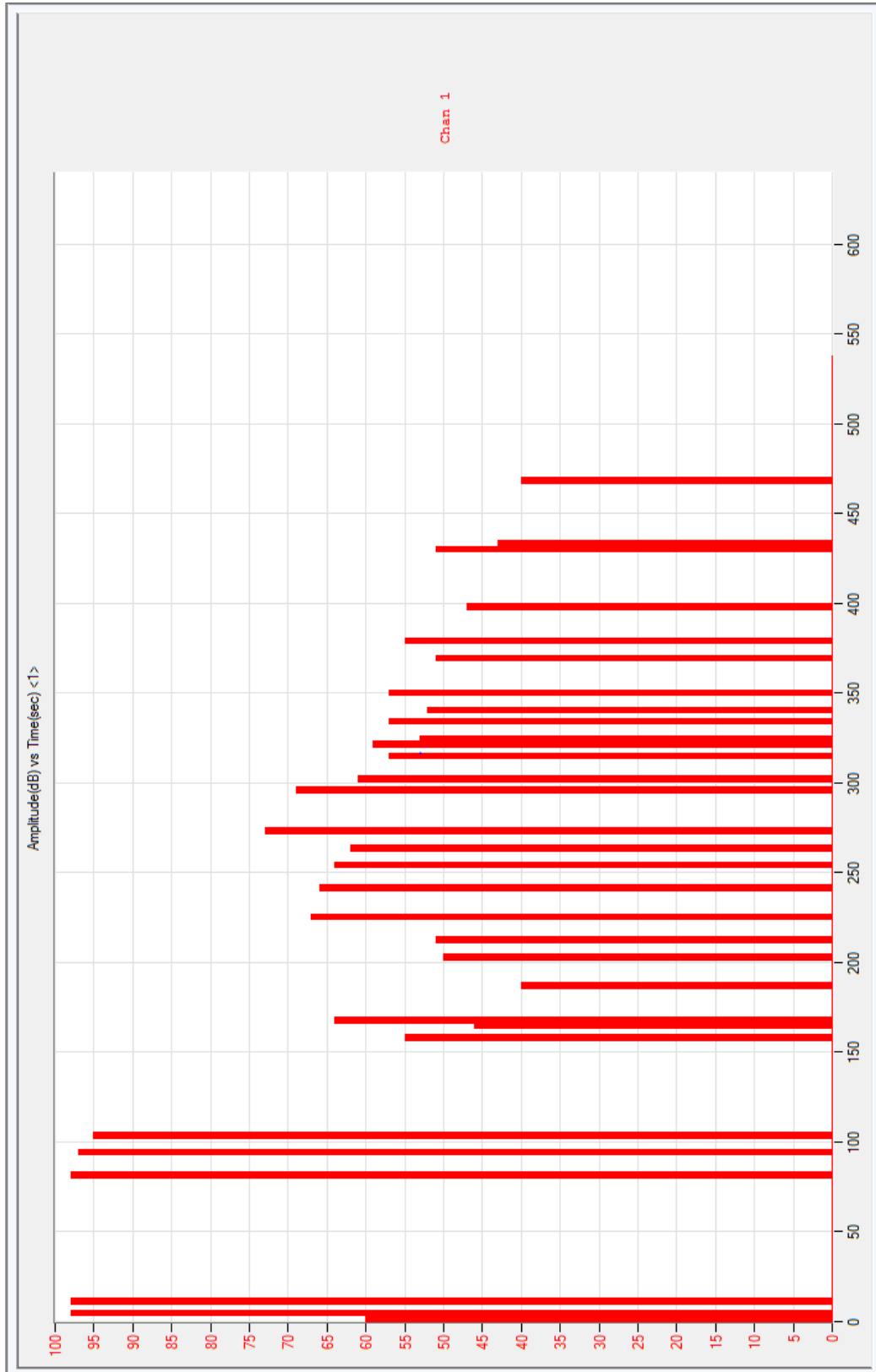
- Bridge. *Report DC-72- TM11, Dunegan Division of Physical Acoustics Corp., San Juan Capistrano CA*, 33.
- Harris, D. O., & Dunegan, R. L. (1974). Acoustic emission testing of wire rope. *Materials Evaluation*, 15, 1–6.
- Hay, T. R. (2012). Bridge Cable Inspection with Long Range Ultrasound. Em *Final Report for Highway IDEA Project 152*.
- Henao, H., Fatemi, S. M. J. R., Capolino, G. A., & Sieg-Zieba, S. (2011). Wire Rope Fault Detection in a Hoisting Winch System by Motor Torque and Current Signature Analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(5).
- Hoffman, K., & Zmié, N. (2012). A contribution on the history of ropeways. Em T. Koetsier & M. Ceccarelli (Eds.), *Explorations in the History of Machines and Mechanisms* (p. 594). Springer.
- Holford, K. M. (1987). *The nondestructive testing of wire ropes by acoustic emission. Ph.D. thesis*. University College, Cardiff.
- Huang, M., Jiang L., Liaw, P.K., Brooks, C. R., Seeley, R., and Klarstrom, D. L. (1998). Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture. *Journal of Materials*, 50(11).
- Jacques, R. C., Flores, J. V, Strohaecker, T. R., & Reguly, A. (2009). Acoustic emission testing in wires from the tensile armour of flexible risers under load. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 51(9), 504–507, 511.
- Kaiser, J. (1950). *Untersuchungen über das auftreten von Geräuschen beim Zugversuch*. PhD thesis, Technische Hochschule, Munique, Alemanha.
- Laura, P. A. A., Vanderveldt, H., & Gaffney, P. (1969). Acoustic Detection of Structural Failure of Mechanical Cables. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 45(3), 791–793.
- Le Cam, V., Gaillet, L., Perrin, M., Tessier, C., & Cottineau, L.-M. (2009). A smart and wireless sensors network for cable health monitoring. Em *NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering*. Nantes, França.
- Lembersky, L., Adams, R., Tamutus, T., & Watson, J. (2012). Suspension Cable Wire Break Monitoring Using Acoustic Emission for Economic and Probability of

- Detection Advantages. Em *NDE/NDT for Highway and Bridges: Structural Materials Technology*.
- Li, D., Ou, J., Lan, C., & Li, H. (2012). Monitoring and Failure Analysis of Corroded Bridge Cables under Fatigue Loading Using Acoustic Emission Sensors. *Sensors*, 12(12), 3901–3915.
- Miller, R. K., & Mc Intire, P. (1987). Acoustic emission testing. Em *Nondestructive Handbook, Vol. 5* (2 ed.). ASTM.
- MISTRAS Group. (2009). Ficha técnica da placa de captação de sinais PCI-8.
- MISTRAS Group. (2014). Ficha técnica do software AEwin.
- MISTRAS Group. (2015a). DaisAE: Suspension Cable Monitoring System for Bridges. Princeton, New Jersey, EUA.
- MISTRAS Group. (2015b). Ficha técnica do sensor R151-AST.
- NDT Resource Center. (2018). Introduction to Acoustic Emission Testing. Obtido 3 de Fevereiro de 2018, de https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other Methods/AE/AE_Index.htm
- Ohtsu, M. (2008). Sensors and Instruments. Em C. U. Grosse & M. Ohtsu (Eds.), *Acoustic emission testing: basics for research, applications in civil engineering* (pp. 19–41). Berlin: Springer.
- Peng, P. C., & Wang, C. Y. (2015). Use of gamma rays in the inspection of steel wire ropes in suspension bridges. *NDT and E International*, 75, 80–86.
- Peterka, P., Krešák, J., Kropuch, S., Fedorko, G., Molnar, V., & Vojtko, M. (2014). Failure analysis of hoisting steel wire rope. *Engineering Failure Analysis*, 45, 96–105.
- Raisutis, R., Kazys, R., Mazeika, L., Samaitis, V., & Zukauskas, E. (2016). Propagation of Ultrasonic Guided Waves in Composite Multi-Wire Ropes. *Materials*, 9(6), 451.
- Rice, C. (2017). Wire rope defects. Obtido 11 de Abril de 2018, de <http://www.drillsafe.co.za/drillsafe-articles/wire-rope-defects>
- Schlanbusch, R., Oland, E., & Bechhoefer, E. R. (2017). Condition monitoring technologies for steel wire ropes - A review. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 8(1).

- Scott, I. G. (1991). *Basic Acoustic Emission* (Vol. 6). New York, USA: Gordon and Breach Science Publishers.
- Shao, Y. B., Yu, D. A., & Wang., S. (1998). The method of noise elimination for acoustic emission detection of steel wire during fatigue test. *Physics Examination and Testing*, (6), 21–24.
- Shiotani, T. (2008). Parameter Analysis. Em C. U. Grosse & M. Ohtsu (Eds.), *Acoustic emission testing: basics for research, applications in civil engineering* (pp. 41–51). Berlin: Springer.
- Teodorczyk, M. (2017). Influence of Aggregate Gradation on the Longitudinal Wave Velocity Changes in Unloaded Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245.
- Theobald, P., Zeqiri, B., & Avison, J. (2008). Couplants and their influence on AE sensor sensitivity. *Journal of Acoustic Emission*, 26, 91–97.
- Verreet, R. (2011). *Patent US 8254660 B2*. USA.
- Verreet, R., & Ridge, I. (2006). More causes of wire rope damage. *Cranes Today Magazine*.
- Vornbäumen. (2018). Technical Notes - Rope components and classification by intended use. Obtido 2 de Novembro de 2018, de <https://www.vornbaeumen.de/en/service/technical-notes/rope-components-and-classification-by-intended-use.html>
- Wacker, E.-S., & Denzler, J. (2013). Enhanced anomaly detection in wire ropes by combining structure and appearance. *Pattern Recognition Letters*, 34, 942 – 953.
- Wenjie, B., Mengyu, C., Lichan, L., Yongquan, L., & Quan, D. (2013). Acoustic Emission from Elevator Wire Ropes During Tensile Testing. Em G. Shen, Z. Wu, & J. Zhang (Eds.), *Advances in Acoustic Emission Technology* (pp. 217–224). New York, NY: Springer.
- Winter, S., Moll, D., Eisinger, R., Kuehner, K., Guttengeber, E., Proehl, A., & Eichinger, M. (2014). *Patent US 8718352 B2*.
- Xu, J., Wu, X., & Sun, P. (2013). Detecting broken-wire flaws at multiple locations in the same wire of prestressing strands using guided waves. *Ultrasonics*, 53(1), 150–156.

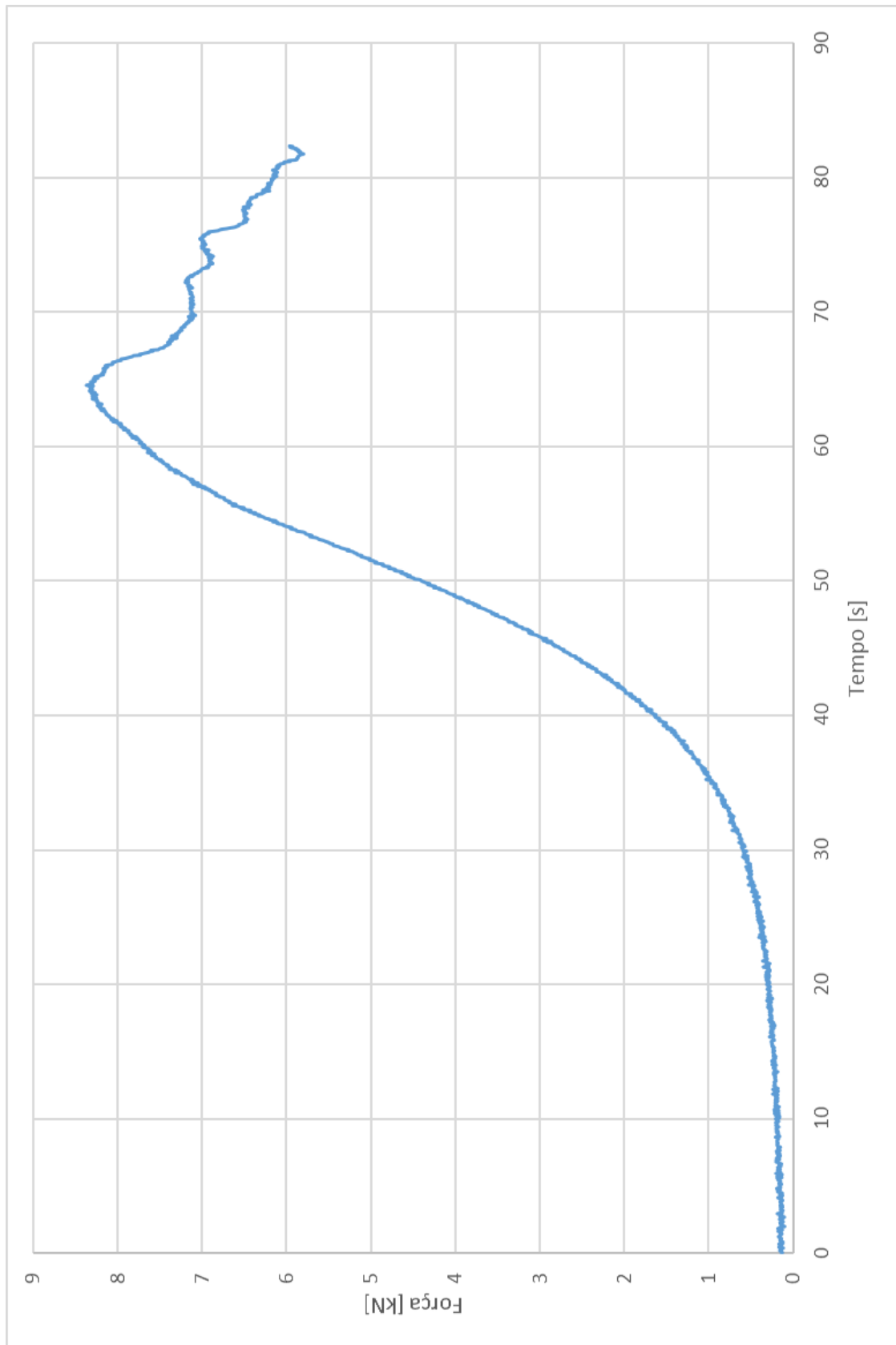
ANEXOS

Anexo I. Avaliação da Sensibilidade

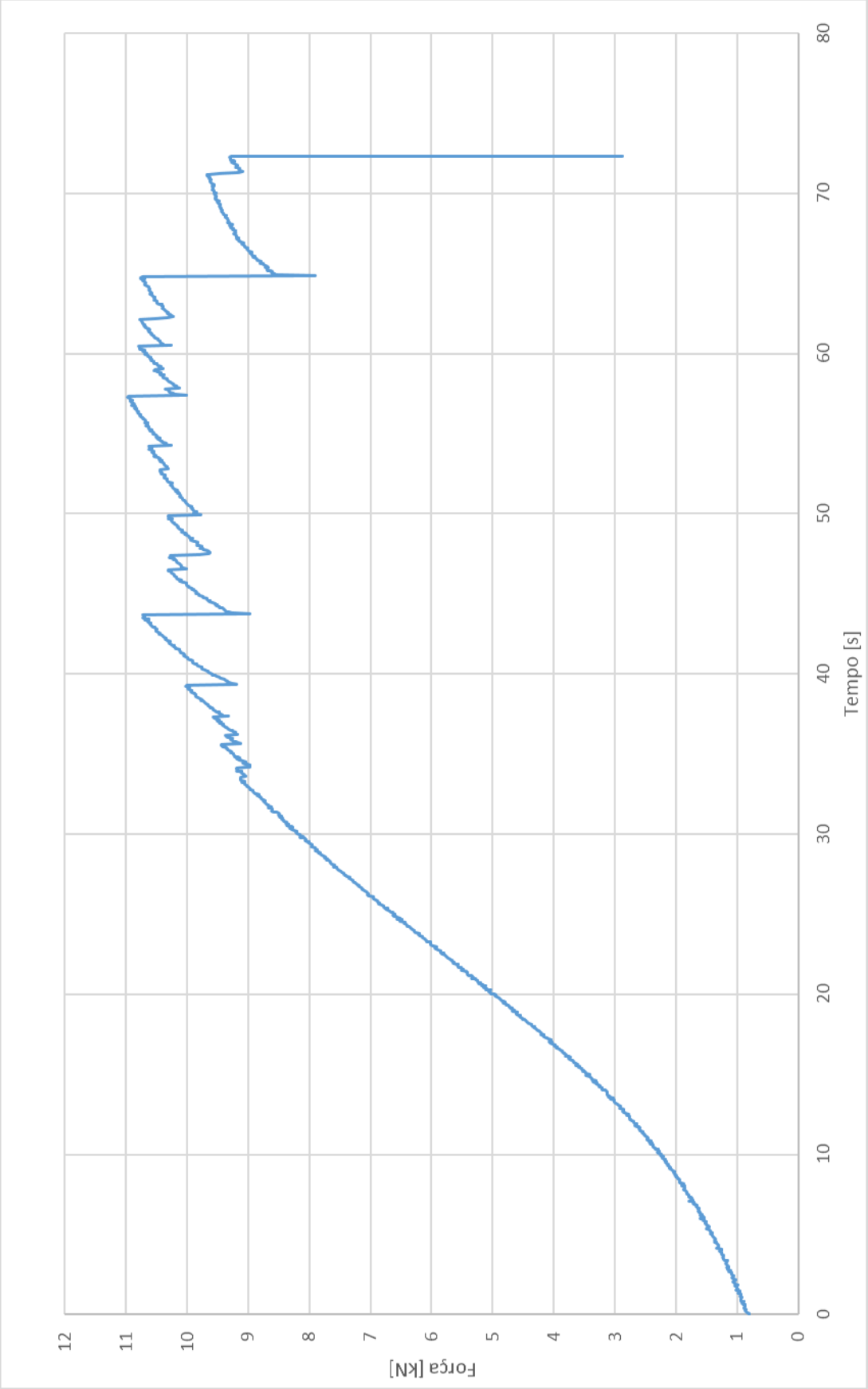


Anexo II. Tendência Força (kN) vs Tempo (s)

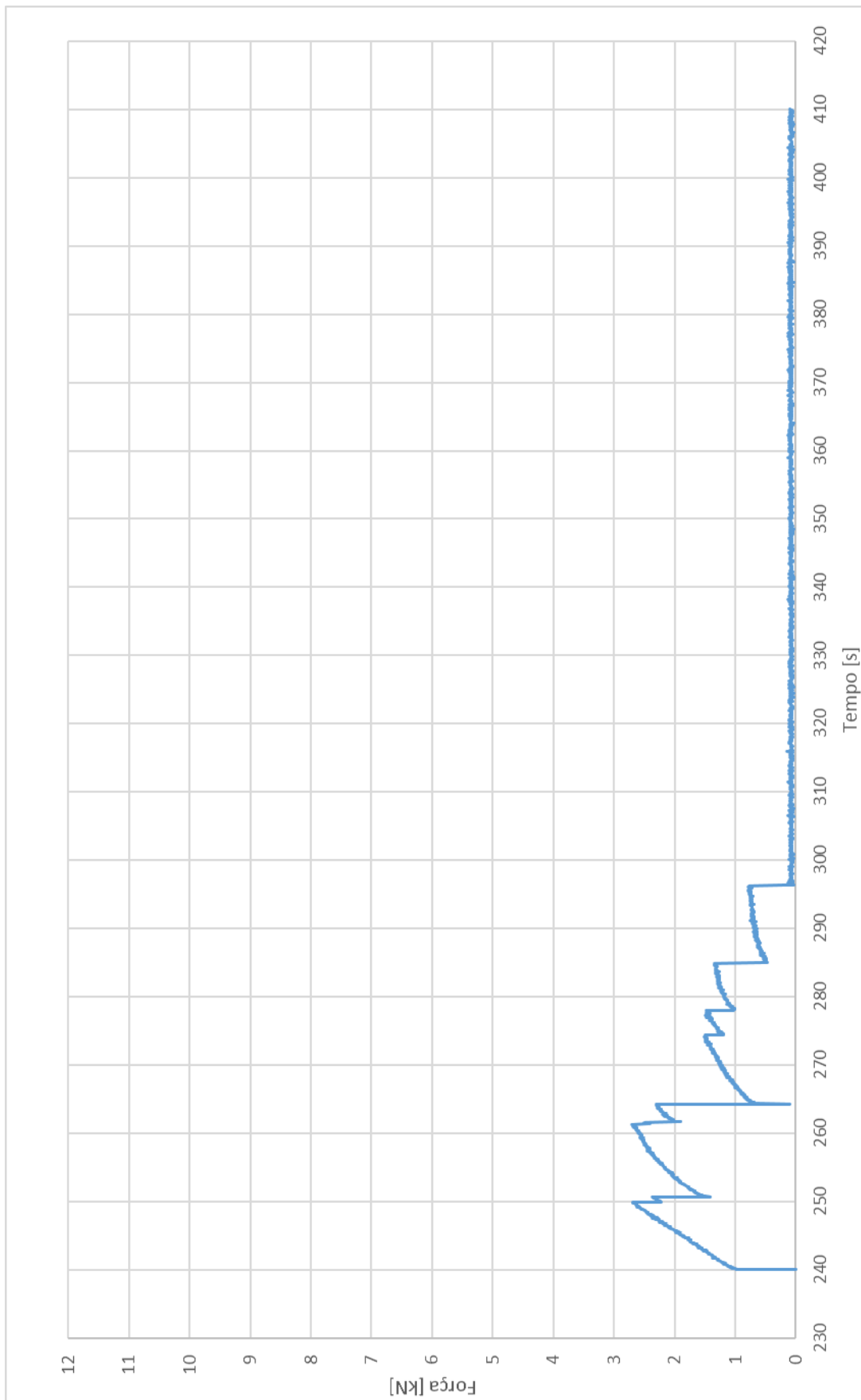
7º Teste



8° Teste nos instantes $t = [0-80]$ s

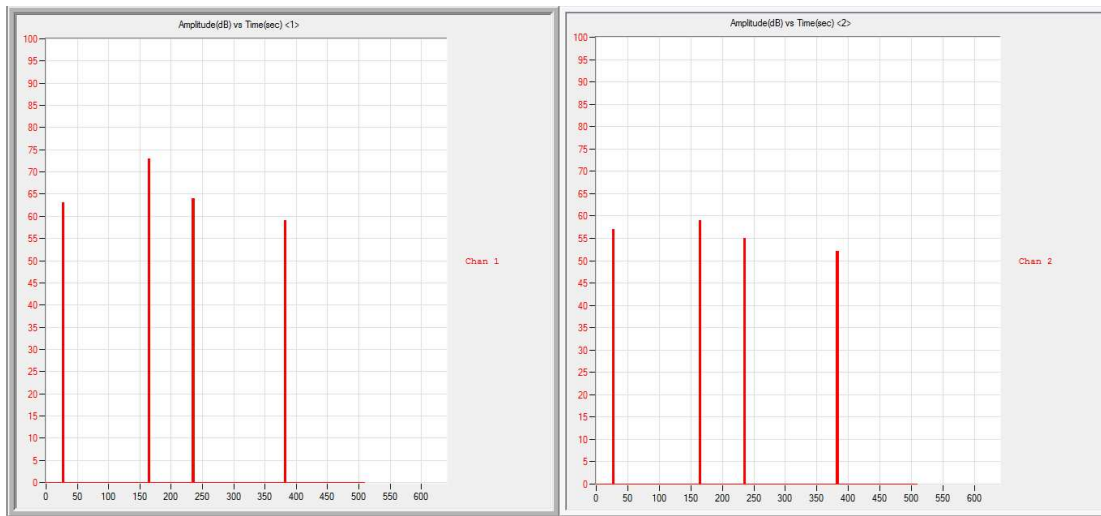


8º Teste nos instantes $t = [230-420]$ s



Anexo III. Gráficos e Listas obtidas para o 2º ensaio

Determinação dos tempos de chegada aos sensores 1 e 2

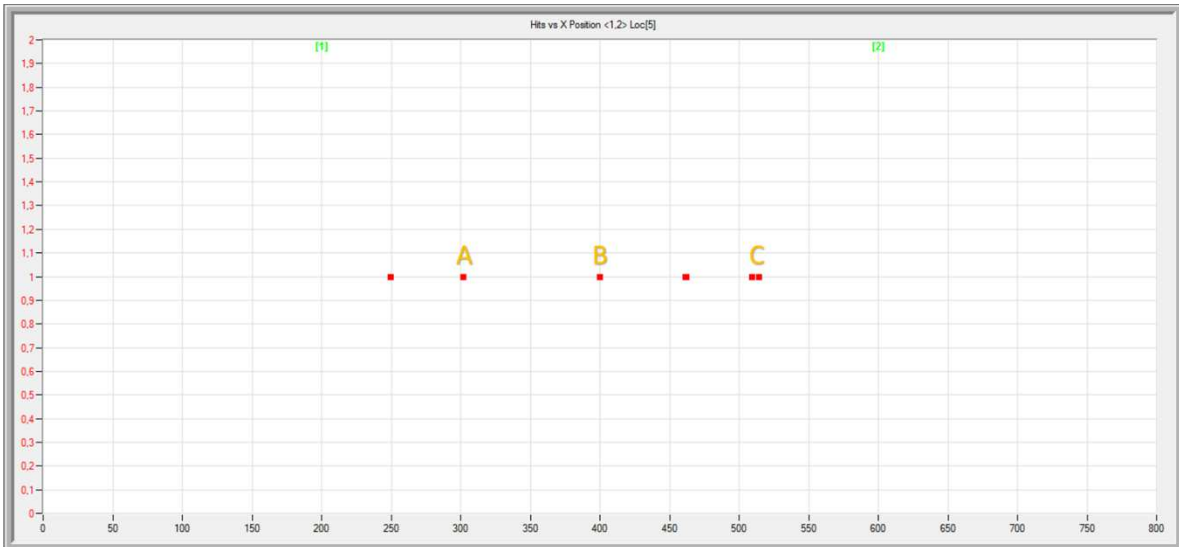


Line Listing Display

```

128 0 00:00:00.000000 Acquisition Running
ID DDD HH:MM:SS.nnnnnn CH AMP C-FRQ P-FRQ
1 0 00:00:25.8173750 1 63 151 92
1 0 00:00:25.8174747 2 57 158 163
1 0 00:00:25.8538470 1 53 157 118
1 0 00:00:25.8807533 1 58 159 99
1 0 00:02:44.8610440 1 73 129 185
1 0 00:02:44.8611430 2 59 149 168
1 0 00:02:44.8850580 1 69 126 185
1 0 00:02:44.8851583 2 58 156 166
1 0 00:02:44.9516290 1 63 131 186
1 0 00:02:44.9517328 2 58 168 166
1 0 00:03:53.6829360 1 64 142 121
1 0 00:03:53.6838348 2 55 158 168
ID
* Cp# 5[1,2] x = 200, y = 0 dt[ 98]
ID DDD HH:MM:SS.nnnnnn CH AMP C-FRQ P-FRQ
1 0 00:06:21.7911733 1 59 142 92
1 0 00:06:21.7912718 2 52 154 158
ID
* Cp# 5[1,2] x = 200.5, y = 0 dt[ 98]
15 407 05:26:12.0888317 Acquisition Aborted
    
```

Determinação das localizações (posições dos pontos descritas segundo Figura 56)

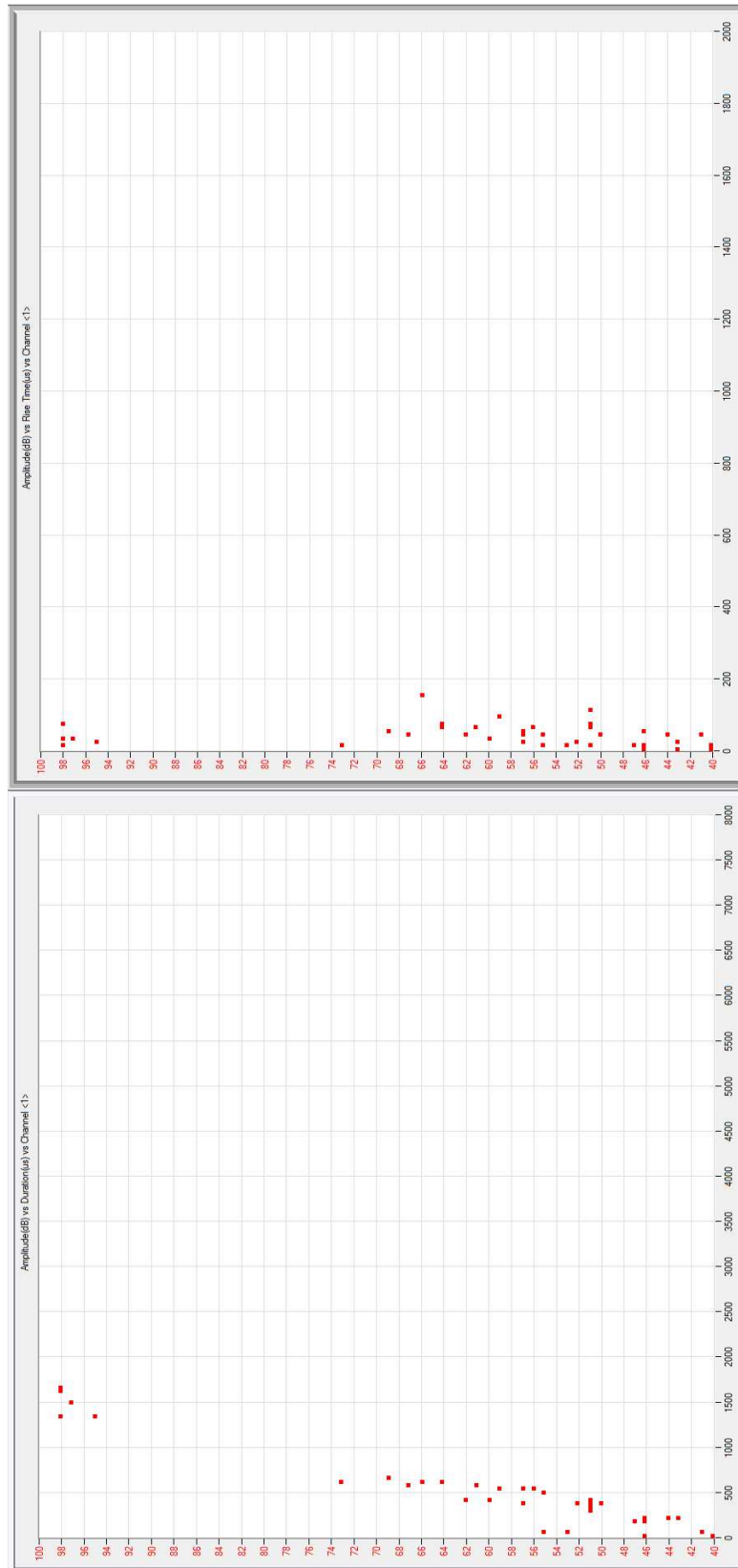


Line Listing Display

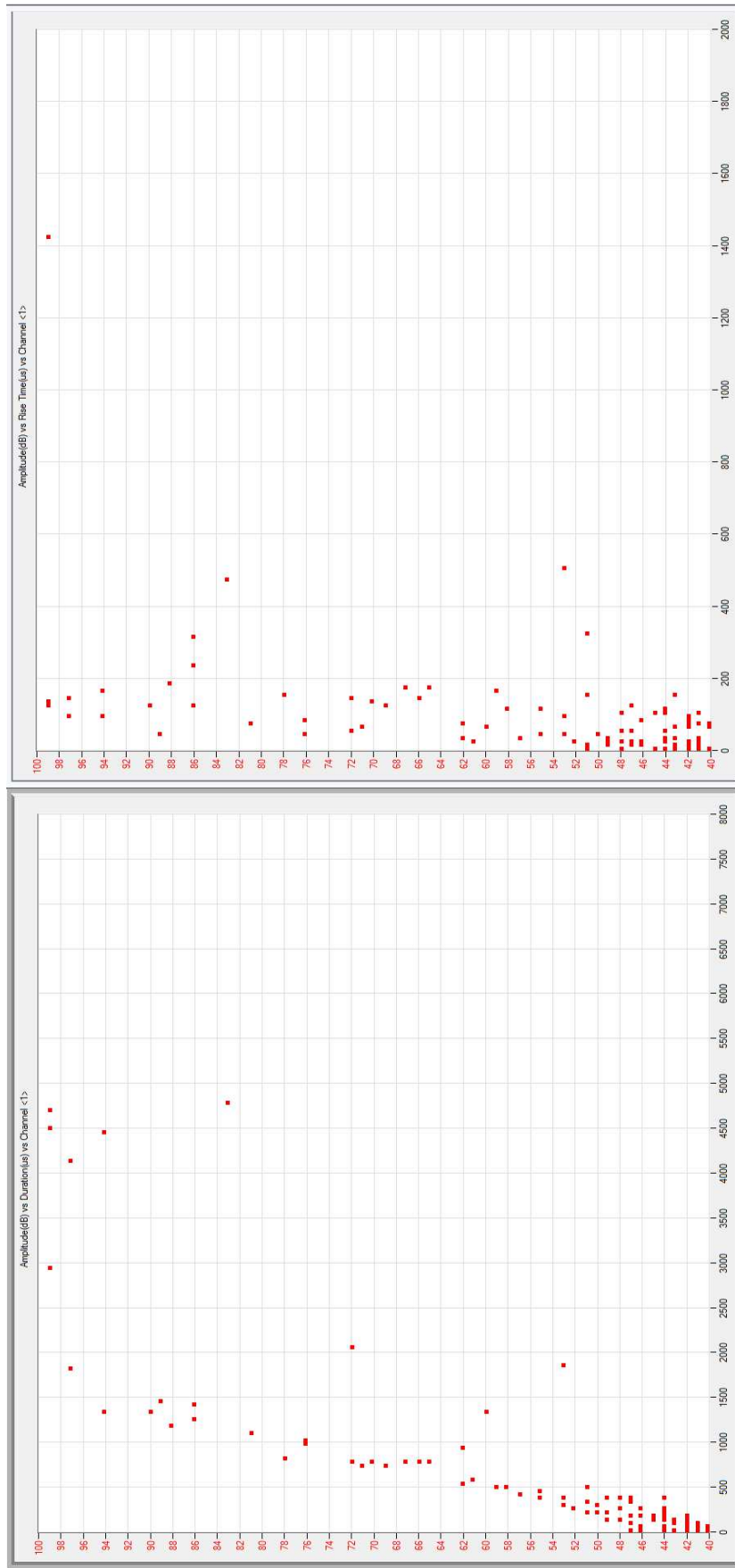
ID	DDD	HH:MM:SS.mmmuuu	CH	AMP	C-FRQ	P-FRQ
128	0	00:00:00.0000000				
Acquisition Running						
ID	DDD	HH:MM:SS.mmmuuu	CH	AMP	C-FRQ	P-FRQ
1	0	00:00:07.6901797	1	60	135	99
1	0	00:00:07.6901797	2	61	126	101
ID						
* Gp# 5[1,2] x = 400.0, y = 0 dt[0]						
ID	DDD	HH:MM:SS.mmmuuu	CH	AMP	C-FRQ	P-FRQ
1	0	00:00:15.1589895	1	66	130	92
1	0	00:00:15.1590375	2	56	135	99
ID						
* Gp# 5[1,2] x = 302.0, y = 0 dt[48]						
ID	DDD	HH:MM:SS.mmmuuu	CH	AMP	C-FRQ	P-FRQ
1	0	00:00:23.9216355	2	72	130	114
1	0	00:00:23.9216890	1	66	144	101
1	0	00:00:23.9472247	2	64	129	126
ID						
* Gp# 5[2,1] x = 509.2, y = 0 dt[54]						
ID	DDD	HH:MM:SS.mmmuuu	CH	AMP	C-FRQ	P-FRQ
1	0	00:00:23.9472807	1	60	152	117
ID						
* Gp# 5[2,1] x = 514.3, y = 0 dt[56]						
ID	DDD	HH:MM:SS.mmmuuu	CH	AMP	C-FRQ	P-FRQ
1	0	00:00:31.8944940	1	60	135	92
1	0	00:00:31.8945950	2	53	147	159
1	0	00:00:31.8973140	1	55	142	92
1	0	00:00:31.8974350	2	49	157	106
1	0	00:00:43.9254110	2	70	131	100
1	0	00:00:43.9255117	1	52	154	112
1	0	00:00:52.3009537	1	76	136	111
1	0	00:00:52.3010275	2	58	157	158
ID						
* Gp# 5[1,2] x = 249.5, y = 0 dt[74]						
ID	DDD	HH:MM:SS.mmmuuu	CH	AMP	C-FRQ	P-FRQ
1	0	00:01:07.2275337	2	74	141	155
1	0	00:01:07.2275640	1	71	129	91
1	0	00:01:07.2556580	2	66	140	106
ID						
* Gp# 5[2,1] x = 461.7, y = 0 dt[30]						
ID	DDD	HH:MM:SS.mmmuuu	CH	AMP	C-FRQ	P-FRQ
1	0	00:01:07.2556885	1	65	136	86
1	0	00:01:07.2975747	1	47	178	0
ID						
* Gp# 5[2,1] x = 462.2, y = 0 dt[31]						
15	407	05:26:12.0888317				
Acquisition Aborted						

Anexo IV. Correlações Amplitude vs Duração (μ s) e Amplitude (dB) vs Tempo de subida (μ s)

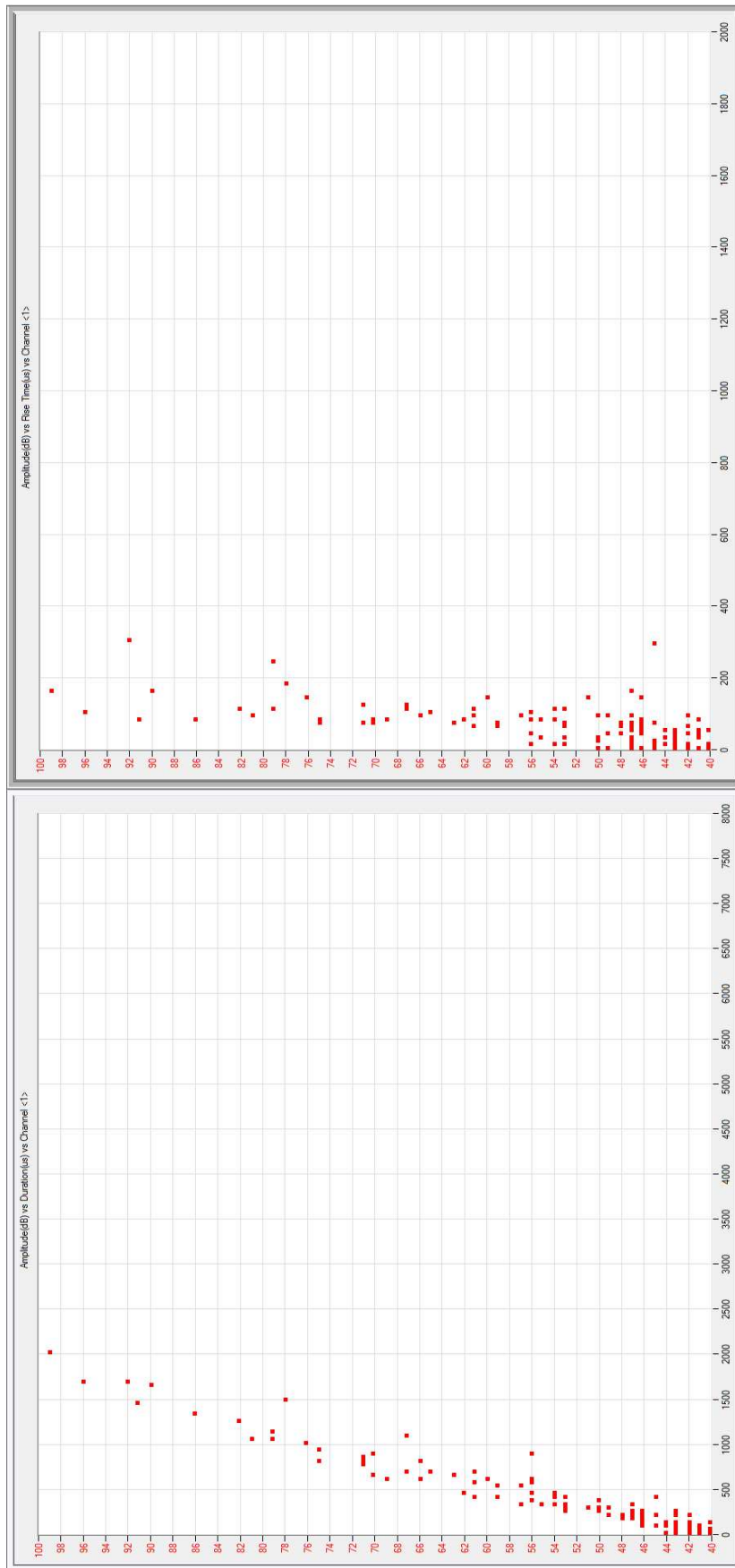
Sensibilidade & Atenuação



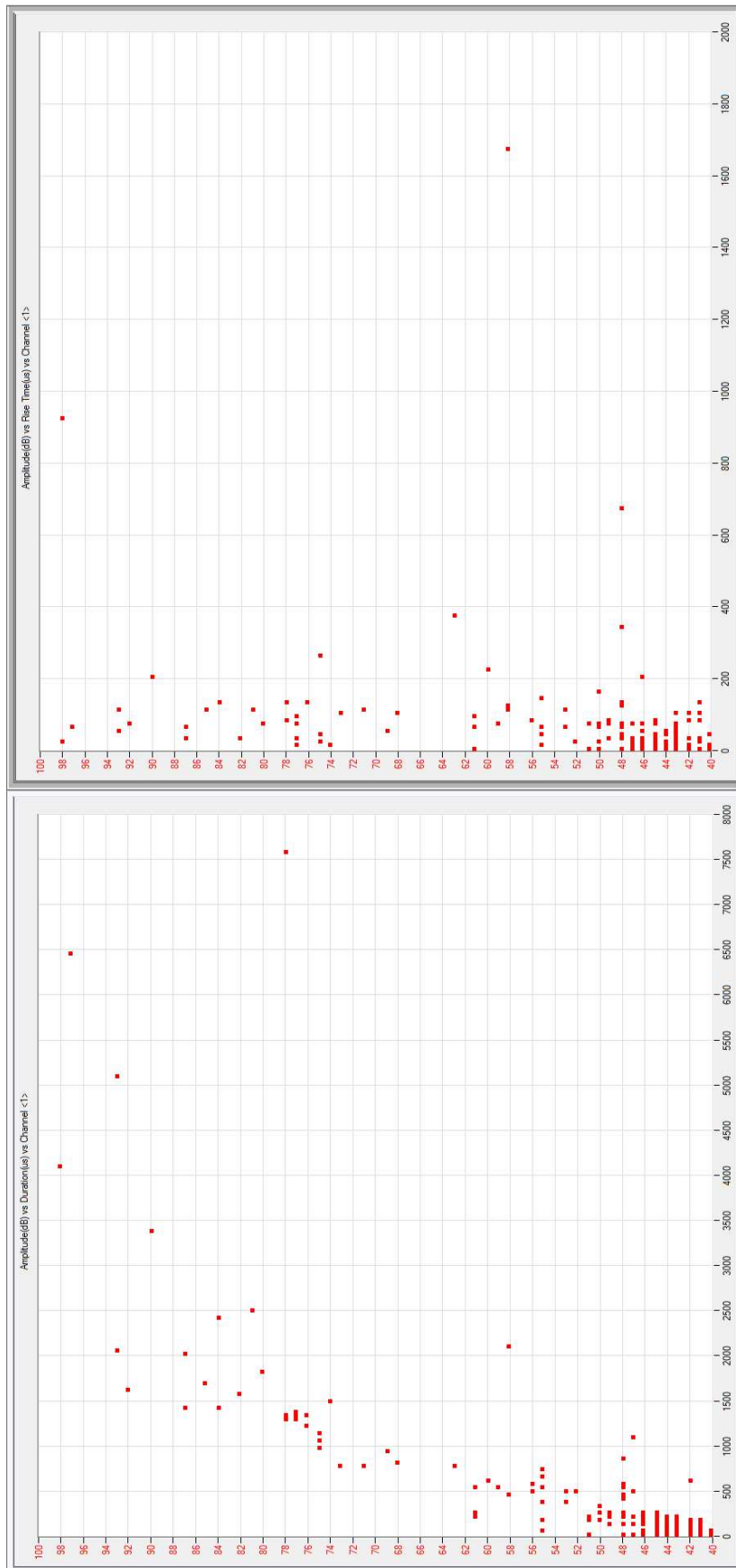
5° Teste



6° Teste

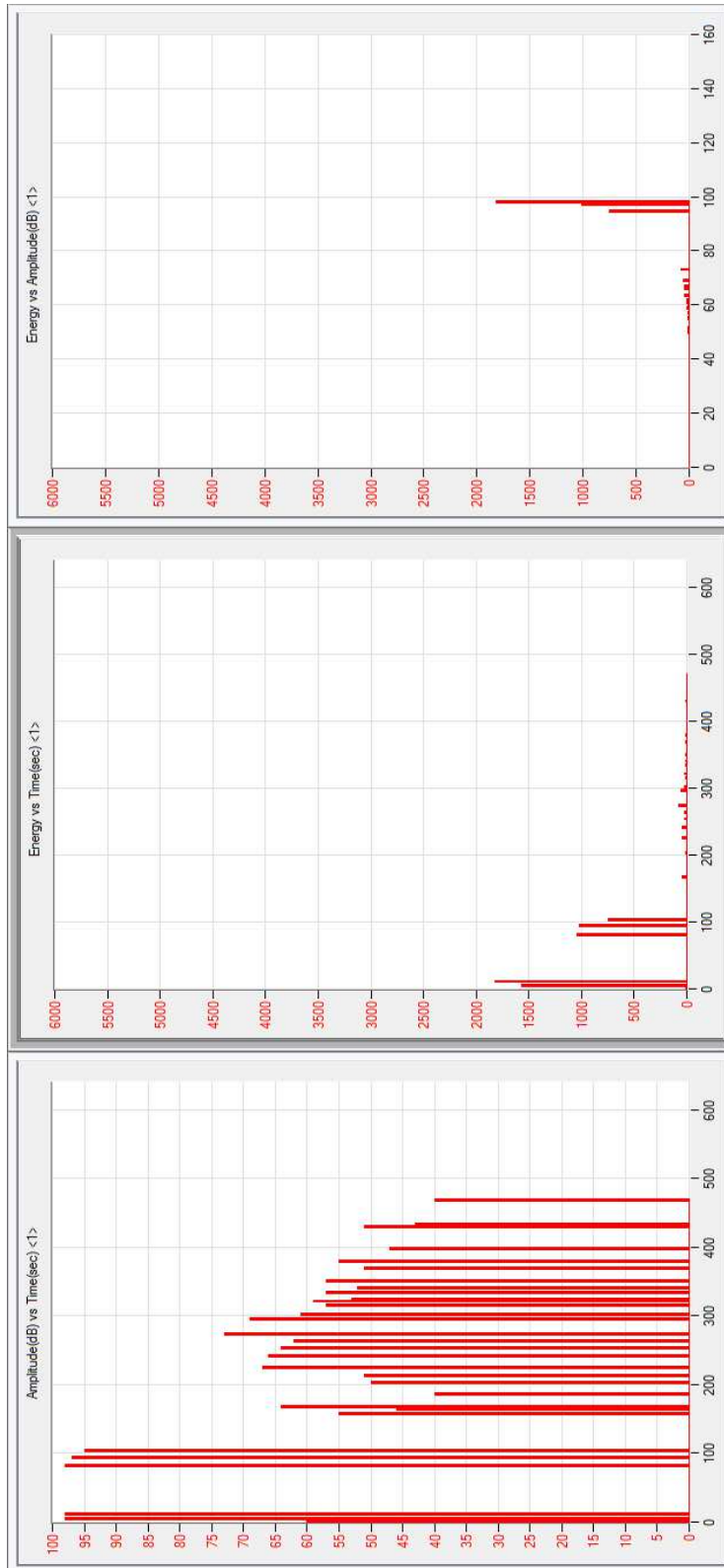


8° Teste

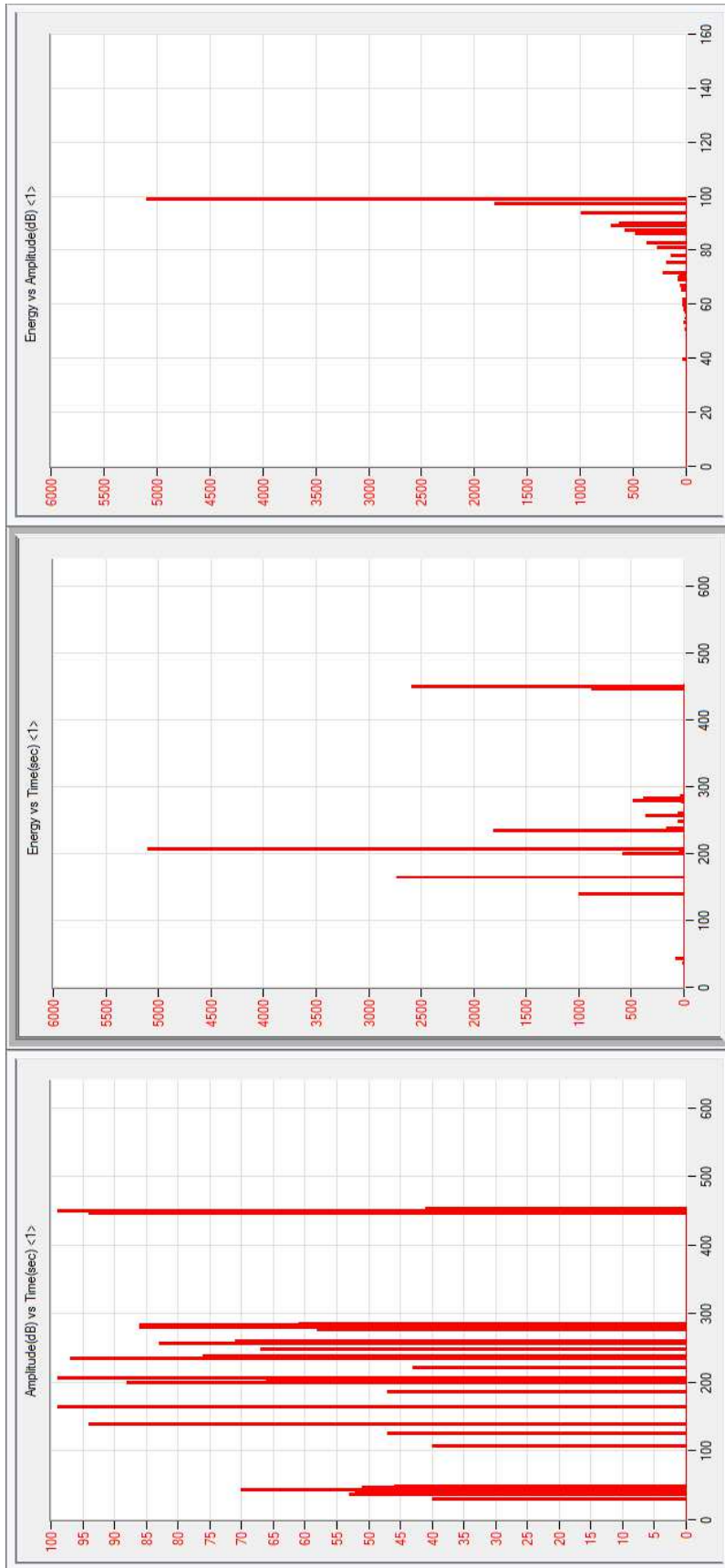


Anexo V. Tendências Energia vs Tempo e Amplitude vs Tempo e Correlação Energia vs Amplitude

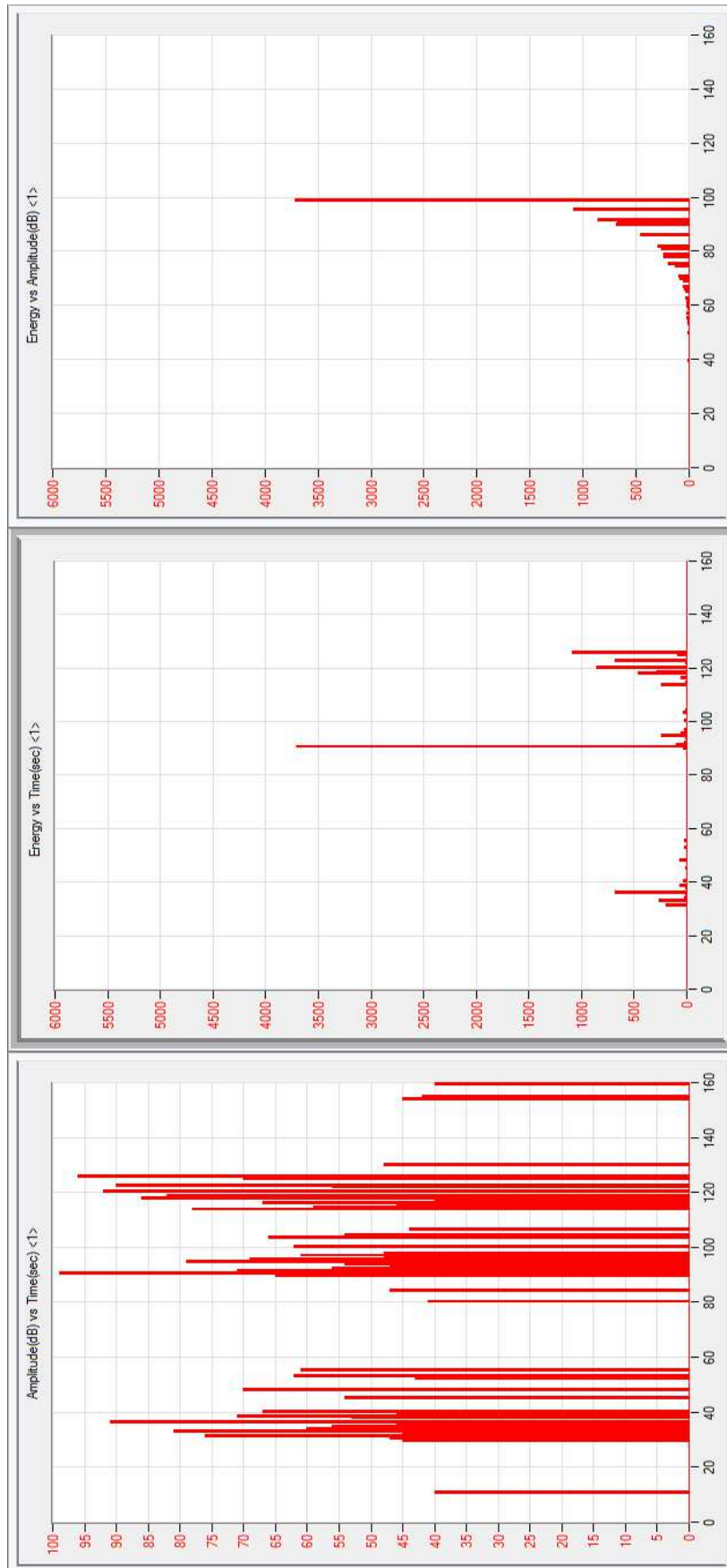
Sensibilidade & Atenuação



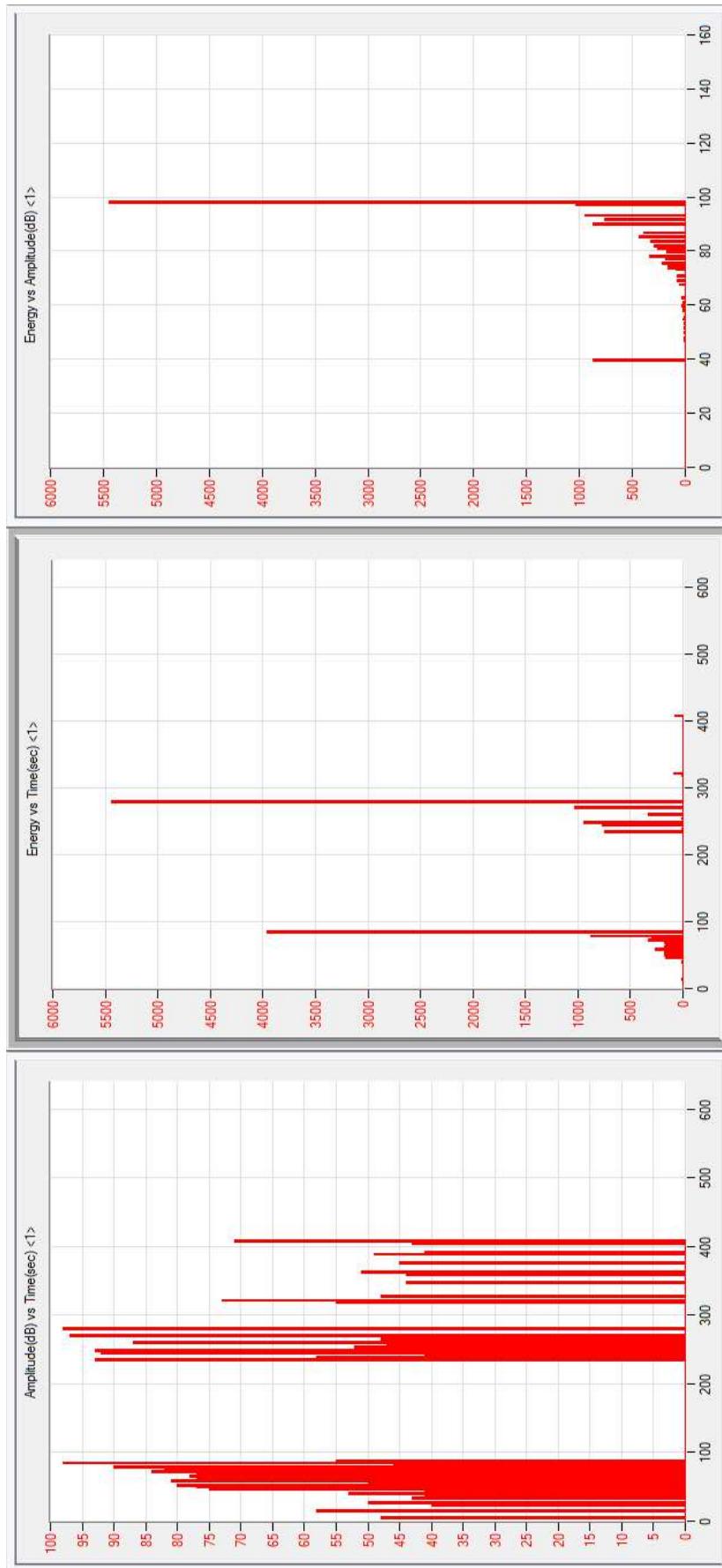
5° Teste



6° Teste



8° Teste



Anexo VI. Tendência Amplitude vs Tempo do 8º Teste

