



M 2017



Análise de técnicas de ensaios não destrutivos para avaliação da integridade de ativos

HUGO JOSÉ MENESES CARVALHO

DISSERTAÇÃO DE Mestrado APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

CANDIDATO	Hugo José Meneses Carvalho	Código	201206066
TÍTULO	<i>Análise de técnicas de ensaios não destrutivos para avaliação da integridade de ativos</i>		
DATA	14 de julho de 2017		
LOCAL	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Sala F106 15:15h		
JÚRI	<u>Presidente</u>	Professora Doutora Laura Maria Melo Ribeiro	DEMM/FEUP
	<u>Arguente</u>	Professor Doutor Luís António de Andrade Ferreira	DEM/FEUP
	<u>Orientador</u>	Professora Doutora Filomena Maria da Conceição Viana	DEMM/FEUP

Agradecimentos

A conclusão desta etapa não teria sido possível sem o apoio de várias pessoas, pelo que sinto a necessidade de exprimir a minha gratidão a todos os que me ajudaram a cumprir os meus objetivos.

Um obrigado à minha orientadora na Faculdade, Professora Doutora Filomena Maria da Conceição Viana, pela motivação, apoio e tempo disponibilizado, essenciais para realização desta dissertação.

Agradeço também ao Engenheiro Hélder Araújo pela oportunidade de realizar a dissertação em ambiente empresarial e pela sua disponibilidade para me orientar na empresa. Um obrigado a todos os colaboradores da EQS, particularmente à equipa de desenvolvimento e equipa técnica por todo o apoio e disponibilidade.

Resta-me agradecer a todos os amigos que me acompanharam ao longo destes cinco anos, por todos os bons momentos e todo o apoio, que facilitaram a conclusão deste curso.

Por último, agradeço à minha família e à minha namorada, por toda a motivação, paciência e apoio prestados ao longo destes últimos cinco anos, indispensáveis para a realização deste trabalho.

Muito obrigado.

Resumo

O principal objetivo desta dissertação foi estudar os métodos de ensaios não destrutivos utilizados na detecção de defeitos causados por processos de corrosão. Após a identificação dos principais tipos de defeitos associados aos diferentes mecanismos de corrosão, foi efetuada uma pesquisa de sondas e sistemas indicados para a sua detecção e caracterização. O trabalho focou-se na detecção de defeitos do tipo perda de espessura que são os que mais afetam os equipamentos da indústria química e petroquímica.

Inicialmente são abordados os principais processos de corrosão que afetam os equipamentos deste tipo de indústria. Para cada um dos principais processos de corrosão foram identificados os fatores que mais influenciam a taxa de corrosão, bem como o tipo de equipamentos afetados, formas de prevenção e as técnicas mais utilizadas para detetar e monitorizar a evolução dos danos.

Foi estudado em detalhe o modo de propagação das ondas sonoras nos materiais, de forma a facilitar a compreensão dos ensaios por ultrassons utilizados para a medição de espessura e nas ondas guiadas. Através desse estudo foi possível ficar a conhecer as principais técnicas de ensaios não destrutivos acústicas. Foi também estudado o funcionamento das sondas para medição de espessura. Podem ser utilizadas sondas piezoelétricas e EMAT para a emissão e detecção dos ultrassons. Dentro deste tema apresentam-se exemplos práticos da utilização de um medidor de espessuras, assim como uma inspeção por ultrassons convencionais.

Os testes realizados com um equipamento de ondas guiadas desenvolvido pela EQS™ também são apresentados. Estes testes foram realizados num tubo de calibração utilizando ultrassons com diferentes frequências, tendo permitido concluir que os ultrassons com frequências mais altas têm maior sensibilidade.

Palavras-Chave: Corrosão, ensaios não destrutivos, ultrassons, ondas guiadas, sondas piezoelétricas, sondas EMAT.

Abstract

The main purpose of this thesis was to study non-destructive testing methods used to detect defects caused by corrosion processes. After the identification of the main types of defects associated with the different corrosion mechanisms, the probes and systems indicated for their detection were identified. The work is focused on the detection of thickness-loss defects, which affect equipment's of the chemical and petrochemical industry.

The main corrosion processes that affect the equipment of this type of industry are described, indicating the factors that most affect the corrosion rate as well as some prevention techniques. For each of the major corrosion processes, the types of equipment affected and the techniques used to detect and monitor the damage evolution were identified.

The mode of propagation of sound waves in the materials was studied in detail, in order to facilitate the understanding of the ultrasonic tests used for the detection of thickness-loss defects, using thickness measuring equipment and guided waves techniques. Through this study it was possible to get acquainted with the main techniques of non-destructive acoustic tests.

The probes for measuring thickness were also studied. Piezoelectric and EMAT probes can be used, which employ different technologies for the emission and detection of ultrasound. Within this theme, practical examples of the use of a thickness gauge, and a conventional ultrasonic inspection are presented.

Tests performed with a guided wave equipment developed by EQS™ are also presented. These tests were carried out in a calibration tube using ultrasounds with different frequencies, allowing to conclude that higher frequencies have greater sensitivity.

Key words: Corrosion, non-destructive testing, ultrasounds, guided waves, piezoelectric probes, EMAT probes.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de tabelas	viii
1. Introdução	1
2. Mecanismos de degradação por corrosão.....	3
2.1 Corrosão atmosférica	3
2.2 Corrosão/erosão	6
2.3 Corrosão sob isolamento térmico	8
2.4 Corrosão por condensação.....	11
2.5 Corrosão microbiológica	12
2.6 Corrosão galvânica	14
2.7 Corrosão nos solos	15
2.8 Lixiviação seletiva	17
3. Ultrassons	19
3.1 Características das ondas de ultrassons	19
3.2 Características do feixe de ultrassom	24
3.3.1 Sondas piezoelétricas	29
Constituição da sonda	29
3.3.2 Sondas EMAT (Electromagnetic Acoustic Transducer)	34
4. Casos de estudo	41
4.1 Determinação do perfil de espessuras de um tubo	41
4.2 Ensaio por ultrassons de uma peça fundida.....	44
5. Ondas Guiadas.....	47

5.1 Sondas	48
5.2 Exemplo prático da aplicação das ondas guiadas num tubo de teste	49
5.3 Levantamento do tipo e geometria de defeitos.....	53
6. Conclusões e Trabalhos Futuros	55
7. Referências Bibliográficas	57

Índice de Figuras

Figura 1: Corrosão atmosférica severa de uma tubagem de gás próxima de uma torre de água.	3
Figura 2: Taxa de corrosão de um aço em função da humidade relativa numa atmosfera com SO ₂	4
Figura 3: Na imagem (a) perda de espessura até abertura de um furo, na imagem (b) deterioração de uma turbina.	7
Figura 4: Exemplo de corrosão de uma tubagem à superfície.....	16
Figura 5: Esquema do modo de vibração e propagação de uma onda (a) longitudinal e (b) transversal [2].	20
Figura 6: Movimento de oscilação das partículas numa onda Rayleigh [6].	21
Figura 7: Esquema do modo de vibração das ondas de Lamb [5].	21
Figura 8: Esquema do modo de propagação das ondas torcionais [8].	22
Figura 9: Modo de conversão de uma onda longitudinal [9].	23
Figura 10: Na imagem a) interferência de duas ondas em fase, na imagem b) interferência de duas ondas desfasadas [11].	24
Figura 11: Esquema da representação do campo próximo (near field) e campo afastado (far field) de um feixe de ultrassons [11].	25
Figura 12: Representação esquemática da dispersão de um feixe de ultrassons [11].	26
Figura 13: a) Desenhos esquemáticos de uma peça com duas descontinuidades (B e C) e redução de espessura (A); (b), representação do A-Scan das reflexões do feixe de ultrassons nessas descontinuidades [12].	27
Figura 14: a) esquemas de dois defeitos (B e C) e uma secção de menor espessura (A); b) B-Scan das descontinuidades [12].	28
Figura 15: a) percurso de varrimento de uma sonda de imersão; b) C-Scan da inspeção [13].	28
Figura 16: Representação dos componentes que constituem as sondas de ultrassons mono e duplo cristal e respetiva direção de formação do feixe [14].	30
Figura 17: Orientação dos dipolos antes, durante e após a polarização [17].	31
Figura 18: Esquema do posicionamento dos elétrodos nas superfícies de um cristal piezoelétrico [18].	32

Figura 19: Relação entre a polaridade da tensão aplicada e a deformação do cristal [18].	32
Figura 20: Relação entre as espessuras do cristal e da membrana em função do comprimento da onda, λ [10].	33
Figura 21: a) esquema da constituição e b) funcionamento de uma sonda EMAT [24].	35
Figura 22: Efeito da magnetostricção na dimensão dos materiais [26].	36
Figura 23: Esquema do funcionamento de uma sonda EMAT magnetostritiva [26].	36
Figura 24: Mecanismo de formação de ultrassons, na esquerda através de forças de Lorentz e na direita por magnetostricção [27].	37
Figura 25: Diferentes configurações dos ímanes e bobines das sondas EMAT [24].	37
Figura 26: Diferentes tipos de sondas EMAT [28].	38
Figura 27: Verificação do estado de calibração do equipamento e da sonda.	41
Figura 28: Esquema representativo das posições da sonda para cada medição.	42
Figura 29: Gráfico representativo do perfil de espessuras do tubo.	43
Figura 30: Localização da medição 3 e quatro no eixo 1 (vista de cima).	43
Figura 31: Peça produzida por fundição para moinho de açúcar.	44
Figura 32: Representação da superfície de inspeção e sonda utilizada.	45
Figura 33: Representação do ecrã do equipamento de ultrassons com a reflexão de um defeito.	45
Figura 34: Representação da área do defeito encontrado.	46
Figura 35: Posição vertical do defeito encontrado.	47
Figura 36: Esquema da inspeção de um tubo por ondas guiadas [29].	48
Figura 37: Na imagem a) uma fita magnetostritiva e na imagem b) uma bobine por cima da fita.	49
Figura 38: Esquema do tubo de teste para ondas guiadas.	50
Figura 39: Fotografias das zonas do tubo que podem gerar sinais nas ondas guiadas. a) tubo soldado, b) furo não passante, c) soldadura, d) suporte.	51
Figura 40: Resultados dos testes realizados ao sistema de ondas guiadas.	52
Figura 41: Entalhe circunferencial na superfície externa.	53
Figura 42: Entalhe maquinado com comprimento axial variável.	54
Figura 43: Representação de um defeito artificial elipsoidal.	54

Índice de tabelas

Tabela 1: Valor das medições efetuadas de 600 em 600 mm nas quatro posições do tubo.	42
Tabela 2: Dimensão dos defeitos elipsoidais.	55

1. Introdução

O presente documento foi realizado com o intuito de obter o grau de mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, tendo como principal objetivo estudar a degradação dos materiais por processos de corrosão, identificando os principais tipos de defeitos, sondas e sistemas utilizados na sua detecção. Sendo o principal foco a detecção de defeitos do tipo perda de espessura, que afetam os equipamentos da indústria química e petroquímica. O conhecimento, tanto dos princípios da corrosão quanto da proteção anticorrosiva, apresenta-se como uma forma de diminuir as falhas inesperadas dos equipamentos em serviço. Além dos problemas de cariz económico criados por estas falhas, existem problemas ainda mais graves relacionados com danos a pessoas ou até mesmo com a perda de vidas humanas e contaminação ambiental.

Este trabalho foi desenvolvido em ambiente empresarial, na EQS (Engenharia Qualidade e Segurança), uma empresa vocacionada a inspeção de ativos em instalações industriais, através da aplicação de técnicas de ensaios não destrutivos. A conceção deste trabalho teve em vista integrar a equipa de desenvolvimento da EQS para o desenvolvimento de sondas para monitorização de espessura de equipamentos em serviço.

Inicialmente são abordados os principais processos de corrosão que afetam os equipamentos deste tipo de indústria, com base nos mecanismos descritos na norma API 571-2011 “*Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry*” [1]. Foram estudados os mecanismos de degradação responsáveis pela perda de espessura localizada e generalizada, incluindo a corrosão atmosférica, corrosão por erosão, corrosão sob isolamento térmico, corrosão por condensação, corrosão microbiológica, corrosão pelo solo, lixiviação seletiva, grafitação e corrosão galvânica. Para cada um destes mecanismos de degradação foram descritas as condições e combinações específicas, sob as quais ocorrem cada um dos mecanismos de degradação dos materiais, as variáveis que influenciam a taxa de corrosão, bem como, o tipo de equipamentos afetados, formas de prevenção e as técnicas mais utilizadas para detetar e monitorizar os defeitos provocados por cada mecanismo de degradação.

Torna-se relevante, em função dos materiais e mecanismos de degradação envolvidos, um estudo aprofundado sobre as técnicas de ensaios não destrutivos mais indicadas para cada cenário. A definição de ensaios não destrutivos é a inspeção de um material de qualquer tipo, tamanho ou forma, sem lhe causar qualquer tipo de alteração. Estes ensaios permitem detectar, avaliar e dimensionar discontinuidades, detectar fugas, medir dimensões, caracterizar estruturas e estimar propriedades mecânicas. A crescente procura da melhoria do desempenho e redução do tempo de inatividade devido a acidentes e/ou operações de manutenção, o aumento da fiabilidade e o prolongamento da vida útil de equipamentos, produtos, estruturas e sistemas de engenharia, tem motivado a inovação e desenvolvimento de técnicas de ensaio não destrutivo para caracterizar os danos, avaliar o tempo de vida remanescente de componentes e prevenir a ocorrência de falhas.

O segundo tema abordado neste documento são os ultrassons, em que são descritos os diferentes modos de propagação de ondas ultrassónicas e a forma como se comportam quando atingem a interface de dois meios com diferente impedância acústica, as características do feixe de ultrassons e diferentes modos de representação das ondas dos equipamentos de ultrassons convencionais e medidores de espessura. Depois de conhecer os diferentes tipos de ondas e características, foram estudados os diferentes tipos de sondas que produzem e detetam os ultrassons, focando nas sondas utilizadas para medição de espessura. O modo de funcionamento dos diferentes tipos de sondas (piezoelétricas e EMAT) e os diferentes componentes que as constituem são descritos.

As longas linhas de tubagem presentes na indústria do processo, os tubos de equipamentos sob pressão, entre outros equipamentos críticos, estão sob condições altamente corrosivas, pelo que o aparecimento e avanço da corrosão tem de ser monitorizado através de inspeções periódicas. A técnica mais utilizada para a inspeção de tubagens de longo comprimento, ou até subterradas, é a técnica de ondas guiadas. O último tema a ser abordado neste documento é sobre o princípio da técnica de ondas guiadas, a tecnologia utilizada na emissão e deteção destas ondas. São também discutidos resultados de testes realizados a um tubo com defeitos conhecidos.

2. Mecanismos de degradação por corrosão

Os mecanismos de degradação por corrosão que foram estudados neste trabalho correspondem aos mecanismos de corrosão expressos na norma API RP 571-2011 [1], com o título “*Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry*”, no capítulo sobre perda de espessura generalizada ou localizada.

2.1 Corrosão atmosférica

É um tipo de corrosão que ocorre através da reação dos materiais com gases atmosféricos. Para além do azoto e do oxigénio, o ar é ainda composto por outros gases que podem provocar corrosão, como o dióxido de carbono e o vapor de água. A presença de humidade acelera os processos corrosivos pois a dissolução de sais ou gases ácidos, forma um eletrólito fortemente corrosivo. A temperatura de operação do equipamento sujeito à corrosão também tem bastante influência no processo corrosivo. Na Figura 1 apresenta-se um exemplo de corrosão atmosférica generalizada numa tubagem de gás próxima de uma torre de água.



Figura 1: Corrosão atmosférica severa de uma tubagem de gás próxima de uma torre de água.

Um dos fatores mais importantes a ter em conta na corrosão atmosférica é a composição química da própria atmosfera, incluindo o seu teor de humidade e a presença de gases como o SO_2 , CO_2 , NO_x , NH_3 , H_2S .

Quando o ar é “puro” a humidade relativa do ar não afeta significativamente a corrosão. Contudo, na presença de SO_2 a taxa de corrosão dos aços aumenta

exponencialmente com o aumento da humidade, como se pode verificar na Figura 2 [1, 2].

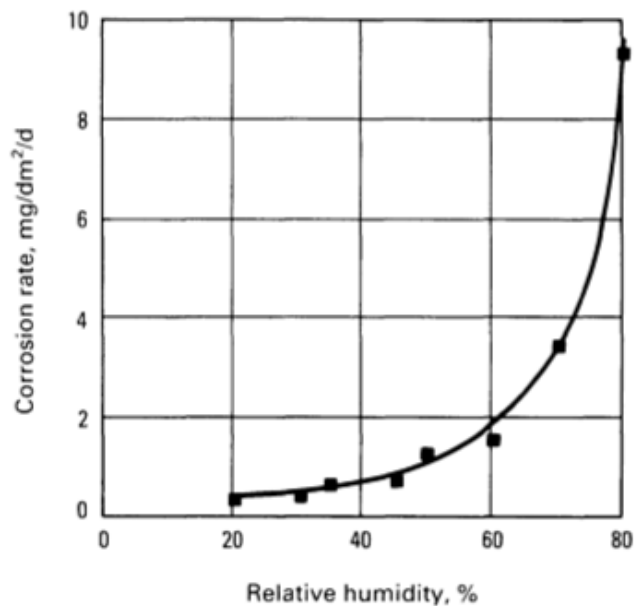


Figura 2: Taxa de corrosão de um aço em função da humidade relativa numa atmosfera com SO₂.

O dióxido de carbono dissolve-se na água formando ácido carbónico (H₂CO₃), o que pode levar à redução do pH da água até 4, contribuindo para que o ambiente se torne consideravelmente mais corrosivo. Assim, a condensação do vapor água na superfície dos materiais em presença de dióxido de carbono provoca uma corrosão uniforme ou por picadas. A principal fonte de dióxido de carbono na atmosfera tem origem na combustão de combustíveis fósseis.

O dióxido e trióxido de enxofre têm origem na combustão de combustíveis contendo compostos de enxofre e nas emissões de vulcões. Quando estes óxidos de enxofre reagem com partículas de água na atmosfera, formam ácido sulfuroso (H₂SO₃) e ácido sulfúrico (H₂SO₄). Estes ácidos são muito agressivos para vários metais, como por exemplo: ferro, zinco, níquel, cobre, alumínio, entre outros.

Os óxidos de azoto podem ter origem na natureza através de microrganismos, na combustão de combustíveis fósseis e em alguns fertilizantes. Podem ser formados quatro tipos de óxidos de azoto na atmosfera N₂O, NO, NO₂ e N₂O₄, contudo apenas o NO₂ tem influência no processo de corrosão. O dióxido de azoto dissolve-se na água, formando ácido nítrico (HNO₃) que é um ácido muito corrosivo.

A amónia (NH_3) pode ser formada através da redução de NO_x , existente nos fertilizantes ou em plásticos. Ao dissolver-se na água dá origem a soluções alcalinas de amónia. Estas soluções funcionam como inibidores da corrosão nos aços e ferros fundidos, contudo são bastante agressivas para as ligas de cobre e de zinco.

Os sulfuretos de hidrogénio (H_2S) são encontrados, por exemplo, na indústria petrolífera. Pequenas concentrações deste gás na atmosfera provoca a formação de sulfuretos que escurecem a superfície do cobre (CuS e Cu_2S) e da prata (Ag_2S).

A humidade é, por isso, um fator preponderante na maior parte dos mecanismos de corrosão enumerados. Segundo Alec Groysman [2] existem quatro mecanismos de corrosão atmosférica em função do tempo, da humidade e da espessura do filme de água na superfície do metal. O primeiro mecanismo de corrosão atmosférica ocorre na ausência de uma camada de água na superfície do material, a oxidação que ocorre por exposição dos materiais ao oxigénio do ar. O segundo mecanismo ocorre na presença de uma fina camada de água na superfície do material impossível de observar a olho nu. O terceiro mecanismo ocorre na presença de uma camada de água visível a olho nu, resultante de chuvas ou da condensação do vapor de água. O quarto e último mecanismo ocorre em equipamentos isolados da atmosfera exterior, quando vapores contendo gases corrosivos e sais condensam na superfície interna de estruturas metálicas [2].

Alguns materiais são muito resistentes à corrosão atmosférica, pois reagem com o oxigénio do ar formando uma camada de óxido protetor que forma uma barreira entre a atmosfera e o material. Para este tipo de barreira à corrosão ser eficiente, os óxidos formados têm de ter algumas características como uma boa adesão ao metal e não podem ser porosos. Alguns dos materiais com estas características são o aço inoxidável, devido à camada de CrO_2 muito resistente na superfície do material, e o alumínio que também gera uma camada protetora de Al_2O_3 .

Todo o tipo de equipamentos com a superfície metálica exposta à atmosfera e com uma temperatura de operação suficientemente baixa para permitir a condensação de humidade na superfície pode ser afetado por este tipo de corrosão. Equipamentos pintados ou com revestimentos protetores em más condições, ou sujeitos a ciclos térmicos, e tubagens suspensas ou apoiadas em suportes são muito suscetíveis a este

tipo de corrosão devido ao aprisionamento de água entre o tubo e respectivos suportes [1].

Antes de planejar os métodos de prevenção para a ocorrência deste modo de corrosão é preciso conhecer a agressividade da atmosfera a que o equipamento estará exposto. Podem ser aplicados vários tipos de revestimentos para aumentar a resistência à corrosão atmosférica, atuando como uma barreira entre o material e a atmosfera envolvente. Os revestimentos eletrolíticos de ouro, prata, níquel e cromo melhoram consideravelmente a resistência à corrosão atmosférica, contudo alguns destes filmes são porosos e suscetíveis a danos mecânicos e de elevado preço. Os revestimentos de zinco e alumínio são muito eficazes no controle da corrosão em várias atmosferas, contudo o zinco não é resistente ao H_2S , neste caso um revestimento de alumínio será muito mais eficaz.

2.2 Corrosão/erosão

O impacto repetido de partículas sólidas duras, transportadas por um gás ou líquido, a elevada velocidade causam a deformação e corte de material. Este tipo de desgaste é muito frequente em canalizações de instalações mineiras ou petrolíferas.

A corrosão/erosão ocorre quando a erosão contribui para a corrosão, por exemplo, quando os líquidos de transporte são quimicamente agressivos (contendo HCl , H_2S , CO_2 , O_2). O metal é removido da superfície através da dissolução química, processo corrosivo, e através do arrastamento das partículas metálicas. Este tipo de corrosão é mais grave em zonas em que o fluxo do líquido muda de direção, como curvaturas nos tubos, ou noutras zonas que se opõem ao movimento do líquido, como em pás de turbinas. A taxa de remoção de material depende da velocidade e concentração das partículas sólidas, da dureza e dimensão dessas partículas, da composição do líquido e das características dos materiais sujeitos à degradação.

Materiais mais macios, como as ligas de cobre e de alumínio, são mais suscetíveis à erosão, pois têm baixa resistência ao desgaste, estando assim sujeitos a elevadas perdas de material. Aumentar a dureza do material melhora a sua resistência ao desgaste, mas nem sempre é a melhor solução, principalmente em ambientes corrosivos. O aumento da corrosividade do meio, como a temperatura e o pH, reduz a estabilidade dos filmes protetores e aumenta a suscetibilidade à perda de material por ataque químico e remoção dos produtos de corrosão da superfície do material.

Na Figura 3 encontram-se representadas duas imagens representativas de corrosão assistida por erosão [1, 3].



Figura 3: Na imagem (a) perda de espessura até abertura de um furo, na imagem (b) deterioração de uma turbina.

Todo o tipo de equipamentos expostos ao movimento de líquidos estão sujeitos a corrosão/erosão. Os equipamentos mais suscetíveis são as tubagens, particularmente nas curvas. Outros equipamentos afetados são as válvulas, bombas, tubagens de permutadores de calor e caldeiras, pás de turbinas. O principal defeito causado por este tipo de corrosão é a perda de espessura localizada que pode conduzir à abertura de furos [1].

As formas de prevenir ou reduzir a corrosão por erosão baseiam-se em alterações geométricas dos equipamentos e na seleção adequada dos materiais. Aumentando o diâmetro dos tubos para reduzir a velocidade do fluído, diminuindo o ângulo de curvatura nas mudanças de direção para reduzir o impacto das partículas na parede do tubo, selecionando um material com boa resistência ao desgaste e à corrosão e aumentando a espessura da parede do tubo. A proteção catódica, em alguns casos, também pode melhorar a resistência do material ao desgaste [1, 3].

A corrosão por erosão pode ser detetada por qualquer técnica com a capacidade de medir variações de espessura. Como este tipo de corrosão afeta principalmente tubagens, as técnicas mais adequadas são, por exemplo, ondas guiadas para zonas de difícil acesso ou determinar o perfil de espessuras do tubo, com medidores de espessura por ultrassons. Quando se pretende fazer inspeção a muitas séries de tubos, como os permutadores de calor, são utilizadas técnicas com um tempo de

inspeção mais reduzido como as correntes induzidas, IRIS (*Internal Rotary Inspection System*), ou *pulse reflectometry*.

2.3 Corrosão sob isolamento térmico

Este tipo de corrosão resulta do aprisionamento de água entre a superfície do tubo e o isolamento térmico. Como os metais têm uma condutividade térmica elevada, o isolamento térmico das tubagens tem a função de reduzir perdas térmicas dos fluídos, proteger os operadores das altas temperaturas, controlar a temperatura do processo químico e prevenir a condensação de vapor na superfície do equipamento, se este estiver uma temperatura abaixo do ponto de orvalho do ambiente.

Apesar de todas as vantagens da utilização de isolamento térmico, este cria condições muito favoráveis para ocorrência de corrosão localizada. Os principais fatores que influenciam este processo de corrosão são as variações de temperatura, o material do isolamento, o material do tubo, o revestimento anticorrosivo aplicado e a proteção contra a chuva.

Os isolamentos térmicos são utilizados em equipamentos que trabalham a baixas ou altas temperaturas. Os revestimentos para baixas temperaturas podem ser espumas de poliuretano, poliestireno, elastómeros, resinas fenólicas, algodão, madeira, cortiça, entre outros. Os revestimentos para altas temperaturas podem ser lã mineral, fibra de vidro, espuma de vidro, entre outros. Os isolantes, tanto para baixas temperaturas como para altas temperaturas, são materiais geralmente porosos, pois, estes têm uma condutividade térmica reduzida. No entanto, essa porosidade facilita a absorção de humidade e, alguns desses materiais, quando absorvem água podem reduzir consideravelmente o pH da água e aumentar o teor de cloretos; a espuma fenólica e de poliuretano podem diminuir o pH de 7 para 4,3 ou até 2,2, o poliuretano é também uma fonte de cloretos e brometos que aceleram a cinética de corrosão.

Quando a água se encontra no estado gasoso, não tem grande influência na corrosão. O processo de corrosão tem início quando a água condensa na superfície do material, cumprindo assim as condições eletroquímicas para a ocorrência de corrosão. As principais fontes de humidade no isolamento térmico são a chuva e as fugas, quando a temperatura de operação do equipamento baixa subitamente devido a paragens, ou sofre ciclos térmicos abaixo do ponto de orvalho. É impossível impedir que o

isolamento ganhe humidade, mesmo que se consiga evitar a entrada de água do exterior, a água pode condensar no interior do revestimento sempre que este fique abaixo dos 100 °C. A água aprisionada pelo isolamento nunca fica apenas no isolamento, esta vai penetrar até à superfície metálica, ficando aprisionada entre o isolamento e o material [1,3].

Todos os equipamentos com revestimentos térmicos estão sujeitos à corrosão sob isolamento, mesmo que os sistemas de isolamento não aparentem sinais visuais da presença de corrosão.

Os locais mais propícios à ocorrência deste tipo de corrosão são locais onde o isolamento se encontra danificado, em locais onde o revestimento é interrompido (p. ex. interceção de um tubo ou válvula que atravessa o revestimento) e nos limites dos isolamentos. Zonas com anéis de suporte soldados diretamente à parede do equipamento também estão especialmente sujeitos a este tipo de corrosão. Locais onde possa existir uma fuga ou as juntas e revestimentos estejam danificados. Pontos onde a água possa ser naturalmente aprisionada devido à gravidade ou onde os equipamentos estejam sujeitos a vibrações que possam danificar o isolamento e permitir a entrada de água [1].

Uma das formas mais utilizadas para prevenir este modo de corrosão é a utilização de inibidores de corrosão no isolamento, como por exemplo o Na_2SiO_3 . O inibidor utilizado deve ser solúvel em água para alcançar a superfície metálica.

A aplicação de revestimentos protetores na superfície do tubo antes de instalar o isolamento térmico também pode prevenir este tipo de corrosão. Para equipamentos com temperaturas de operação até 120 °C podem ser usados revestimentos de resina epóxi-amina com elevado teor de sólidos, para temperaturas até aos 180 °C usam-se resinas epóxi fenólicas, para equipamentos com temperaturas até aos 200°C os revestimentos epóxi fenólicos reforçado com flocos de vidro são mais apropriados. A espessura média destes revestimentos varia entre os 250 e os 400 µm.

Um correto design do equipamento, um plano de inspeções regulares e uma manutenção apropriada são medidas úteis para a prevenção ou inibição do processo de corrosão sob isolamento. O design do equipamento deve garantir o mínimo de infiltrações de humidade, visto que a medida mais eficaz de prevenção é manter o

isolamento seco. O único tipo de isolamento térmico que não absorve água é a espuma de vidro. O material usado para o isolamento térmico deve também estar protegido do ambiente exterior para evitar danos mecânicos ou da chuva. Os materiais mais utilizados para esta função costumam ser o alumínio, aço aluminizado e aço galvanizado. Ter um plano de inspeções regulares de ensaios não destrutivos permite prevenir a ocorrência de falhas por este processo de corrosão, porque é possível controlar o avanço da corrosão, calcular a taxa de corrosão e estimar o tempo restante de vida do equipamento.

A correta manutenção dos equipamentos também permite evitar falhas. Os sistemas de isolamento são removidos para fazer reparações, no caso de não serem devidamente reinstalados e selados, a infiltração de água e promoverão os processos corrosivos[1, 3].

Como referido anteriormente é conveniente seguir um plano de inspeção bem estruturado e sistemático. O plano de inspeções deve conter a temperatura de operação do equipamento, o tipo e estado do revestimento protetor aplicado e o tipo de material e estado do isolamento utilizado. Inicialmente é feita uma inspeção visual do isolamento para verificar se apresenta sinais de corrosão ou se o vedante está danificado, se há sinais de infiltração de água.

Ainda que o isolamento pareça estar em boas condições, pode ser necessário removê-lo parcialmente ou totalmente para fazer a inspeção. O plano de inspeção dos equipamentos sob isolamento deve incluir a inspeção das áreas mais suscetíveis à ocorrência de corrosão, se esta for detetada, devem ser inspecionadas todas as outras áreas suscetíveis a este tipo de corrosão.

As técnicas de inspeção mais eficientes para controlar o avanço deste tipo de corrosão incluem a remoção do isolamento parcial ou total para inspeção visual, medição da espessura por ultrassons, raios X em tempo real, retrodifusão/retroespalhamento de neutrões (*Neutron backscatter techniques*) para deteção de humidade, correntes induzidas de alta penetração, termografia por infravermelhos e ondas guiadas [1].

2.4 Corrosão por condensação

A corrosão por condensação, também conhecida como corrosão por amoníaco (NH_3), pode afetar todo o tipo de equipamentos sujeitos à condensação de gases com elevado teor de oxigénio, dióxido de carbono e amoníaco dissolvidos. Os equipamentos sujeitos a estas condições são os equipamentos de desgaseificação, linhas de alimentação de água, bombas, caldeiras, entre outros [1]. Este processo de corrosão pode provocar corrosão generalizada ou picadas de corrosão.

A corrosão por condensação deve-se à dissolução de gases como o oxigénio, amoníaco e dióxido de carbono no vapor de água após condensação. O oxigénio dissolvido provoca picadas de corrosão, enquanto o dióxido de carbono dissolvido provoca a corrosão pela formação de ácido carbónico. As variáveis que mais influenciam este processo de corrosão são a concentração de oxigénio e dióxido de carbono, pH, temperatura, tipo de material para o sistema de tratamento da água [2, 3].

A prevenção da corrosão por condensação é realizada através de tratamentos de remoção de oxigénio, que normalmente incluem sulfito de sódio catalisado ou hidrazina (N_2H_4) e processos de desgaseificação.

As caldeiras podem ser protegidas deste processo de corrosão através da deposição e manutenção de uma camada protetora de magnetite (Fe_3O_4). O tratamento químico que controla a camada protetora depositada deve ser de acordo com o sistema de alimentação de água específico a proteger. A corrosão por dióxido de carbono não pode ser controlada por este método, pelo que é necessário aplicar um tratamento inibidor de amina [1].

Um dos métodos utilizados para monitorizar a este processo de corrosão é a análise da água, para garantir que os vários sistemas de tratamento da água estão em boas condições de funcionamento. Os parâmetros controlados para verificar a integridade dos sistemas de tratamento da água são o pH, a condutividade, a concentração em cloro e os sólidos dissolvidos.

O aparecimento de fissuras pode ser detetado através de métodos de ensaios não destrutivos como as partículas magnéticas [1].

2.5 Corrosão microbiológica

A corrosão induzida por microrganismos é um processo de corrosão provocado por organismos como bactérias, algas ou fungos.

Este processo de corrosão ocorre em ambientes em que a água se encontra presente, de forma permanente ou ocasional. Águas estagnadas ou com baixo fluxo promovem o desenvolvimento dos microrganismos em condições extremas, como a falta de oxigênio, com ou sem luz, com elevadas concentrações de NaCl, numa gama de pH de 0 a 12, a temperaturas entre 0 e 100 °C, sob pressões até 1000 bar e na presença de radiação [2].

Os microrganismos prosperam alimentando-se de diferentes nutrientes, nestes nutrientes estão incluídos o carbono, azoto, enxofre, fósforo, amônia e sais inorgânicos. Uma grande quantidade de microrganismos forma um biofilme composto por subprodutos do seu metabolismo, que contribuem para dar consistência ao biofilme e para a aderência à superfície metálica. A forma como os diferentes microrganismos influenciam a corrosão permite ordená-los em cinco grupos: as bactérias que reduzem sulfatos a sulfitos; os microrganismos que produzem ácidos; os que oxidam cátions de ferro (Fe^{2+}) e manganês (Mn^{2+}); as bactérias formadoras de biofilme; e bactérias produtoras de metano e hidrogênio.

As bactérias redutoras de sulfatos a sulfitos são as que estão mais distribuídas pela natureza, existem na água, no solo, no petróleo e em combustíveis, participando no processo de corrosão de materiais como o ferro fundido, aço ao carbono, aços inoxidáveis ferríticos e austeníticos, ligas de cobre e de níquel.

Os microrganismos que produzem ácidos existem principalmente nos solos, estes extraem energia da oxidação do enxofre e compostos de enxofre. A atividade destes microrganismos produz ácido sulfúrico e provoca um aumento na acidez dos solos, podendo chegar a um pH de 0,5. Podem produzir ácido sulfúrico com uma concentração que pode chegar aos 10% em peso, o que é muito corrosivo para metais como o ferro, aços, cobre, alumínio e zinco. Por norma, este tipo de bactéria coexiste com as referidas anteriormente, que reduzem os sulfatos a sulfitos.

As bactérias que oxidam os cátions Fe^{2+} para Fe^{3+} e os iões Mn^{2+} para Mn^{3+} obtêm energia para o seu desenvolvimento desse processo eletroquímico. Os cátions Fe^{3+}

reagem com os aniões OH^- formando hidróxido de ferro $\text{Fe}(\text{OH})_3$ nas próprias bactérias. Por cima do hidróxido de ferro pode ser formada uma camada porosa de tubérculos que vai formar células de arejamento artificial. Por baixo da camada de tubérculos são formadas áreas anódicas que dão origem a picadas de corrosão severas.

As bactérias formadoras de biofilme são heterotróficas, pelo que conseguem desenvolver-se tanto na presença, como na ausência de oxigénio. Estes microrganismos produzem polímeros do seu metabolismo que dão consistência ao biofilme. Influenciando a corrosão de duas formas, através de uma célula de arejamento diferencial (que provoca corrosão localizada) e através da produção de ácido oxálico, lácteo, acético e cítrico.

As bactérias que produzem metano consomem hidrogénio e dióxido de carbono para o seu crescimento. Estes microrganismos consomem a energia proveniente da síntese do metano e usam o hidrogénio produzido pela reação de corrosão catódica, acelerando o processo de corrosão catódica na superfície do material.

Os equipamentos mais afetados por este processo de corrosão são os permutadores de calor, tanques de armazenamento de água, tubagens com água estagnada ou com baixo fluxo e tubagens em contacto com o solo.

Os microrganismos precisam de água para se desenvolverem, sistemas de arrefecimento de água, tanques de armazenamento, permutadores de calor, entre outros, devem ser tratados com biocidas como o cloro, bromo, ozono ou luz ultravioleta. Os biocidas permitem controlar o crescimento dos microrganismos, mas não os eliminam, tornando necessário um tratamento contínuo. Outra forma de controlar este processo de corrosão é aumentar o fluxo dos líquidos aquosos e reduzir as zonas de líquidos estagnados. Os equipamentos que estão em contacto com água apenas durante um curto período de tempo devem ser esvaziados e secos o mais rápido possível. As tubagens subterradas têm sido eficazmente protegidas contra este processo de corrosão com proteção catódica e aplicação de revestimentos anticorrosivos [1,2].

Não existe nenhum método particular que permita avaliar o avanço ou severidade da corrosão induzida por microrganismos. Este é um processo complexo que, por norma,

é avaliado através de conhecimentos conjuntos das áreas da eletroquímica, microbiologia, bioquímica, ciência dos materiais e metalurgia.

A presença deste processo de corrosão pode ser identificada por alguns métodos como a inspeção visual das zonas do equipamento mais propícias à ocorrência deste modo de corrosão. Existem sondas desenvolvidas para identificar incrustações, que podem ser produzidas pela ação dos microrganismos, identificando assim este processo de corrosão [1, 3].

2.6 Corrosão galvânica

É um processo de corrosão que ocorre quando há ligação elétrica (com troca de elétrons) entre dois metais diferentes em contacto com um meio eletrólito. Metais diferentes têm potenciais elétricos diferentes, quando há uma ligação entre estes metais num ambiente eletrólito, a diferença entre os potenciais elétricos produz um fluxo de elétrons de um metal para o outro. O material com menor potencial vai ceder elétrons ao metal com maior potencial, o metal que cede elétrons é o ânodo e vai corroer mais rápido do que o metal que recebe elétrons, o cátodo, que vai ter uma taxa de corrosão muito inferior do que se estivesse sozinho.

Os fatores mais importantes para a ocorrência de corrosão galvânica são a diferença entre os potenciais elétricos, a diferença entre a área do ânodo e do cátodo e a condutividade elétrica da solução/eletrólito. Quanto maior a diferença entre os potenciais eletroquímicos dos dois metais, maior a taxa de corrosão. Quanto menor o rácio da área do ânodo para a do cátodo, maior será a taxa de corrosão. A condutividade elétrica do meio envolvente favorece a taxa da corrosão galvânica.

Os fatores metalúrgicos que influenciam a corrosão galvânica são a composição química e a presença de camadas de óxido superficiais. Os fatores ambientais incluem as características do meio/eletrólito, como a condutividade elétrica, pH, temperatura e volume do eletrólito. Os fatores eletroquímicos consistem na diferença de potenciais entre os metais em contato. Os fatores geométricos incluem a diferença entre a área do ânodo e do cátodo, a distância e tipo de ligação entre eles.

Um exemplo prático e frequente da corrosão galvânica é a que ocorre nos permutadores de calor, devido à diferente constituição dos componentes metálicos

em contacto. Os permutadores de calor são constituídos por vários tubos que estão em contacto com os separadores que servem de suporte para os tubos e obrigam o fluido que passa no interior a mudar de direção, de modo que a diferença de potenciais entre o metal dos tubos e o metal dos suportes provoca a ocorrência de corrosão galvânica [1].

Além disso, as variações térmicas que ocorrem durante o funcionamento dos permutadores de calor podem ativar outros mecanismos de corrosão. O potencial elétrico dos metais pode variar com a temperatura, o suficiente para provocar uma alteração no metal que se comporta como ânodo e no que se comporta como cátodo. Por exemplo, o zinco comporta-se como ânodo em contacto com o ferro num ambiente de água a 25°C, contudo quando a temperatura aumenta para 60-70°C, o zinco passa a comportar-se como cátodo e o ferro como ânodo [1, 3].

A melhor forma de evitar a ocorrência da corrosão galvânica é evitando o contacto direto entre dois metais diferentes. Como isto é praticamente impossível para a maior parte das situações, a única solução é tentar reduzir a severidade deste processo de corrosão. Quando há contacto entre dois metais diferentes, estes devem ter os potenciais o mais próximo possível. A área superficial do ânodo deve ser sempre superior à área superficial do cátodo. O ambiente envolvente deve ser o menos condutor e menos húmido possível [1, 3].

As formas de detetar e controlar o avanço da corrosão galvânica é através da inspeção visual e através de medição de espessura por ultrassons. Este tipo de corrosão acontece muitas vezes por baixo da cabeça dos parafusos e dos rebites.

2.7 Corrosão nos solos

A corrosividade dos solos é influenciada por características do solo como a teor de oxigénio, o teor de humidade (drenagem), o pH do solo, homogeneidade do solo e por características do equipamento subterrado, como a temperatura de operação, tipo de material, tipo de revestimento, propriedades da proteção catódica e tempo de atividade do equipamento.

A corrosividade do solo é estimada através da sua resistividade. A resistividade do solo está relacionada com o teor de humidade e com os sais dissolvidos na água. Quanto maior o teor de humidade, a concentração de eletrólitos e a acidez, maior é

a taxa de corrosão. Quanto maior a temperatura de operação, maior será a taxa de corrosão. À superfície a corrosão é mais severa devido à disponibilidade de oxigênio e humidade, na Figura 4 observa-se a corrosão de um tubo de aço ao carbono, mais intensa na interface solo/ar onde este emerge do solo. Outros fatores que influenciam a corrosão no solo é variação do tipo de solo, células de arejamento diferenciais e a atividade de microrganismos [1] já abordados na descrição de outros mecanismos de corrosão. Os equipamentos subterrâneos também podem ser afetados pela corrosão galvânica.



Figura 4: Exemplo de corrosão de uma tubagem à superfície.

Tal como nos outros mecanismos abordados, o teor de humidade tem um efeito preponderante na corrosão dos solos, estando dependente do clima e do tipo de solo. A heterogeneidade de composição e de estrutura dos solos, provoca a exposição de um componente a diferentes meios, o que pode levar à formação de áreas catódicas e anódicas na superfície do material exposto. Zonas do solo com diferentes concentrações de oxigênio, diferente acidez e diferente concentração de sais dão origem a várias células de corrosão [4].

Todo o tipo de equipamento em contacto direto com os solos, principalmente equipamentos subterrâneos em aço ao carbono e ferro fundido, como por exemplo, tubagens, tanques de armazenamento e outras estruturas metálicas, são suscetíveis de sofrer este tipo de corrosão [3].

O tipo de proteção mais eficiente para diminuir o ataque corrosivo dos solos é a aplicação de revestimentos protetores na superfície dos metais combinada com proteção catódica [1].

Este processo de corrosão provoca perdas de espessura e picadas de corrosão. O estado de degradação do material pode ser estimado através da utilização de eletrodos de referência, para medir o potencial entre o metal e o solo. As técnicas de ensaio não destrutivas que podem ser aplicadas são as técnicas de ultrassons automatizadas, em que os equipamentos se movem no interior do tubo por longas distâncias (centenas de metros) registrando os valores de espessura. Para secções de tubagens mais curtas (até 100 metros) podem ser usadas ondas guiadas [1].

2.8 Lixiviação seletiva

A lixiviação seletiva consiste num mecanismo de corrosão em que um dos constituintes da liga metálica é preferencialmente corroído, deixando a estrutura porosa ou com picadas de corrosão. Este processo de corrosão é influenciado pela composição da liga metálica, temperatura de operação, pH e tempo de exposição. Falhas provocadas por este processo de corrosão ocorrem subitamente, porque nem sempre estão associadas alterações dimensionais [1, 3].

Numa liga metálica os diferentes elementos da liga têm diferentes potenciais químicos, provocando uma heterogeneidade termodinâmica. Quando a liga é imersa numa solução, os elementos da liga com o potencial químico mais baixo serão preferencialmente corroídos, porque se comportam como ânodos e os materiais com potencial eletroquímico mais alto comportam-se como cátodos.

Diferentes tipos de ligas metálicas sofrem diferentes tipos de lixiviação seletiva. Nos latões, a dissolução seletiva do zinco é conhecida como dezincificação. A perda preferencial de carbono de um aço é designada por descarburização e a perda de alumínio por desaluminização [2].

A resistência à lixiviação seletiva pode ser melhorada através da adição de determinados elementos de liga. Por exemplo, a adição de estanho inibe a lixiviação seletiva do zinco dos latões, tal como a adição de fósforo ou antimónio, já a desaluminização dos bronzes ao alumínio pode ser inibida por tratamento térmico (obtendo uma microestrutura com fases α e β).

Uma vez que este processo de corrosão começa a atuar, só é possível atrasar o seu avanço alterando as condições de exposição. Dependendo da combinação entre a liga metálica e o ambiente, a utilização da proteção catódica e de revestimentos anticorrosivos podem ser eficazes [1].

A lixiviação seletiva é detetável visualmente em várias ligas metálicas, estas ficam com uma coloração diferente na zona afetada, embora em alguns casos seja necessário remover o revestimento para avaliar a extensão dos danos. No caso dos latões, a zona que sofre este tipo de corrosão fica com uma cor avermelhada, parecida com a cor do cobre, em vez da cor amarelada dos latões ricos em zinco [1].

A grafitação é um tipo de lixiviação seletiva que ocorre nos ferros fundidos. Este tipo de corrosão resulta na formação de uma estrutura de grafite porosa com perda de resistência mecânica, de ductilidade e densidade ao material afetado. Durante a produção dos ferros fundidos cinzentos, o silício presente no banho metálico promove a solidificação do carbono na forma de grafite na matriz de ferro. Em contacto com um eletrólito, a matriz de ferro comporta-se como ânodo e a grafite como cátodo, ocorrendo dissolução preferencial do ferro, deixando uma estrutura porosa e a grafite frágil. A lixiviação seletiva do ferro fundido não apresenta evidências visuais a olho nu, pois não ocorrem alterações dimensionais, mas a resistência mecânica fica comprometida.

Este processo de corrosão é influenciado pela composição química do ferro fundido e das condições a que está exposto, como por exemplo, a temperatura, o grau de arejamento, o pH e o tempo de exposição. A cinética de corrosão é potenciada pela diminuição do pH e pelo aumento da temperatura (até 93°C). A humidade também favorece este processo de corrosão, principalmente na presença de elevadas concentrações de sulfatos [1, 3]. Todas as gamas de ferro fundido estão sujeitas à grafitação, com exceção do ferro fundido branco porque não tem grafite livre na matriz de ferro. Este tipo de corrosão ocorre frequentemente em equipamentos em contacto com água, como as tubagens de caldeiras, bombas e válvulas de água, tubagens subterradas [1].

Existem algumas formas de prevenir a ocorrência deste processo de corrosão, sem a necessidade de substituir os componentes em ferro fundido por outro material. A aplicação de um revestimento anticorrosivo ou proteção catódica são algumas das

medidas preventivas utilizados, o controlo do pH do ambiente envolvente, para valores neutros ou ligeiramente alcalinos, e a redução da concentração em iões Cl^- e SO_4^{2-} são outras medidas com resultados positivos [2].

Os processos de corrosão abordados anteriormente provocam danos nos materiais por ação de diferentes mecanismos, provocando perdas de espessuras nas zonas afetadas ou, em alguns casos, picadas de corrosão. A perda de espessura localizada ou generalizada é o tipo de defeito mais frequente, pelo que serão abordados os ensaios não destrutivos para a deteção de variações de espessura.

3. Ultrassons

Neste capítulo são descritos os diferentes modos de propagação de ondas ultrassónicas, a forma como se comportam quando atingem a interface de dois meios com diferente impedância acústica, as características do feixe de ultrassons e os diferentes modos de representação das ondas nos equipamentos de ultrassons convencionais e medidores de espessura. O objetivo deste capítulo é apresentar os ensaios por ultrassons, o seu modo funcionamento e a sua utilização para detetar e caracterizar os defeitos resultantes dos processos de degradação dos materiais por corrosão.

3.1 Características das ondas de ultrassons

Modos de propagação

Nos materiais sólidos, os ultrassons podem caracterizar-se por diferentes tipos de onda, de acordo com a oscilação das partículas. Os principais tipos de ondas são: longitudinais, transversais, Rayleigh (ou superficiais), Lamb (ou placa) e torcionais.

As ondas longitudinais são as mais utilizadas nos ensaios de ultrassons convencionais e a direção de oscilação das partículas é igual à direção de propagação da onda, como representado na Figura 5 a). Este é o modo de oscilação com maior velocidade de propagação e alcance, outra das suas características é propagarem-se tanto em meios sólidos como líquidos e gasosos. A velocidade destas ondas está relacionada com o módulo de Young, coeficiente de Poisson e a densidade do material, podendo ser calculada pela seguinte equação [5]:

$$V_c = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}}$$

Equação 1

Em que:

V_c = velocidade da onda longitudinal;

E = módulo de Young;

ρ = densidade do material;

σ = coeficiente de Poisson.

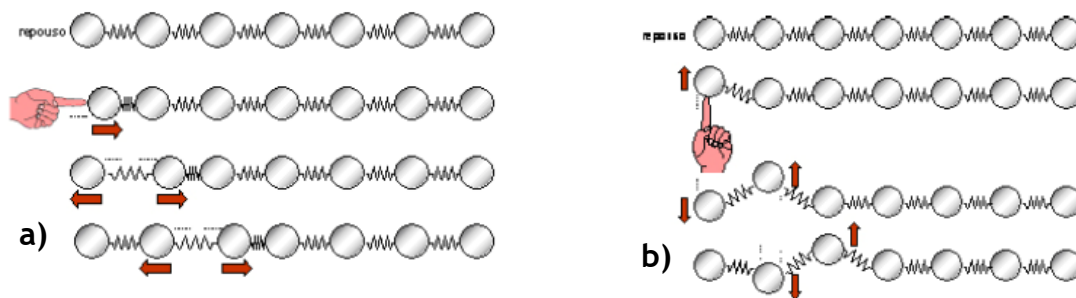


Figura 5: Esquema do modo de vibração e propagação de uma onda (a) longitudinal e (b) transversal [2].

Nas ondas transversais, também chamadas ondas de corte, a direção de oscilação é perpendicular à direção de propagação, como se pode ver na Figura 5 b). Estas ondas têm menor alcance que as ondas longitudinais, sendo muito usadas para a inspeção de soldaduras. A velocidade de propagação destas ondas é inferior à das ondas longitudinais, cerca de metade [5]:

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1}{2(1 + \sigma)}}$$

Equação 2

Em que:

V_s = velocidade da onda transversal;

ρ = densidade do material;

σ = coeficiente de Poisson.

As ondas Rayleigh, propagam-se ao longo da superfície dos materiais, seguindo os seus contornos. A velocidade de propagação destas ondas é cerca de 90% das ondas transversais, com um movimento de oscilação das partículas de forma elítica (ver Figura 6) e uma profundidade de penetração próxima do seu comprimento de onda. O interesse destas ondas prende-se com a sua elevada sensibilidade aos defeitos

superficiais ou próximos da superfície, desde que não se encontrem a uma distância à superfície superior ao seu comprimento da onda [6].

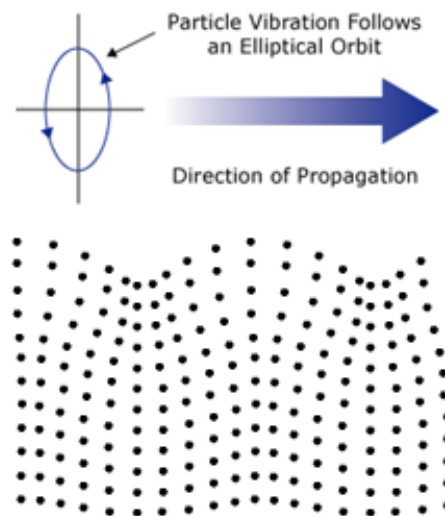


Figura 6: Movimento de oscilação das partículas numa onda Rayleigh [6].

O modo de vibração das partículas nas ondas Lamb é semelhante ao das ondas Rayleigh, de forma elíptica. A semelhança entre os dois tipos de ondas deve-se ao facto das ondas Lamb corresponderem a ondas Rayleigh a propagar-se num meio com uma espessura da ordem do comprimento da onda. Quando isto acontece, toda a espessura fica a vibrar, permitindo a propagação da onda ao longo de dezenas de metros segundo dois modos distintos: modo simétrico e modo assimétrico, o modo simétrico tem maior velocidade, mas é menos energético e tem menor alcance que o assimétrico, assim o modo de vibração assimétrico é mais indicado para inspecionar equipamentos mais longos, como os oleodutos. Na Figura 7 estão representados estes dois modos de vibração [6].

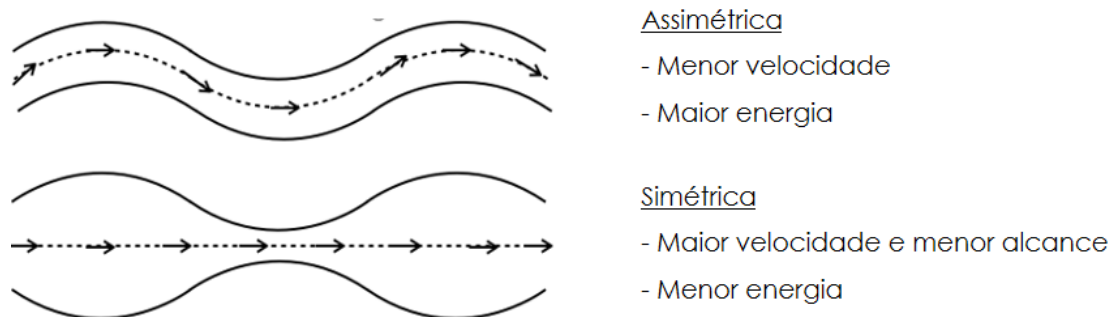


Figura 7: Esquema do modo de vibração das ondas de Lamb [5].

As ondas torcionais são geradas, e detetadas, por um tipo de sonda recentemente desenvolvido. As sondas utilizadas em tubagens consistem numa bobine

eletromagnética colocada por cima de uma fita de um material magnetostritivo (liga de Fe-Co) que se fixa na superfície externa do tubo a ser examinado. Por ser uma tecnologia recente, as propriedades e aplicações das ondas torcionais são conhecidas, mas alguns efeitos da transdução magnetostritiva são difíceis de modelar. O interesse deste modo de propagação prende-se com a reduzida suscetibilidade à atenuação em tubos com líquidos, em relação às ondas longitudinais convencionais utilizadas na inspeção por ondas guiadas [7]. Na Figura 8 está representado um esquema do modo de propagação das ondas torcionais.

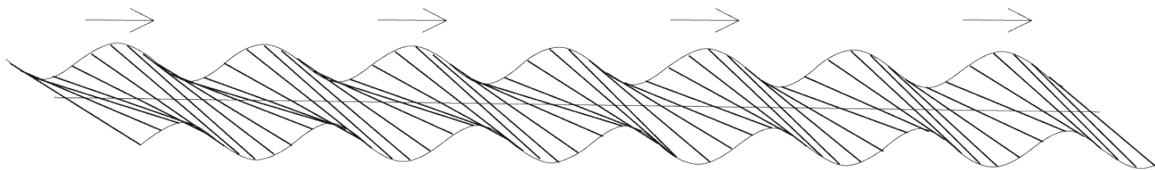


Figura 8: Esquema do modo de propagação das ondas torcionais [8].

Conversão de modo de ondas longitudinais

Quando um ultrassom atinge a interface entre dois meios, parte da onda é refletida, enquanto outra parte é transmitida, propagando-se no interior do material. A onda transmitida propaga-se com um ângulo que depende do ângulo de incidência e da diferença de impedância acústica entre os dois meios, quanto maior esta diferença, mais intensa será a onda refletida e mais fraca será a onda transmitida. Assim, o material usado entre a sonda de ultrassons e o material a examinar, o acoplante, deve ter uma impedância o mais próximo possível do material a inspecionar de forma a maximizar a intensidade do feixe transmitido. O acoplante é um gel que se aplica na superfície do material para promover a transmissão dos ultrassons e impedir a presença de ar entre a sonda e o material.

Quando uma onda longitudinal incide numa interface de dois meios com diferentes impedâncias acústicas, esta sofre uma conversão do modo de propagação, as ondas refletidas e refratadas dividem-se em ondas longitudinais e ondas transversais, como representado na Figura 9.

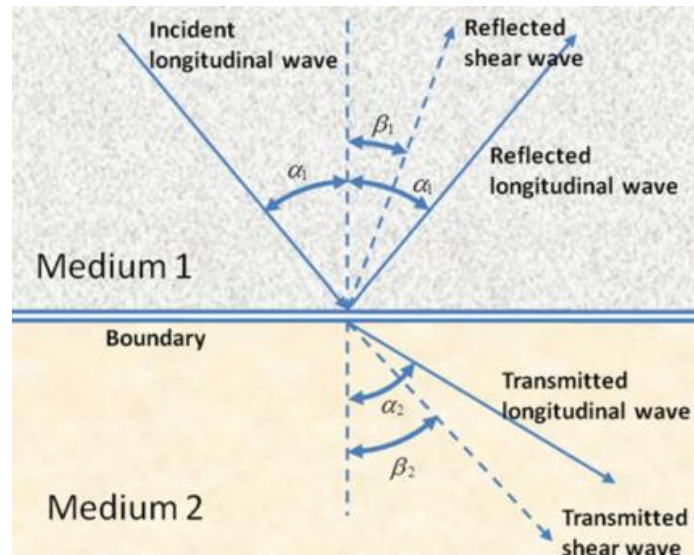


Figura 9: Modo de conversão de uma onda longitudinal [9].

Os ângulos de incidência e refração podem ser calculados pela lei de Snell para diferentes meios, de acordo com a equação [9]:

$$\frac{V_{L1}}{\sin \alpha_1} = \frac{V_{T1}}{\sin \beta_1} = \frac{V_{L2}}{\sin \alpha_2} = \frac{V_{T2}}{\sin \beta_2} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

V_{L1} = Velocidade da onda longitudinal no meio 1.

$\sin \alpha_1$ = seno do ângulo de reflexão da onda longitudinal.

V_{T1} = Velocidade da onda transversal no meio 1.

$\sin \beta_1$ = seno do ângulo de reflexão da onda transversal.

V_{L2} = Velocidade da onda longitudinal no meio 2.

$\sin \alpha_2$ = seno do ângulo de refração da onda longitudinal.

V_{T2} = Velocidade da onda transversal no meio 2.

$\sin \beta_2$ = seno do ângulo de refração da onda transversal.

Atenuação das ondas

Quando uma onda de ultrassons se propaga num material, a sua energia diminui com a distância percorrida. Os principais fatores que contribuem para a atenuação dos ultrassons é a dispersão, difração e absorção do feixe. A dispersão é a perda de energia do feixe à medida que é transmitido ao longo de um meio, por exemplo,

através da reflexão em fronteiras de grão. A difração ocorre quando a onda atravessa pequenos defeitos, como fissuras. A absorção consiste na perda de energia durante a propagação do feixe através da vibração dos átomos. Normalmente a atenuação é expressa em decibéis por unidade de medida de distância. O aumento da temperatura também provoca o aumento da atenuação pois o material perde rigidez [6, 10, 11].

3.2 Características do feixe de ultrassom

Quando um ultrassom é produzido por um cristal piezoelétrico, este não tem origem num único ponto, mas sim em vários pontos da superfície deste cristal. O que vai originar um campo sonoro composto por uma interferência de várias ondas.

Quando ocorre interferência de duas ondas, a onda resultante corresponde à soma das amplitudes de ambas as ondas ao longo do seu percurso. As ondas estão em fase se estão com um desvio de 0, 360° ou um múltiplo de 360° entre elas, e, se ao serem somadas, a onda resultante é o dobro da original, este tipo de interferência diz-se construtiva e está representado na Figura 10 a). Ondas com o mesmo comprimento de onda e a mesma amplitude mas desfasadas, com a amplitude máxima de uma onda alinhada com a amplitude mínima da outra, anulam-se, é o caso da interferência destrutiva representada na Figura 10 b) [6, 11].

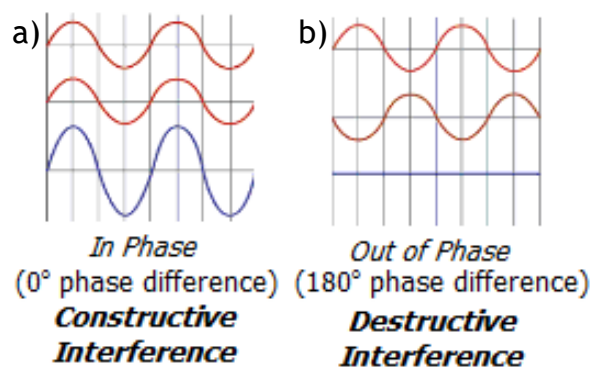


Figura 10: Na imagem a) interferência de duas ondas em fase, na imagem b) interferência de duas ondas desfasadas [11].

Numa aplicação real, as ondas não têm origem no mesmo ponto, pelo que a sua interação é mais complexa, mas com o mesmo princípio. Nos ensaios de ultrassons, a interferência de ondas que acontece imediatamente em frente da superfície da sonda é conhecida como campo próximo ou zona de Fresnel, esta zona define uma distância N ao longo da qual o equipamento é incapaz de realizar qualquer medição

devido ao ruído causado pela interferência das várias ondas. No fim do campo próximo, o campo sonoro fica mais uniforme e já é possível realizar medições, esta zona é denominada campo afastado ou zona de Fraunhofer [6, 11]. Na Figura 11 está representado um esquema do campo próximo e campo afastado de um feixe de ultrassons.

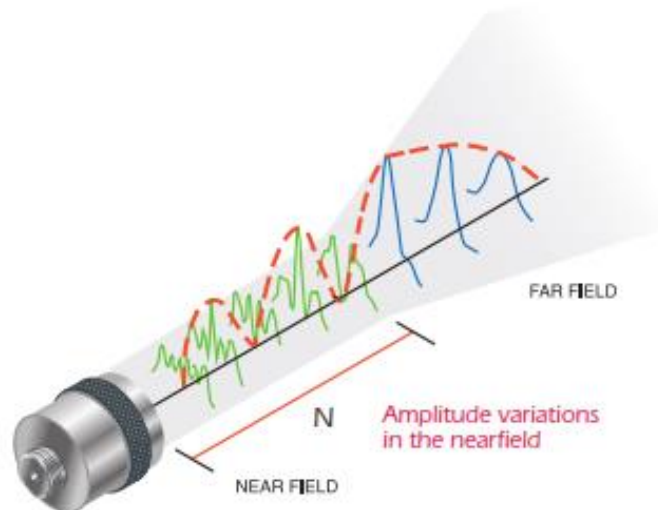


Figura 11: Esquema da representação do campo próximo (near field) e campo afastado (far field) de um feixe de ultrassons [11].

Nas sondas piezoelétricas a distância do campo próximo é influenciada pela frequência e diâmetro da sonda, bem como a velocidade da onda longitudinal no material. O campo próximo pode ser calculado pela equação [10]:

$$N = \frac{D^2 f}{4c} \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

N = dimensão do campo próximo;

D = diâmetro do cristal;

F = frequência da sonda;

c = velocidade da propagação da onda longitudinal no material.

Todos os feixes de ultrassons divergem ao longo da propagação. A divergência do feixe é a dispersão que este apresenta em relação à linha central de propagação do feixe. A intensidade do ultrassom é sempre maior na zona central do feixe, pelo que as reflexões mais intensas devem estar em frente à zona central da sonda (nas sondas

direitas, de feixe reto), que por sua vez, será a zona com maior resolução e sensibilidade [11]. Na Figura 12 é possível observar a previsão da dispersão de um feixe de ultrassons em função do ângulo de dispersão e a distância do campo próximo.

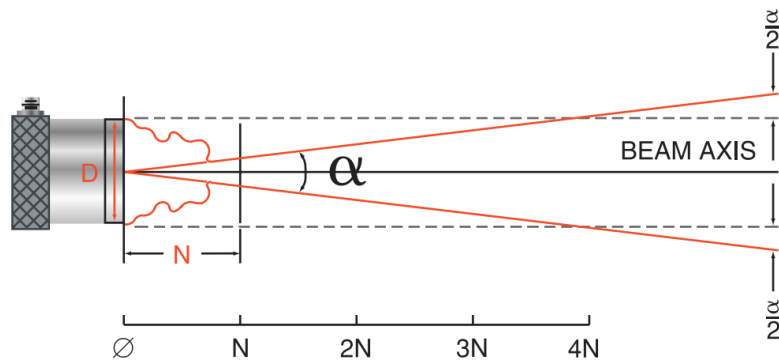


Figura 12: Representação esquemática da dispersão de um feixe de ultrassons [11].

Diferentes tipos de representação das ondas ultrassônicas nos equipamentos

Num ensaio de ultrassons, os sinais detetados podem ser representados nos equipamentos de diferentes formas, sendo as mais utilizadas conhecidas como representação *A-Scan*, *B-Scan* e *C-Scan*. Nem todos os equipamentos possuem todas as representações, os equipamentos mais antigos e mais básicos têm apenas representação *A-Scan*. Alguns equipamentos medidores de espessura têm apenas uma representação nominal da espessura medida.

Representação *A-Scan*

Esta é uma representação da quantidade de energia (amplitude do sinal) recebida em função do tempo. A quantidade relativa de energia recebida é representada no eixo vertical, e o tempo que o feixe de ultrassons demorou a percorrer o material desde que saiu da sonda até regressar à mesma é representado no eixo horizontal.

Com este tipo de representação é possível estimar a dimensão relativa da descontinuidade detetada através da comparação da amplitude do sinal recebido com o sinal de um refletor de dimensão conhecida. A distância a que a descontinuidade se encontra da sonda é determinada com bastante precisão (na ausência de dispersão) analisando a posição do sinal das reflexões no eixo horizontal.

Na Figura 13.a) encontram-se representados esquemas de dois defeitos (B e C) e uma zona com menor espessura (A), na Figura 13.b) está representado o A-Scan das reflexões do feixe de ultrassons nessas discontinuidades, assim como o pulso inicial (IP) e a reflexão da parede de fundo (BW). No A-scan é possível verificar que as discontinuidades mais próximas da sonda aparecem primeiro na linha de tempo, pois o percurso do feixe de ultrassons é menor [12].

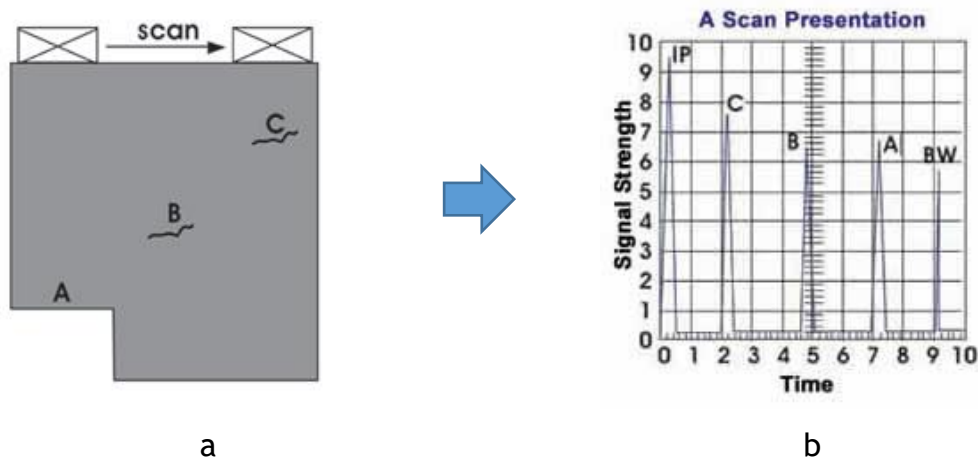


Figura 13: a) Desenhos esquemáticos de uma peça com duas discontinuidades (B e C) e redução de espessura (A); (b), representação do A-Scan das reflexões do feixe de ultrassons nessas discontinuidades [12].

Representação B-Scan

A representação *B-Scan* é uma representação do perfil transversal da peça ensaiada. A medição do tempo de propagação dos ultrassons é apresentada no eixo vertical e a posição linear da sonda em relação à peça é representada no eixo horizontal. Através desta representação é possível determinar a profundidade das discontinuidades e estimar a sua dimensão na direção da inspeção. A grande limitação desta representação é que discontinuidades mais profundas podem ser mascaradas por discontinuidades mais próximas da superfície.

Na Figura 14.a) é possível ver representação da secção transversal com discontinuidades. Na Figura 14.b) é possível verificar que as discontinuidades aparecem por ordem na direção de inspeção e de acordo com a profundidade em relação à superfície [12].

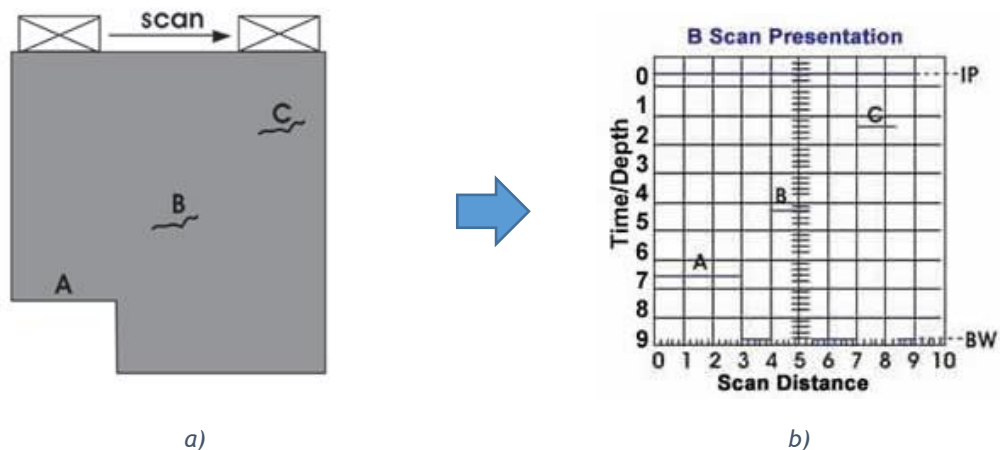


Figura 14: a) esquemas de dois defeitos (B e C) e uma secção de menor espessura (A); b) B-Scan das descontinuidades [12].

Representação C-Scan

O C-Scan representa a vista de cima da peça, através do varrimento da superfície com a sonda, indicando a localização e dimensão do defeito. O plano da imagem é paralelo ao movimento de varrimento da sonda.

A representação C-Scan é principalmente usada quando se faz inspeção por imersão, ou quando se aplica a técnica de *phased array*. Nesta representação, o equipamento regista a amplitude do sinal recebido, em função do posicionamento da sonda na superfície da peça. Diferenças na amplitude do sinal são representadas por diferentes cores. Na Figura 15.a) está representada uma sonda de imersão e respetivo percurso de varrimento, e na Figura 15.b) o C-Scan da amostra inspecionada [13].

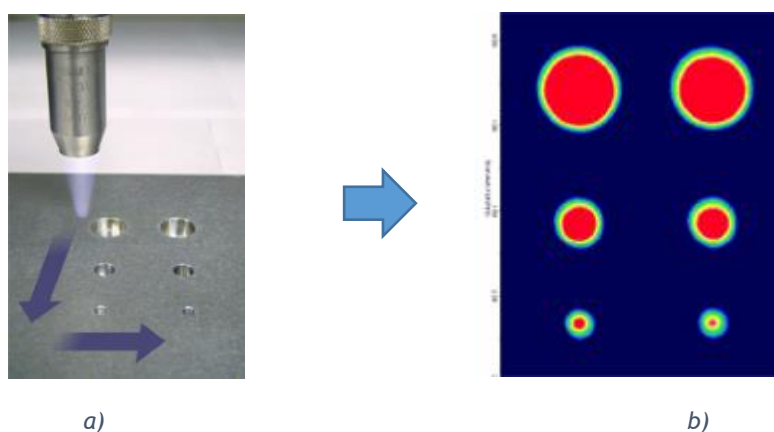


Figura 15: a) percurso de varrimento de uma sonda de imersão; b) C-Scan da inspeção [13].

3.3 Tipos de sondas para medição de espessuras

A equipa de desenvolvimento da EQS pretende desenvolver o protótipo de uma sonda para medição de espessura, capaz de monitorizar a variação de espessura ao longo do tempo, para isso é necessário que a sonda permaneça acoplada ao equipamento durante longos períodos de tempo e que fosse resistente a temperaturas elevadas (para certos equipamentos). O primeiro obstáculo encontrado para as sondas piezoelétricas foi o problema do acoplante, pois este perde propriedades ao longo do tempo e não pode ser aplicado em materiais a temperaturas elevadas. Por isso foi feito um estudo sobre o tipo de sondas disponíveis no mercado para medição de espessura, para ser decidido o tipo de sonda a desenvolver. Existem dois tipos de sondas principais diferenciados pela forma como geram as ondas de ultrassons, as sondas piezoelétricas e as sondas EMAT (*eletromagnetic acoustic transducer*). Neste capítulo é apresentado o modo de funcionamento das sondas de ultrassons aplicáveis na medição de espessura.

3.3.1 Sondas piezoelétricas

Nas sondas piezoelétricas os ultrassons são gerados e detetados por cristais de materiais piezoelétricos. Estes materiais têm a capacidade de se deformarem na presença de uma tensão elétrica e a capacidade de gerar uma tensão quando são deformados.

Constituição da sonda

Existem vários tipos de sondas, para diferentes tipos de aplicações. As sondas podem ser de imersão ou de contacto, dentro destas podem ser sondas angulares ou sondas direitas, ter um ou dois cristais. Neste trabalho pretende-se estudar sondas para medição de espessura, pelo que se trata de sondas de contacto direitas. Nas sondas monocristal, este tem a função de emitir e detetar os ultrassons, enquanto uma sonda de cristal duplo tem um cristal apenas a emitir e outro apenas a receber.

Na Figura 16 estão representados esquemas de sondas monocristal (Figura 16 a e c) e duplo cristal (Figura 16 b e d) indicando os seus componentes (Figura 16 a e b) e a direção do feixe gerado (Figura 16 c e d) [14].

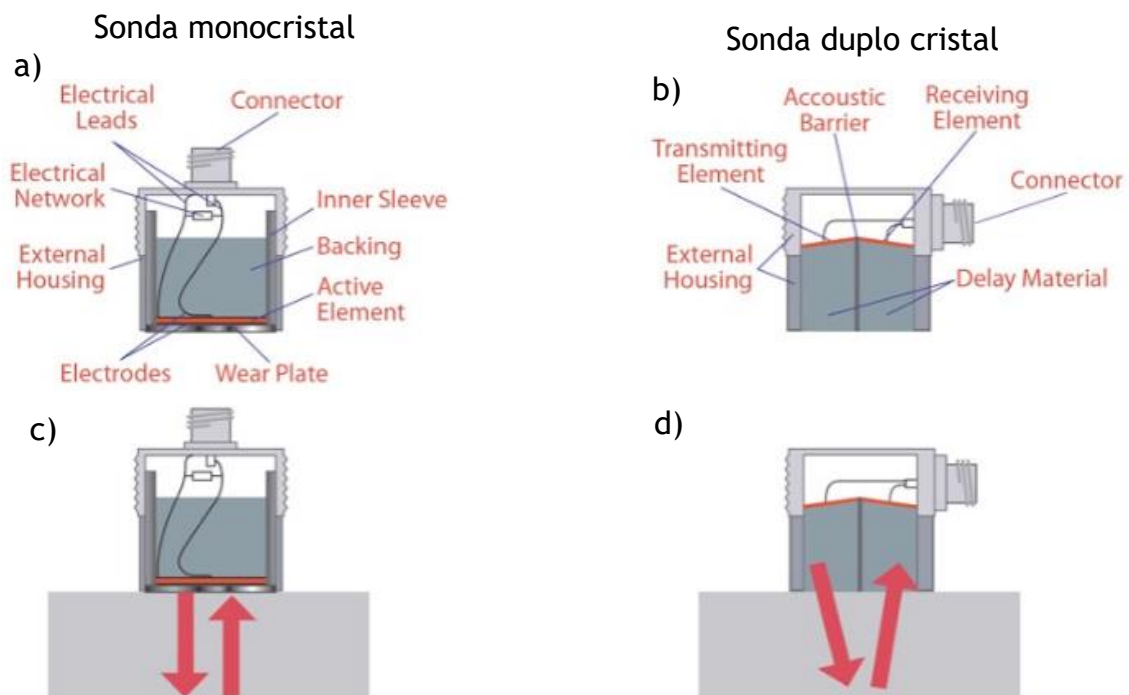


Figura 16: Representação dos componentes que constituem as sondas de ultrassom mono e duplo cristal e respetiva direção de formação do feixe [14].

Material de amortecimento

Na parte de trás do cristal é adicionada um bloco de material, conhecido como “backing layer” ou “damping” que tem como função suportar o cristal e amortecer a ressonância da sonda. Quanto maior for semelhança de impedância acústica entre este material e a do cristal, maior é a quantidade de energia dissipada. O que leva a uma redução da sensibilidade (reduz amplitude do sinal) mas aumenta o alcance do feixe de ultrassom. Quando a impedância do “backing” é inferior à impedância do cristal, a sensibilidade aumenta, mas o alcance diminui.

O coeficiente de atenuação e a espessura da “backing layer” deve ser suficiente para que a vibração amortecida não seja transmitida de volta para o cristal, o que poderia produzir ecos indesejáveis. Um dos materiais utilizados para este componente é uma mistura de resina epoxi com tungsténio [15].

Cristal piezoelétrico

O cristal emite e deteta os ultrassom. É composto por cerâmicos ou compósitos piezoelétricos, como por exemplo, o quartzo, titanato de zircónio e chumbo, titanato de bário, niobato de chumbo, sulfato de lítio, entre outros. Os cristais

podem ser cortados com diferentes geometrias. O cristal pode ser circular ou retangular e, em alguns casos, como nas sondas de imersão, pode ser uma placa com curvatura ou um disco côncavo, para focar o feixe de ultrassons [16].

Os materiais piezoelétricos são compostos por dipolos organizados em domínios. Os cristais têm de ser polarizados, para que os dipolos fiquem orientados na mesma direção. A polarização consiste aplicar um campo elétrico, orientando os dipolos segundo a direção do campo aplicado, o esquema da Figura 17 representa a orientação dos dipolos antes, durante e depois da polarização [17].

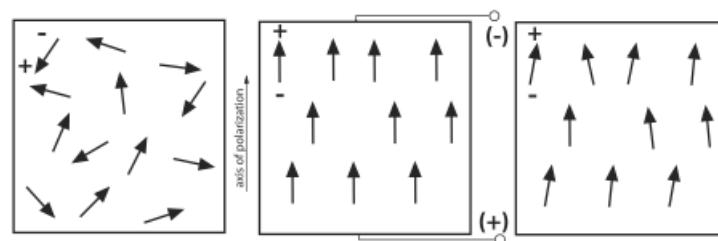


Figura 17: Orientação dos dipolos antes, durante e após a polarização [17].

Quando um cristal piezoelétrico se deforma fica eletricamente polarizado, produzindo uma tensão elétrica na superfície do cristal. A razão pela qual o cristal produz uma tensão é porque quando ocorre uma deformação mecânica, a estrutura cristalina é perturbada e altera a orientação dos dipolos e, conseqüentemente a polarização. A alteração da polarização pode ser causada pela reconfiguração dos íons na estrutura cristalina ou pela reorganização dos grupos moleculares. Conseqüentemente, quanto maior a deformação, maior a alteração da polarização e maior a tensão elétrica na superfície do cristal. Para detetar esta tensão, são colocados eléctrodos na superfície superior e inferior do cristal, como representado na Figura 18 [15,17].

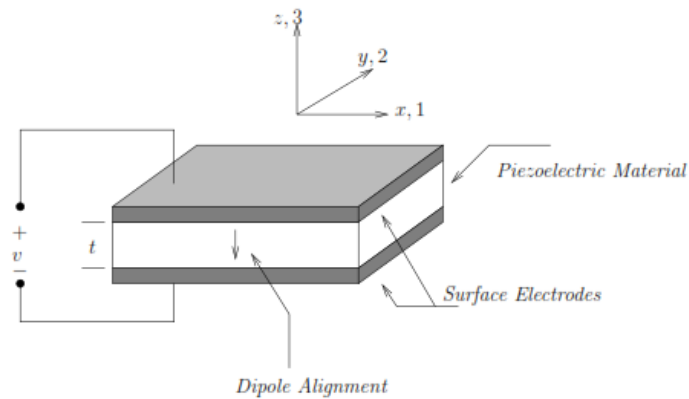


Figura 18: Esquema do posicionamento dos elétrodos nas superfícies de um cristal piezoelétrico [18].

Forças de compressão ao longo da direção de polarização geram uma tensão com a polaridade inicial (Figura 19 b). Forças de tração ao longo da direção de polarização geram uma tensão com polaridade oposta à inicial (Figura 19 c) [17].

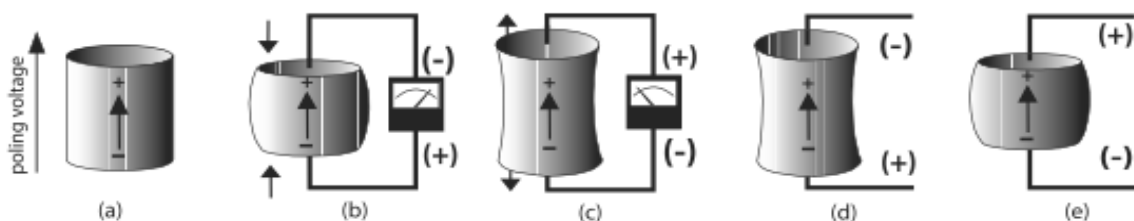


Figura 19: Relação entre a polaridade da tensão aplicada e a deformação do cristal [18].

Quando se aplica uma tensão com uma polaridade igual à inicial este vai deformar-se segundo a direção de polarização, aumentando o comprimento e reduzindo a largura (Figura 19 d). Quando se aplica uma tensão com polaridade oposta à de polarização, o cristal contrai (Figura 19 e). Quando se aplica uma corrente alternada, o elemento expande e contrai ciclicamente com uma frequência de acordo com a frequência da corrente alternada aplicada [17].

Membrana

Na parte da frente do cristal, entre este e o meio de propagação do ultrassom, há uma membrana com uma ou mais camadas para proteger o cristal, com uma impedância intermédia entre a do cristal e a do material a inspecionar. Normalmente, a espessura desta membrana é $\frac{1}{4}$ do comprimento da onda ultrassónica que se pretende gerar. A utilização desta membrana aumenta a sensibilidade da sonda e o seu alcance, pois a duração da ressonância no cristal diminui. Na Figura 20 está representada a relação entre a espessura do cristal e da

membrana em função do comprimento da onda ultrassônica, λ , que se pretende gerar. A relação entre a espessura do cristal e a da membrana deve garantir que as ondas ultrassônicas geradas no cristal interfiram de forma construtiva (estejam em fase) quando se propagam na membrana, para que as ondas ultrassônicas atinjam a superfície do material a inspecionar com maior energia possível [10].

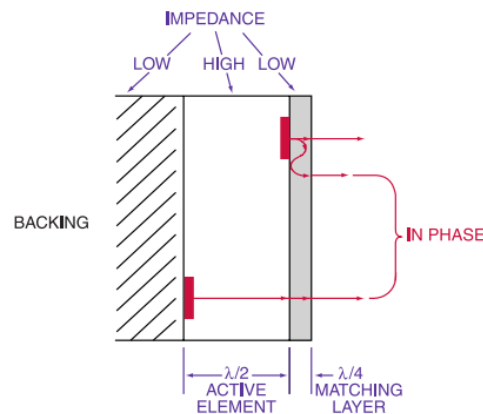


Figura 20: Relação entre as espessuras do cristal e da membrana em função do comprimento da onda, λ [10].

Funcionamento da sonda

É aplicado um pulso de elevada tensão durante um período muito curto de tempo que põe o cristal a vibrar a uma frequência que depende da sua espessura. Quando se aumenta a tensão do pulso aplicado ao cristal, aumenta a amplitude do ultrassom produzido. A frequência da sonda é definida pela espessura do cristal e depende da velocidade de propagação da onda longitudinal no cristal, ou seja, cristais de materiais diferentes necessitam ter espessuras diferentes para gerar uma onda com a mesma frequência. A relação entre a frequência e a espessura do cristal é dado por [16]:

$$f \times t = \frac{V}{2} \Leftrightarrow t = \frac{V}{2 \times f} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

f = frequência pretendida;

t = espessura do cristal;

V = velocidade da onda longitudinal no material do cristal.

A tensão aplicada à sonda deve ser limitada a 50 volts por milímetro de espessura do cristal. Para uma sonda de 5 MHz é usada uma tensão de 600 volts, e para uma sonda de 10 MHz é usada uma tensão de 300 volts [10].

O sinal gerado por um transdutor ultrassónico é na forma de pulsos elétricos, numa gama de milivolts ou pico-coulombs. O tempo de emissão e deteção dos pulsos é crucial para determinar a presença de falhas, bem como a sua profundidade no material [18].

3.3.2 Sondas EMAT (*Electromagnetic Acoustic Transducer*)

A técnica EMAT emprega os mesmos conceitos que os ultrassons convencionais, mas a energia é transmitida por campos eletromagnéticos, sem necessidade de contacto da superfície com a sonda. O campo magnético criado pela sonda induz a formação de ultrassons no próprio material, contrariamente ao que acontece nas técnicas de ultrassons convencionais. Esta técnica apresenta algumas das vantagens das técnicas de ensaios eletromagnéticos, como a possibilidade de inspecionar equipamentos com superfícies irregulares, bem como os benefícios dos ensaios acústicos, como a capacidade de detetar variações de espessura por corrosão ou erosão [1,2].

A geração eletromagnética dos ultrassons pode ocorrer segundo dois princípios físicos: por indução de forças de Lorentz e por efeito magnetostritivo. O efeito das forças de Lorentz ocorre em todos os materiais condutores elétricos. Em materiais ferromagnéticos os ultrassons são resultado do efeito magnetostritivo. A magnetostricção consiste na deformação de estruturas cristalinas por ação dos campos magnéticos. Existem dois tipos de sondas eletromagnéticas: EMAT Lorentz e EMAT magnetostritivas baseadas nos dois princípios físicos [21].

Sondas EMAT Lorentz

No caso das sondas EMAT Lorentz, é aplicada uma corrente elétrica alternada na bobine da sonda que induz correntes Eddy na superfície do material a inspecionar. O íman permanente ou eletroímã produz então um campo magnético. A interação entre o campo magnético (B) estático produzido pelo íman e as correntes Eddy (J_e) induzidas pela bobine induzem forças de Lorentz (f) na superfície do material. As forças de Lorentz respeitam a equação [22]:

$$f = J_e \times B$$

Equação 6

As forças de Lorentz provocam vibrações na rede cristalina do material com a mesma direção e frequência das correntes Eddy, dando origem aos ultrassons. Na Figura 21 a) está um esquema das sondas EMAT e na figura 21 b) a representação da propagação das ondas e das linhas de campo do ímã [21].

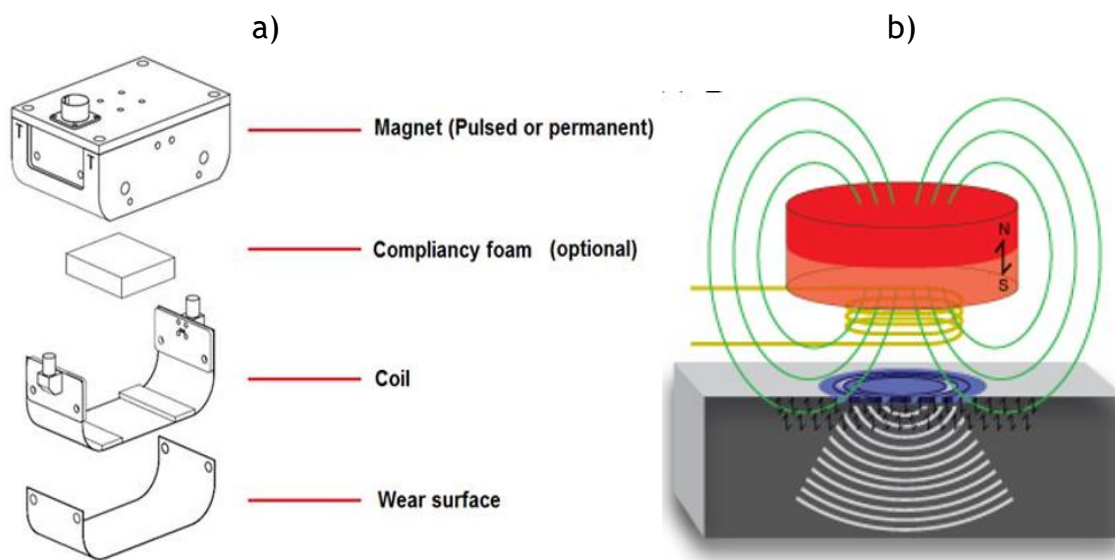


Figura 21: a) esquema da constituição e b) funcionamento de uma sonda EMAT [24].

O efeito inverso também se verifica, a propagação de uma onda mecânica num material condutor gera um campo eletromagnético na superfície do material que, ao interagir com o campo magnético da sonda EMAT, origina um campo elétrico na bobine proporcional à velocidade de vibração das partículas, sendo assim possível detectar as ondas ultrassônicas [4,6].

Sondas EMAT magnetoestríctivas

As sondas EMAT magnetoestríctivas também são compostas por um ímã permanente e uma bobine que, em conjunto, atuam como um eletroímã quando sujeitos a um pulso elétrico.

A magnetostricção é a pequena alteração (10^{-6} em volume) de dimensão dos materiais ferromagnéticos quando sujeitos a um campo magnético externo. Os materiais ferromagnéticos têm uma estrutura interna organizada em regiões de polarização magnética uniforme, conhecidas como domínios. Quando um campo magnético externo (H) interage com o material, os domínios rodam para ficarem orientados de

acordo com o campo magnético aplicado, o que provoca uma ligeira alteração na sua dimensão, como ilustrado na Figura 22 [25].

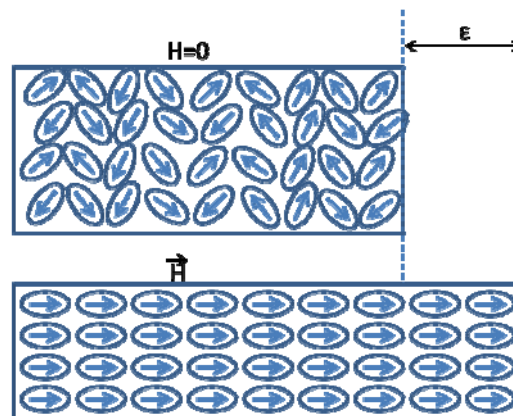


Figura 22: Efeito da magnetostricção na dimensão dos materiais [26].

Este tipo de sonda só é aplicado em materiais ferromagnéticos ou com uma camada de óxido superficial ou depósitos internos para atuar como elemento ativo. O íman permanente cria um campo magnético (B_s) perpendicular à superfície da camada de óxido, enquanto o campo criado pela passagem de corrente na bobine (B_d) provoca um movimento radial na camada de óxido, como na Figura 23, quando se aplica um pulso elétrico na bobine [26].

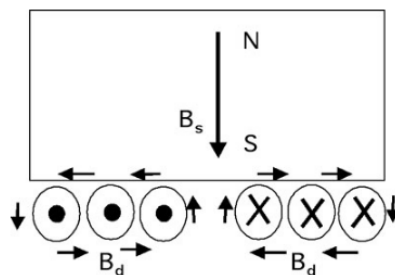


Figura 23: Esquema do funcionamento de uma sonda EMAT magnetostritiva [26].

Este movimento forma ondas de ultrassons transversais com uma direção de propagação perpendicular à superfície do material. A frequência da onda sonora varia com a espessura da camada de óxido, aumentando com a diminuição da espessura de óxido [26]. A deteção de ondas ultrassónicas a propagar-se num material ferromagnético ocorre quando a deformação altera o estado de magnetização, através da alteração dos domínios magnéticos, aumentando a densidade de fluxo magnético [27].

Os ímãs permanentes produzem campos magnéticos perpendiculares à superfície do material quando é usada uma bobine em espiral (unidirecional), o que dá origem a ondas transversais e longitudinais, em materiais condutores, geradas pelas forças de Lorentz. Quando se aplica este tipo de ímã em materiais ferromagnéticos são detetadas apenas ondas transversais, pois as ondas longitudinais são demasiado fracas para serem detetadas. A Figura 24 representa o mecanismo de formação de ultrassons, na imagem a) através de forças de Lorentz e na imagem b) por magnetostricção [27].

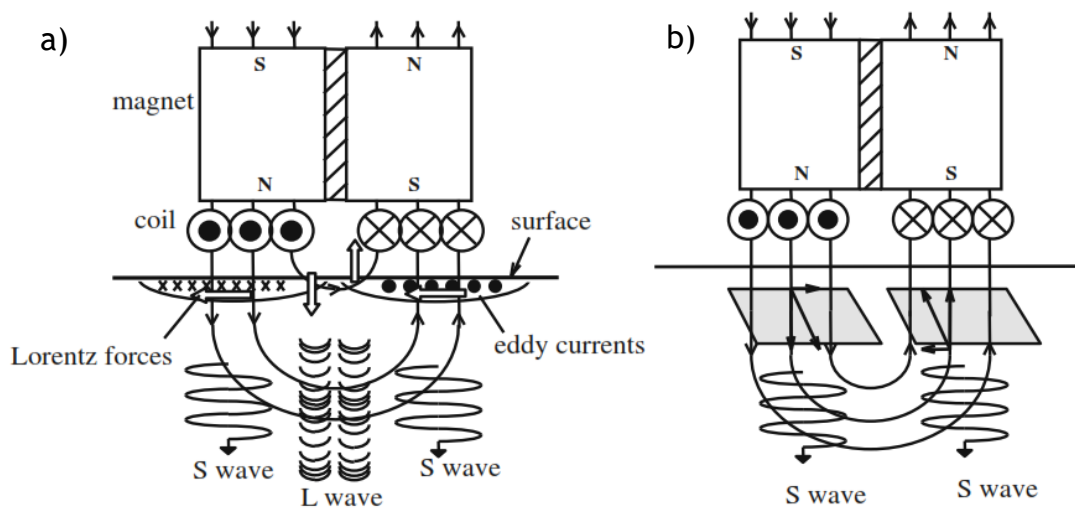


Figura 24: Mecanismo de formação de ultrassons, na esquerda através de forças de Lorentz e na direita por magnetostricção [27].

Diferentes tipos de sondas EMAT

Existem diferentes tipos de sondas EMAT, que permitem gerar diferentes tipos de ondas e serem aplicadas em diferentes situações (baixas ou elevadas temperaturas). A direção do campo magnético aplicado, a geometria da bobine e do ímã e a frequência do campo eletromagnético definem o modo de oscilação do ultrassom gerado. Na Figura 25 estão representadas algumas das diferentes configurações que as sondas EMAT podem apresentar [24].

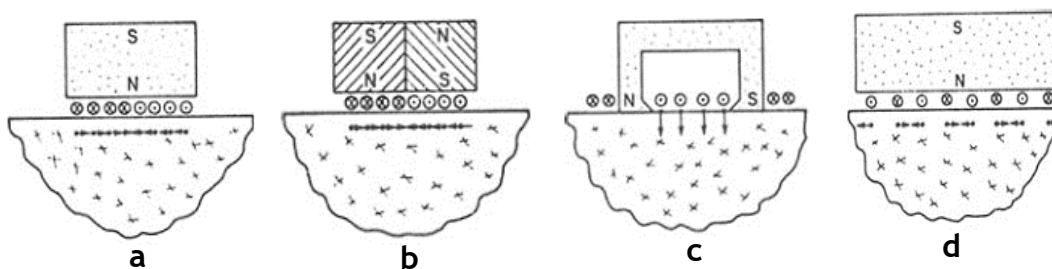


Figura 25: Diferentes configurações dos ímãs e bobinas das sondas EMAT [24].

As sondas com as configurações **a)** e **b)** são usadas quando se pretendem gerar ondas transversais, na mesma direção das forças de Lorentz, que causam o deslocamento dos íons paralelamente à superfície do material. A sonda com a configuração **c)** é usada para gerar ondas longitudinais, em que a direção das forças de Lorentz e o deslocamento dos íons é perpendicular à superfície do material. A sonda com a configuração **d)** permite gerar ondas com uma direção de propagação paralela à superfície, ondas Rayleigh e ondas Lamb, para isto o campo magnético estático tem de ser perpendicular à superfície do material [6,8].

A frequência das sondas é determinada pela geometria da bobine, isto é, o espaçamento entre as linhas condutoras, a configuração do íman (se é apenas um ou um conjunto de pequenos ímanes) e a frequência de excitação.

Como as sondas piezoelétricas, as sondas EMAT podem ser sondas direitas ou angulares, nas sondas direitas o feixe de ultrassons tem uma direção de propagação perpendicular à superfície do material e nas sondas angulares a direção de propagação pode ter um ângulo, geralmente, de 45° a 70° em relação à superfície. Nas sondas direitas a bobine tem uma geometria helicoidal (Figura 26 a) e nas sondas angulares a bobine tem uma geometria em serpentina (Figura 26 b) [28].

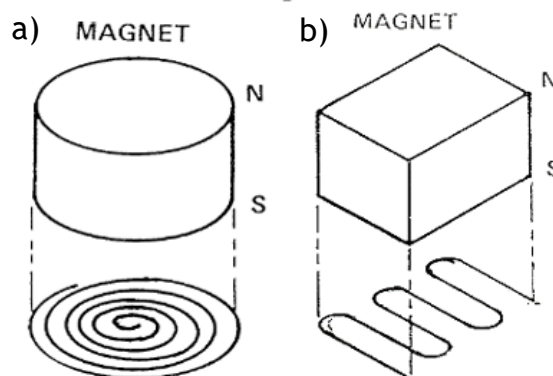


Figura 26: Diferentes tipos de sondas EMAT [28].

Conforme a geometria das linhas da bobine são criadas deformações na superfície do material a inspecionar, dando origem a ultrassons de acordo com a equação [28]:

$$n\lambda = 2L \sin(\theta) \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

n = inteiro ímpar;

λ = comprimento de onda;
L = espaçamento entre as linhas adjacentes;
 Θ = ângulo do feixe com a normal da superfície.

Esta equação aplica-se tanto a ondas longitudinais como transversais. Por isso, a sonda com a bobine helicoidal pode ser usada para gerar ondas longitudinais ou transversais com um ângulo Θ em relação à normal da superfície, sendo este ângulo controlado pela frequência do campo eletromagnético.

Embora as técnicas EMAT não necessitem de contacto entre a sonda e o material a inspecionar, a distância entre eles tem grande influência na intensidade do ultrassom gerado e do sinal recebido, como traduzido pela equação [29]:

$$S(g) = S_0 e^{\left(\frac{-2\pi g}{D}\right)} \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

S = intensidade do sinal em função da distância;
 S_0 = intensidade do sinal no levantamento;
g = distância;
D = espaçamento entre as linhas da bobine.

Por isso é importante limitar a distância entre a bobine e a superfície do material, mas acima de tudo manter uma distância constante para garantir a reprodutibilidade dos resultados e a fiabilidade da análise.

As características elétricas das sondas EMAT são consideravelmente diferentes das piezoelétricas. As sondas EMAT comportam-se como cargas indutivas, enquanto as sondas piezoelétricas atuam como cargas capacitivas. Como tal, o emissor de pulsos de um equipamento EMAT tem de ser diferente do emissor de um equipamento de ultrassons convencional [28].

Os ímanes permanentes são muito usados nas sondas EMAT porque são capazes de aplicar um campo magnético forte sem uma fonte de energia. Um tipo de íman que é muito utilizado é composto por neodímio, ferro e boro (Nd-Fe-B), devido à sua elevada densidade de fluxo magnético. Embora este tipo de íman apresente desvantagens, como a impossibilidade de controlar a intensidade do campo magnético e o baixo ponto de Curie, o que torna este tipo de material incompatível

com a aplicações a temperaturas superiores a 80 °C, a não ser que sejam usados sistemas de refrigeração a ar ou água. Uma alternativa aos ímanes de neodímio-ferro-boro para aplicações a temperaturas mais elevadas (250-300 °C) são os ímanes de samário e cobalto, contudo a energia do campo é inferior [27].

Em alternativa aos ímanes permanentes podem ser usados eletroímanes. Estes podem ser usados para aplicações a elevadas temperaturas, desde que sejam isolados termicamente, sendo ainda possível controlar a intensidade de polarização do campo magnético. Os eletroímanes são capazes de gerar campos magnéticos de maior energia do que os ímanes permanentes, mas provocam o aquecimento das bobinas por efeito de Joule, o que implica ter uma sonda de maiores dimensões [27].

Com este estudo foi possível compreender o modo de funcionamento dos diferentes tipos de sondas para emitir e detetar ultrassons, bem como as vantagens e limitações de cada tipo de tecnologia. As sondas piezoelétricas têm elevada sensibilidade e alcance de medição, contudo precisam de contacto direto com a superfície, requerem o uso de acoplante e são pouco resistentes a temperaturas elevadas, uma vez que o cristal perde as propriedades piezoelétricas acima da sua temperatura de Curie. As sondas EMAT podem ser por forças Lorentz ou por magnetostricção, a grande vantagem deste tipo de sonda em relação às sondas piezoelétricas é o facto de não precisarem de contacto direto com a superfície do material (pode estar a alguns milímetros distância), pelo que não requer aplicação de acoplante, e permitir a medição de equipamentos a temperaturas mais elevadas, ideal para operações de monitorização contínuas. Contudo a eficiência de emissão e deteção de ultrassons é menor que a das sondas piezoelétricas, o que resulta em menor sensibilidade e alcance de deteção. As sondas por forças de Lorentz só podem ser aplicadas a materiais condutores e as sondas por magnetostricção só podem ser aplicadas a materiais ferromagnéticos.

4. Casos de estudo

4.1 Determinação do perfil de espessuras de um tubo

Foram efetuadas medições de espessura de um tubo teste instalado na empresa EQS para aplicação de técnicas de ondas guiadas e medidores de espessura por ultrassons. O tubo tem cerca de dezoito metros de comprimento, embora as medições tenham sido efetuadas apenas numa secção do tubo ao longo de oito metros, pois o resto do tubo não se encontrava acessível. O tubo inspecionado tem 190 mm de diâmetro e 6,5 mm de espessura nominal.

O equipamento utilizado foi um medidor de espessuras da Dakota Ultrasonics CMX DL, que tem uma resolução de 0,01 mm e foi utilizada uma sonda de duplo cristal de 7,5 MHz com 5 milímetros de diâmetro. A calibração da sonda e do equipamento foram verificadas com recurso a uma escada de calibração, como ilustrado na Figura 27. A escada de calibração utilizada tem degraus com espessuras de 0,5, 1, 2, 4, 6, 8 e 10 milímetros. Não foram efetuadas medições dos degraus com 0,5 e 1 milímetro, pois essas espessuras ficam fora do alcance de medição da sonda.



Figura 27: Verificação do estado de calibração do equipamento e da sonda.

As medições de espessura foram realizadas de 600 em 600 milímetros em quatro eixos do tubo, pela ordem indicada na Figura 28. A secção do tubo inspecionada continha uma soldadura, pelo que foram efetuadas medições dos dois lados da soldadura (medição 3 e 4), neste caso não foi respeitada a distância de 600 milímetros entre medições. Os valores das medições efetuadas são apresentados na Tabela 1.

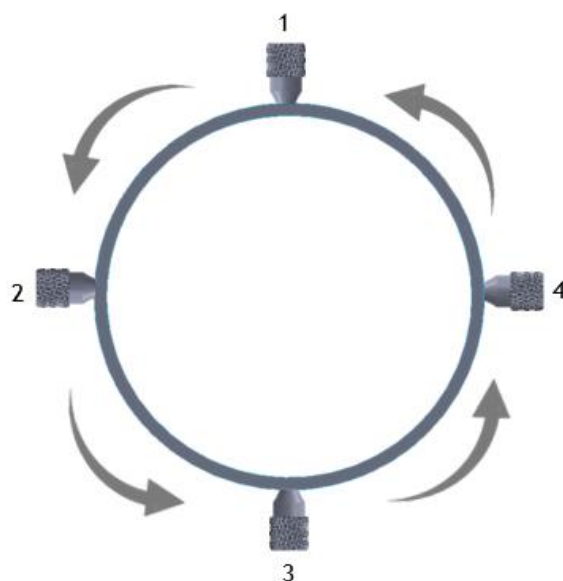


Figura 28: Esquema representativo das posições da sonda para cada medição.

Tabela 1: Valor das medições efetuadas de 600 em 600 mm nas quatro posições do tubo.

Nº da medição	Posição Radial			
	1	2	3	4
1	6,14 mm	6,25 mm	6,08 mm	6,04 mm
2	6,26 mm	6,07 mm	6,26 mm	6,29 mm
3 - Antes da soldadura	5,93 mm	6,02 mm	6,07 mm	5,94 mm
4 - Após a soldadura	6,08 mm	6,20 mm	6,12 mm	6,32 mm
5	6,18 mm	6,02 mm	6,10 mm	6,20 mm
6	6,07 mm	6,44 mm	6,32 mm	6,37 mm
7	6,22 mm	6,51 mm	6,15 mm	6,26 mm
8	6,18 mm	6,25 mm	6,32 mm	6,40 mm
9	6,28 mm	6,29 mm	6,05 mm	6,40 mm
10	6,32 mm	6,30 mm	6,35 mm	6,49 mm
11	6,01 mm	6,22 mm	6,32 mm	6,41 mm
12	6,32 mm	6,16 mm	6,41 mm	6,18 mm
13	6,15 mm	6,13 mm	5,98 mm	6,13 mm

Para uma análise comparativa dos valores da tabela, foi calculado o valor médio das quatro medições e foi construído um gráfico (Figura 29) com o valor médio das espessuras em função do número da medição, que foram efetuadas com incrementos de 600 milímetros de espaçamento, ao longo de 8 metros

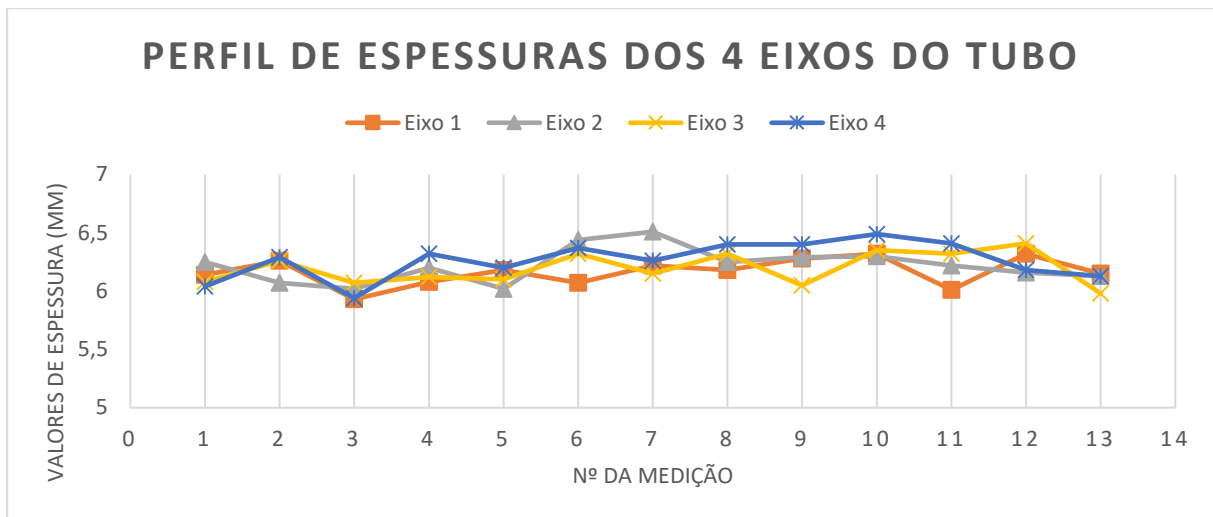


Figura 29: Gráfico representativo do perfil de espessuras do tubo.

Os valores de espessura mínimos medidos no eixo 1, 2, 3 e 4 foram, respetivamente, 5,93, 6,02, 5,98 e 5,94 mm. Destes valores, apenas o que foi medido no eixo 3 (5,98) não corresponde à medição do ponto 3, realizada a 50 mm do cordão de soldadura. As zonas próximas do cordão de soldadura ficam termicamente afetadas, devido à fusão de material que ocorre durante o processo de soldadura. A zona termicamente afetada pode sofrer uma corrosão mais severa devido à alteração microestrutural. Na Figura 30 está representada a soldadura entre as medições 3 e 4 no eixo 1, nesta figura é ainda possível observar que a zona do tubo do cordão de soldadura foi mais atacada pela corrosão (atmosférica). A posição das medições 3 e 4 foi identificada pelos restos de acoplante usado.

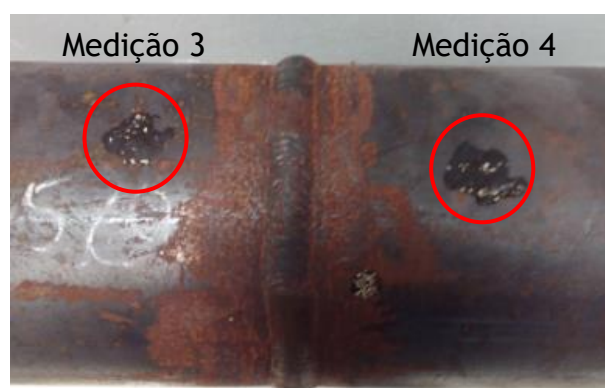


Figura 30: Localização da medição 3 e quatro no eixo 1 (vista de cima).

4.2 Ensaio por ultrassons de uma peça fundida

Foi realizado um ensaio de ultrassons a uma peça produzida por fundição nas instalações da EQS. A peça em questão é uma peça de um moinho de açúcar e está representada na Figura 31. A peça tinha sido previamente ensaiada na fundição onde foi produzida para controlo interno, nesse ensaio preliminar foram identificados alguns defeitos que precisavam de ser dimensionados para verificar se estes eram aceitáveis ou não.



Figura 31: Peça produzida por fundição para moinho de açúcar.

As marcações de cor amarela são indicações de pequenos defeitos, mas a zona mais crítica para a inspeção foi a zona do veio central. Nessa zona tinha sido detetado o defeito que era necessário dimensionar. A inspeção foi feita a partir da superfície plana na parte superior do veio, como exemplificado na Figura 32. Toda essa superfície foi percorrida pela sonda, para identificar a localização exata do defeito e posteriormente dimensioná-lo, a sonda utilizada no ensaio tinha um diâmetro do cristal de 24 mm e uma frequência de 2 MHz.



Figura 32: Representação da superfície de inspeção e sonda utilizada.

A distância entre a superfície onde se encontra a sonda e a superfície oposta é de 310 mm, pelo que o equipamento de ultrassons deve estar a medir 310 mm, se a peça não tiver nenhum defeito no percurso percorrido pelo feixe de ultrassons. A Figura 33, abaixo, ilustra o ecrã do equipamento de ultrassons (Krautkramer USN 58R) no momento em que foi detetada uma reflexão, 139,1 mm abaixo da sonda, indicando a presença de um defeito.

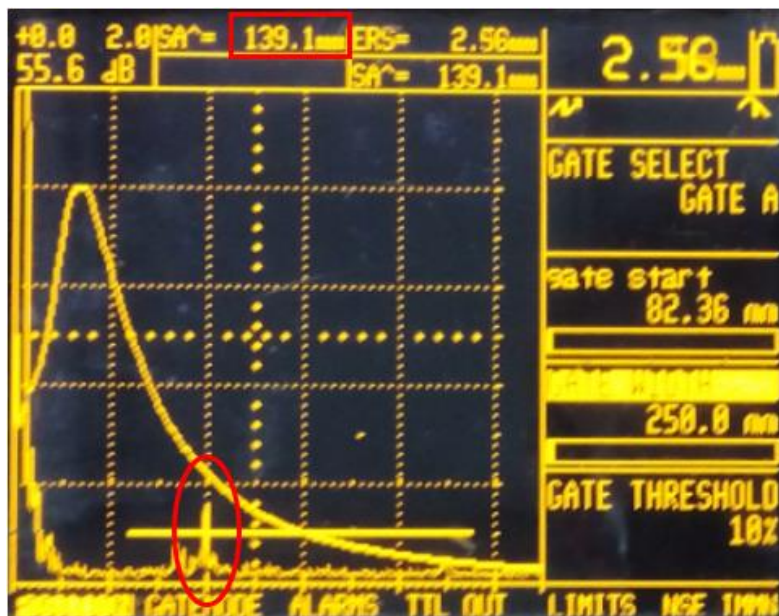


Figura 33: Representação do ecrã do equipamento de ultrassons com a reflexão de um defeito.

Para o dimensionamento de defeitos internos por ultrassons em peças produzidas por fundição é seguido o procedimento descrito na norma BS EN 12680. A sonda deve ser

posicionada na zona em que a reflexão tem maior amplitude. O ponto onde a amplitude do sinal detetado é máximo é marcado na superfície da peça, de seguida move-se a sonda para a direita e para a esquerda até se verificar uma queda do eco em 6 dB, marcando-se também essas zonas da superfície da peça, sabendo assim a área aproximada do defeito, como representado na Figura 34.



Figura 34: Representação da área do defeito encontrado.

Para determinar a dimensão vertical do defeito seria necessário colocar a sonda na zona interna do veio a uma distância da superfície superior de cerca de 139,1 mm, que foi a profundidade a que o defeito foi detetado, e repetir o procedimento anterior. Mas, como a superfície interna do veio é curva, não foi possível garantir um bom acoplamento da sonda com a superfície. A determinação da dimensão vertical do defeito foi efetuada através inspeção da superfície inferior, oposta à que se inspecionou inicialmente. Devido à geometria da peça a dimensão vertical não foi determinada com muita precisão. Na Figura 35 está representada a dimensão vertical estimada do defeito, cerca de 3 centímetros.



Figura 35: Posição vertical do defeito encontrado.

5. Ondas Guiadas

Como referido anteriormente, na EQS está a ser desenvolvido um sistema de ondas guiadas e as respetivas sondas, sendo executados testes num tubo especificamente instalado para esse fim. Neste capítulo é abordado o princípio de funcionamento da técnica por ondas guiadas, o tipo de sonda que está a ser desenvolvida e são discutidos resultados dos testes realizados ao sistema de ondas guiadas. Uma vez que a EQS pretende produzir novos tubos de teste, foi realizado um levantamento do tipo e da geometria de defeitos tipicamente detetáveis por ondas guiadas a incluir nesses tubos.

A técnica de ondas guiadas é uma técnica de ensaios não destrutivos principalmente aplicada para verificar a integridade de placas, hastes e tubagens, mesmo que estes se encontrem com isolamentos térmicos, revestimentos protetores contra corrosão, ou até mesmo enterrados. Só é necessário acesso a uma pequena porção das tubagens, para permitir a instalação da sonda ao longo de todo o diâmetro externo do tubo, como exemplificado na Figura 36.

São gerados curtos pulsos ultrassónicos que se propagam dentro dos limites estruturais dos equipamentos, entre a superfície interna e externa no caso dos tubos, ao longo de vários metros. Na presença de descontinuidades, uma fração do pulso emitido é refletido e o respetivo eco é detetado pela sonda. Esta técnica permite distinguir as reflexões relativas a soldaduras, suportes e curvas.

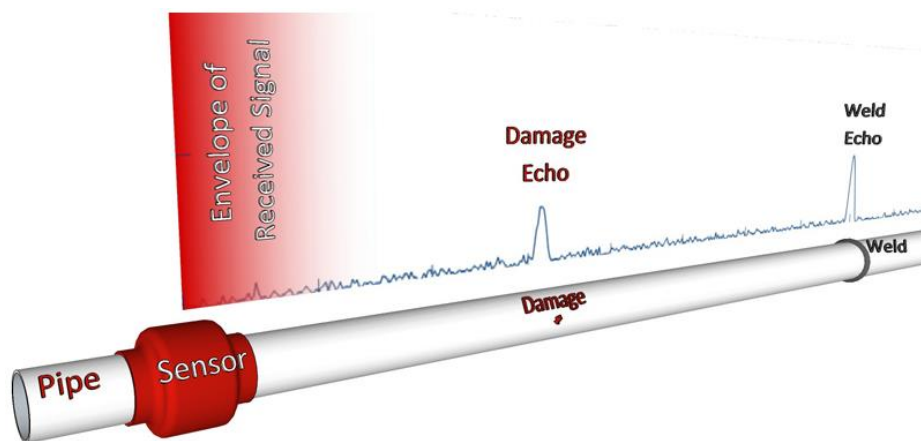


Figura 36: Esquema da inspeção de um tubo por ondas guiadas [29].

Esta técnica permite determinar com precisão a distância entre as discontinuidades e as sondas e estimar a dimensão dos defeitos através da intensidade dos ecos refletidos. É possível relacionar a intensidade dos ecos refletidos com a perda de área de secção transversal. Quanto maior a redução de área de secção transversal, maior será a amplitude do sinal detetado. Normalmente, quando se pretende determinar com precisão a dimensão de uma discontinuidade detetada por ondas guiadas, é feita uma inspeção visual e posterior inspeção por ultrassons convencionais ou medição de espessuras, na zona do tubo em que o defeito foi identificado [25,30,31].

5.1 Sondas

O tipo de sondas tipicamente utilizadas para a emissão e deteção das ondas guiadas são sondas piezoelétricas, embora recentemente tenham surgido as sondas magnetostritivas, que serão abordadas a seguir. Estas sondas são compostas por materiais mais baratos e permitem a formação de ondas torcionais, que sofrem menor atenuação durante a propagação na presença de líquidos no interior do tubo.

As sondas magnetostritivas, utilizadas para a emissão e deteção das ondas guiadas, são constituídas por dois componentes essenciais: uma bobine e uma fita de um material ferromagnético. Para a emissão das ondas, a bobine transforma a tensão aplicada num campo magnético e, para a deteção, transforma a variação de fluxo magnético em tensão alternada. A fita ferromagnética tem a função de transformar o campo helicoidal gerado pela bobine em ondas torcionais, no modo de deteção

transforma as ondas torcionais em fluxo magnético variável. A eficiência do sistema depende principalmente propriedades físicas do material magnetostritivo (ferromagnético).

Para induzir um campo magnético helicoidal é necessária a interação entre dois campos magnéticos com direções perpendiculares. No caso de um tubo é inicialmente criado um campo magnético na direção circunferencial, através da passagem de corrente na direção axial. De seguida é produzido um campo magnético alternado na direção axial com menor magnitude, gerado pela bobine através da passagem de corrente na bobine.

Os materiais tipicamente utilizados para as fitas são ligas de níquel e ligas de ferro-cobalto, estas são ligadas à superfície do tubo e têm, tipicamente, uma largura de 50 mm e uma espessura de 2 mm [32]. Na Figura 37 a) está uma fotografia de uma fita magnetostritiva acoplada com resina ao tubo de teste, e na Figura 37 b) a bobine colocada por cima da fita magnetostritiva.

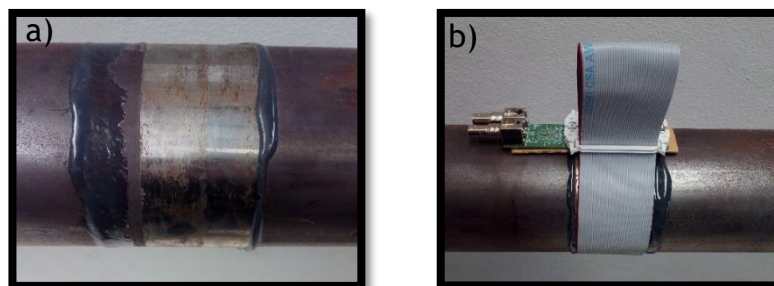


Figura 37: Na imagem a) uma fita magnetostritiva e na imagem b) uma bobine por cima da fita.

5.2 Exemplo prático da aplicação das ondas guiadas num tubo de teste

Na Figura 38 está representado um esquema do tubo com um diâmetro de 190 mm e uma espessura nominal de 6,5 mm, em que foram realizados testes ao sistema de ondas guiadas, com indicação da posição dos defeitos: soldaduras, suportes e fitas magnetostritivas ligadas ao tubo (representadas pelas letras de A a D).

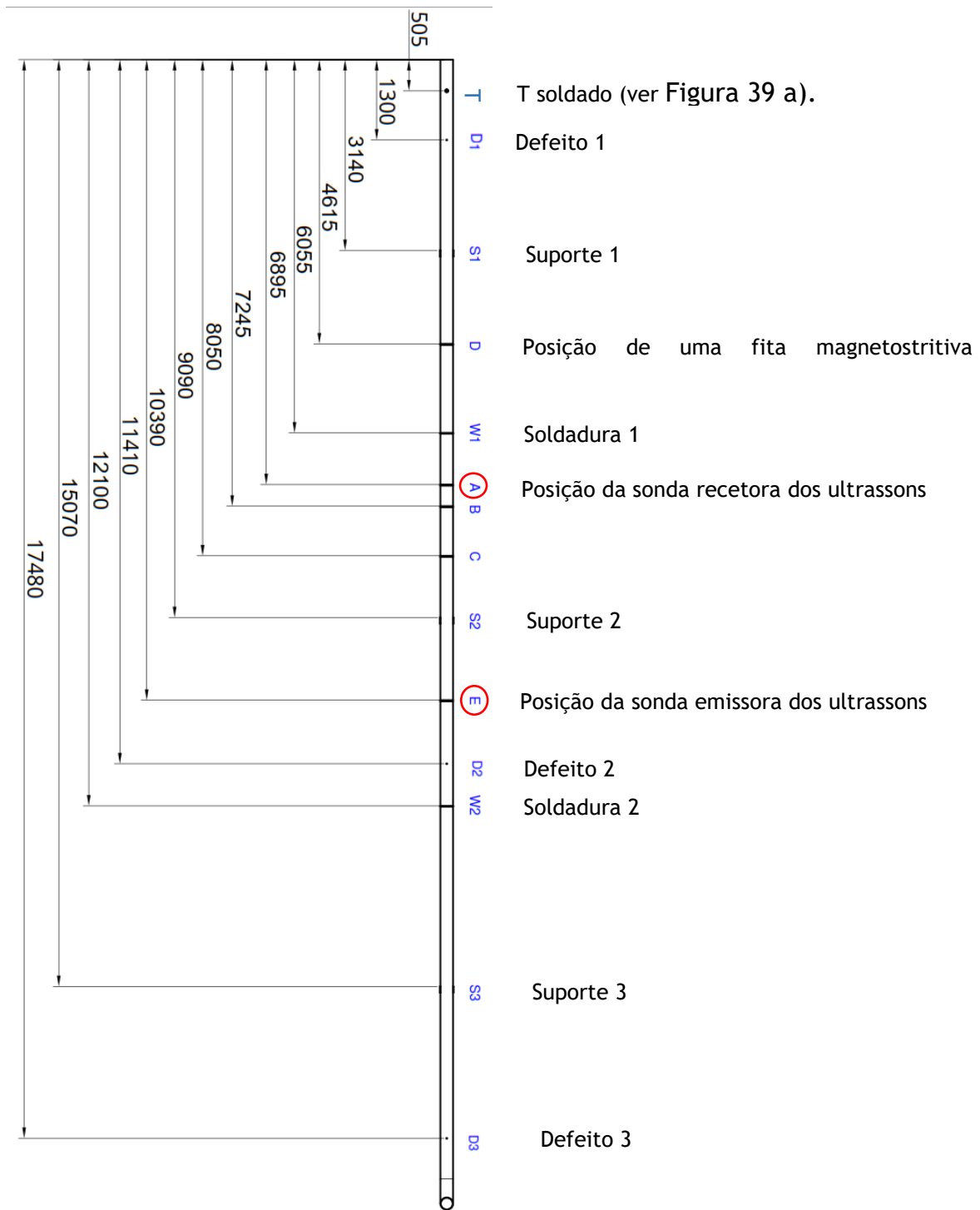


Figura 38: Esquema do tubo de teste para ondas guiadas.

Na Figura 39 estão fotografias dos defeitos e outras irregularidades capazes de refletir as ondas emitidas, que estão identificados na Figura 38. A letra T é um tubo soldado com um diâmetro externo de 48,2mm, um comprimento de 50,42 mm e uma espessura de 3,2 mm, visível na Figura 39 a). Os defeitos D1, D2 e D3 são furos não passantes com diâmetros de 11,5, 11,3 e 11,4 mm e profundidades de 4,5-, 4,6 e 4,5

mm, respetivamente. Todas medições foram realizadas com um paquímetro digital com uma resolução de 0,01 mm. As Figuras 39 b), c) e d) representam, respetivamente, defeito 1 (D1), soldadura 1 (W1) e o suporte 1 (S1).

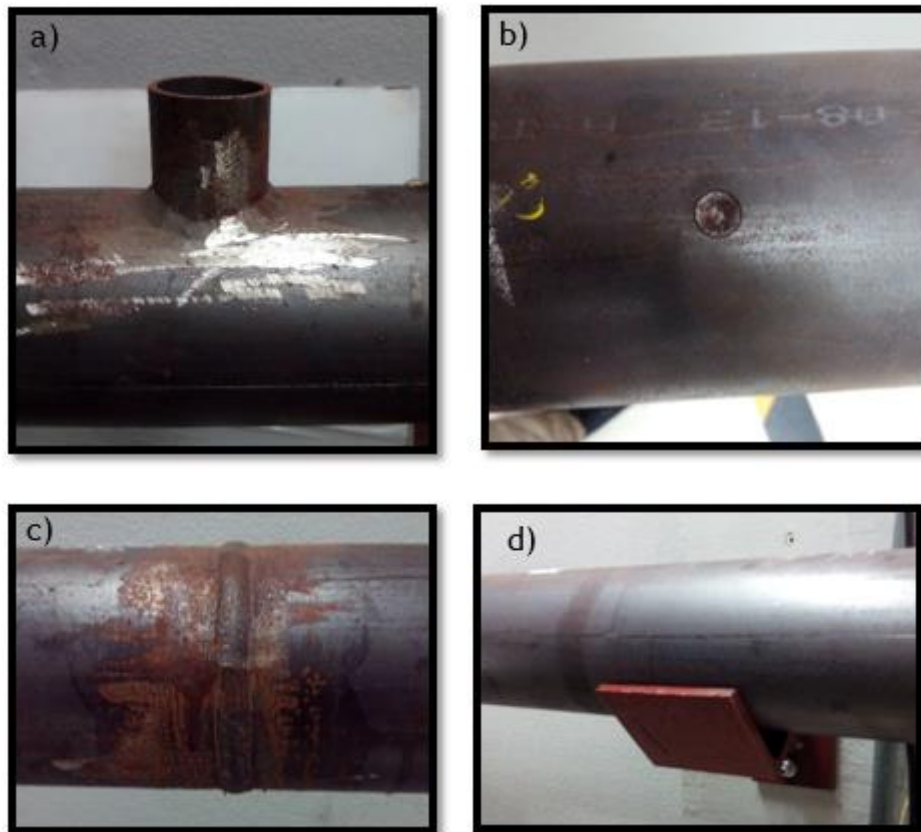


Figura 39: Fotografias das zonas do tubo que podem gerar sinais nas ondas guiadas. a) tubo soldado, b) furo não passante, c) soldadura, d) suporte.

Na Figura 39 não se encontram as imagens de algumas das discontinuidades ao longo do tubo, como os defeitos D2 e D3, a soldadura W2, ou os suportes S2 e S3, pois todos estes são visualmente iguais aos representados.

Nos testes realizados ao sistema de ondas guiadas foi colocada uma bobine sobre a fita magnetostritiva da posição E e outra bobine sobre a da posição A. Na posição E foi feita a emissão das ondas na direção da posição A, onde se fez a deteção das ondas. Na Figura abaixo encontram-se exemplos de resultados dos testes para diferentes frequências (25, 35, 45 e 55 kHz). De notar que os pulsos mais intensos correspondem ao pulso inicial e à reflexão do fim do tubo. Os pulsos iniciais não

estão alinhados porque o intervalo de tempo entre o início do registo dos dados e o início da emissão dos ultrassons não foi o mesmo para todos os ensaios.

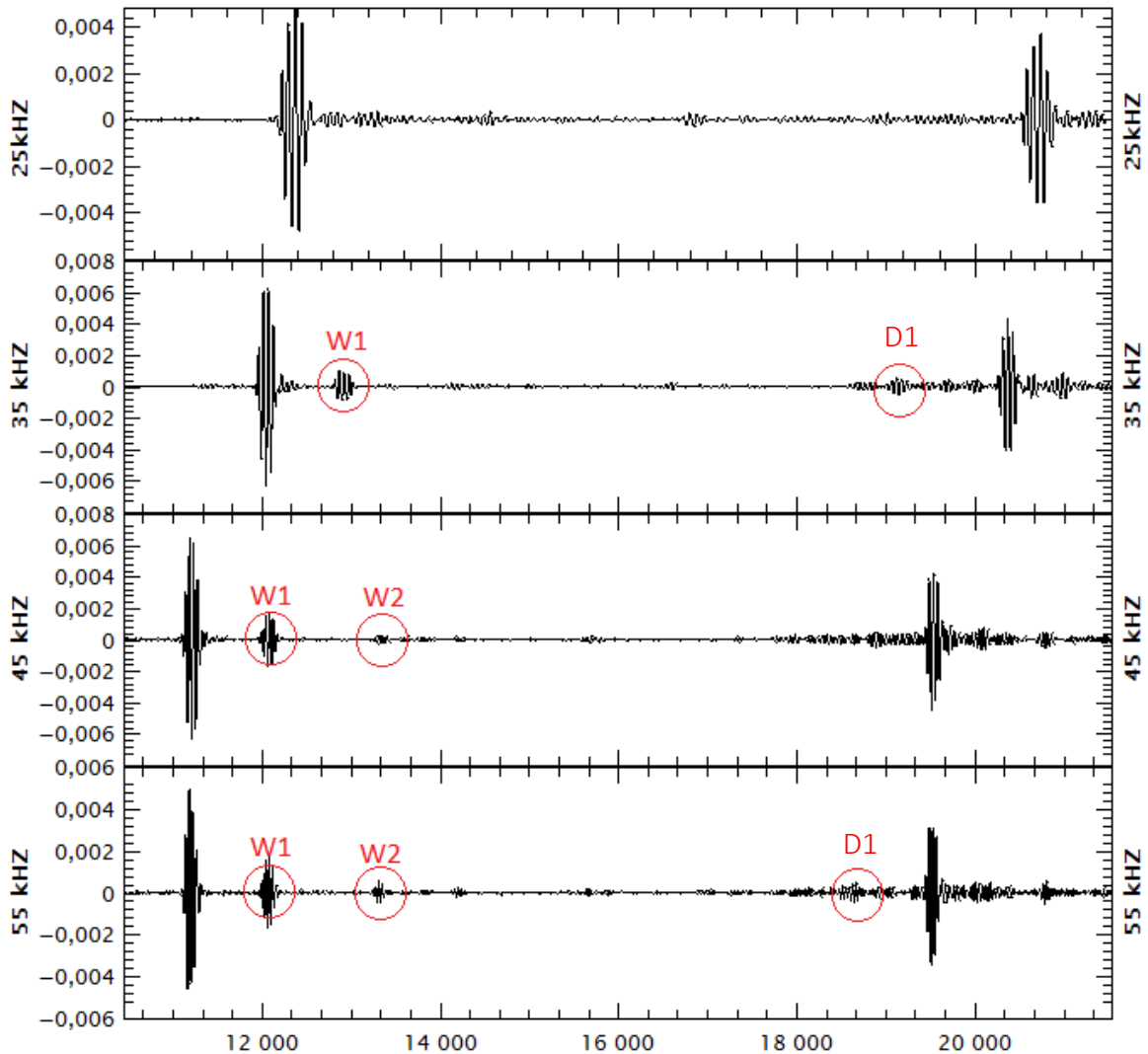


Figura 40: Resultados dos testes realizados ao sistema de ondas guiadas.

Analisando a Figura 40 verifica-se que a frequência dos ultrassons influencia os resultados. Para as ondas de 25 kHz só foi possível detetar o pulso emitido pela sonda da posição E e a reflexão na extremidade do tubo. Para a frequência de 35 kHz é possível identificar reflexões da soldadura 1 (W1) e do defeito 1 (D1). O teste para uma frequência de 45 kHz detetou as soldaduras 1 e 2 (W1 e W2). E por último, o teste para uma frequência de 55 kHz foi o que detetou mais reflexões, como as soldaduras 1 e 2 e o defeito 1. Foi possível concluir que a inspeção por ondas guiadas com ultrassons de frequências mais elevadas tem maior sensibilidade de deteção, dependendo da extensão e orientação do defeito, espessura do equipamento, estado de degradação e tipo de revestimento anticorrosivo.

As ondas guiadas foram emitidas da posição E em direção à posição A, contudo foi detetada uma reflexão da soldadura 2 nos testes com frequências de 45 e 55 kHz, que se localiza do lado oposto da sonda para onde foram enviadas as ondas guiadas. Isto deve-se ao facto de não ser possível enviar as ondas guiadas 100% numa direção, parte da onda é enviada no sentido oposto.

5.3 Levantamento do tipo e geometria de defeitos

Foi analisado um relatório da empresa *Northeast Gas Association* com o título de “*Long-Term Monitoring of Cased Pipelines Using Long-range Guided-Wave Technique*”, este relatório descreve todo o procedimento seguido e as condições em que foram conduzidos testes ao sistema de ondas guiadas com sondas magnetoestrutivas.

A análise deste relatório teve em vista a identificação das condições em que os testes foram realizados, como a dimensão dos tubos e a geometria e dimensão dos defeitos introduzidos. Ficando assim com uma referência de condições para testar protótipos de sondas de ondas guiadas.

Os defeitos criados tinham uma dimensão de, pelo menos, 10% da área da secção transversal do tubo. Um dos defeitos introduzidos foi um entalhe de 360° para simular uma perda de espessura localizada (ver Figura 41). O tubo para este teste tinha um diâmetro de 114,3 mm de diâmetro e 8,3 mm de espessura. O entalhe foi produzido com 150 mm de comprimento, e uma profundidade que foi aumentando de 10 % a 80 % da espessura do tubo, em escada e com incrementos de 10 %. A sonda foi colocada a 28 cm de distância do entalhe e foram usadas frequências de 32, 64 e 128 kHz.



Figura 41: Entalhe circunferencial na superfície externa.

Num outro tubo, com 6 m de comprimento, 150 mm de diâmetro e uma espessura de 7 mm, foram introduzidos defeitos elipsoidais e entalhes com dimensões variáveis.

Os entalhes foram maquinados com dimensões axiais de 6 a 100 mm, com incrementos de 6 mm e profundidade de 50 a 80% da espessura. Na Figura 42 está representada a geometria do entalhe realizado.



Figura 42: Entalhe maquinado com comprimento axial variável.

Os defeitos elipsoidais também foram maquinados com uma profundidade de 50 a 80% da espessura do tubo, com dimensões axiais e circunferenciais variáveis, como representado na Figura 43.



Figura 43: Representação de um defeito artificial elipsoidal.

Estes defeitos foram introduzidos a diferentes distâncias da sonda: 3,5 m; 4,3 m; 6,2 m; 8,4 m; 9,8 m; 11,3 m e 12 m. As dimensões dos defeitos elipsoidais produzidos estão representadas na tabela seguinte:

Tabela 2: Dimensão dos defeitos elipsoidais.

Defeito	Dimensões (mm)	
	Axial	Circunferencial
1	12,7	12,7
2	12,7	25,4
3	25,4	25,4
4	25,4	38,1
5	38,1	38,1
6	50,8	38,1
7	63,5	40,0

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Com a realização deste trabalho foi possível ficar a conhecer os principais processos de corrosão que afetam os equipamentos de refinarias. Os diferentes mecanismos, provocam perdas de espessura localizadas ou generalizadas e, em alguns casos, picadas de corrosão. A deteção destes defeitos e controlo da sua evolução são essencialmente efetuadas por técnicas acústicas de ensaios não destrutivos. Os equipamentos de medição de espessura são equipamentos de utilização simples que permitem fazer medições no local. As técnicas de ondas guiadas permitem realizar os testes ao longo de tubos longos e com zonas de difícil acesso, permitindo a monitorização pontual ou contínua.

As sondas de emissão e deteção dos ultrassons podem ser de materiais piezoelétricos ou EMAT (electromagnetic acoustic transducer). As sondas piezoelétricas têm elevada sensibilidade e alcance, mas precisam de contacto com a superfície, através de um material acoplante, e só podem ser utilizadas a temperaturas inferiores à de degradação do acoplante e da temperatura de Curie do cristal piezoelétrico. As sondas EMAT não precisam de contacto e são mais resistentes a temperaturas elevadas, mas só podem ser utilizadas para inspecionar materiais condutores ou ferromagnéticos. A sensibilidade e alcance das sondas EMAT são mais reduzidos que as das sondas piezoelétricas. Uma vez que as sondas EMAT não precisam de estar em contacto com a peça, e são mais resistentes a temperaturas elevadas, este tipo de sonda é mais indicada para sistemas de monitorização contínua da espessura.

Com a realização de testes e a análise dos casos de estudo permitiu conhecer algumas das limitações dos métodos/equipamentos de ultrassons, e reconhecer a necessidade de técnicos especializados para a sua operação, especialmente para o dimensionamento de defeitos.

7. Referências Bibliográficas

- [1] API, “Damage Mechanisms Affecting fixed Equipment in the Refining Industry,” *Am. Pet. Inst.*, no. April 2011, p. 372, 2011.
- [2] A. Groysman, *Corrosion for everybody*. Karmiel, Israel: Springer, 2010.
- [3] L. J. Korb and D. L. Olson, *ASM Metals Handbook Volume 13 - Corrosion*. 1992.
- [4] J. O. Harris and D. Eyre, “Soil in the Corrosion Process,” *Corros. Third Ed.*, vol. 1, p. 2:73-2:86, 2013.
- [5] J. Teixeira, *Manual de Ultrassons EQS - Nível 2*. .
- [6] J. Krautkramer and H. Krautkramer, *Ultrasonic Testing of Materials*. Springer, 1990.
- [7] S. Walker, “Applications Guide for Guided Wave Inspection Technology,” EPRI, 2005.
- [8] “Torsional wave device, large or small.” [Online]. Available: <http://berkeleyphysicsdemos.net/node/176>. [Accessed: 12-Apr-2017].
- [9] P. Burrascano, S. Callegari, A. Montisci, M. Ricci, and M. Versaci, *Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems*. Springer, 2015.
- [10] NDT Olympus, “Ultrasonic transducers technical notes,” *Tech. Broch. Olympus NDT, Waltham, MA*, pp. 40-50, 2006.
- [11] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, “Ultrasonic testing,” pp. 1-37, 1990.
- [12] “NDT Resource Center - Data Presentation.” [Online]. Available: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/DataPres.htm>. [Accessed: 03-May-2017].
- [13] T. Nelliganm and D. Kass, “Intro to Ultrasonic Phased Array.” [Online]. Available: <http://www.olympus-ims.com/en/ultrasonics/intro-to-pa/>. [Accessed: 06-Apr-2017].
- [14] Olympus, “An Introduction to Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing.” [Online]. Available: <http://www.olympus->

ims.com/en/resources/white-papers/intro-ultrasonic-transducers-ndt-testing/. [Accessed: 07-Apr-2017].

- [15] E. K. Safari, Ahmad; Akdoğan, *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications*. Boston, MA: Springer US, 2008.
- [16] J. C. Drury, "Ultrasonics: Part 4. Transducers for generating and detecting sound waves," *Insight - Non-Destructive Test. Cond. Monit.*, vol. 47, no. 2, pp. 98-100, Feb. 2005.
- [17] S. Bogdan, F. Lewis, Z. Kovacic, and J. M. Jr, "*Advances in Industrial Control*". Springer, 2006.
- [18] R. Fox, "Interpretation of Ultrasonic Transducer Return Signal," 2009.
- [19] A. B. S. Aliquane, M. Hassam, A. Badidi Bouda, "Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) Design Evaluation of their Performances." [Online]. Available: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn591/idn591.htm>. [Accessed: 22-Dec-2016].
- [20] "Electromagnetic Acoustic Transducers - EMAT." [Online]. Available: <https://www.irisndt.com/us/specialized-ndt/electromagnetic-acoustic-transducers/>. [Accessed: 22-Dec-2016].
- [21] L. Silva, P. Barros, L. Quintino, R. Miranda, "Avanços Recentes na Inspeção por Métodos Não Destrutivos," *Tecnol. e Qual.*, 2008.
- [22] R. Ribichini, "Modelling of electromagnetic acoustic transducers," *PQDT - UK Irel.*, no. February, 2011.
- [23] "Resonant Acoustic NDT Technologies." [Online]. Available: http://www.resonic.com/emar_how_it_works.html.
- [24] J. D. Achenbach, *The Evaluation of Materials and Structures by Quantitative Ultrasonics*, vol. 330. Vienna: Springer Vienna, 1993.
- [25] F. Bertoncini, G. Giunta, M. Raugi, and F. Turcu, "Overview and Experimental Evaluation of Magnetostrictive Transducers for Guided Wave Inspection," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, no. SEPTEMBER 2012, 2016.
- [26] "Measurement of wall thickness of steam boiler tubes with EMAT transducers."

- [Online]. Available: <http://www.olympus-ims.com/pt/applications/thickness-boiler-tubes-emat-transducers/>. [Accessed: 23-Mar-2017].
- [27] M. Hirao and H. Ogi, "*Electromagnetic Acoustic Transducers*." Tokyo: Springer Japan, 2017.
- [28] A. E1774-12, "Standard Guide for Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs)," vol. 3, no. Reapproved, pp. 1-8, 2002.
- [29] A. Galvagni, P. Cawlwy, and M. Lowe, "Monitoring of Corrosion in Pipelines Using Guided Waves and Permanently Installed Transducers," 2012. [Online]. Available:
http://acoustics.org/pressroom/httpdocs/164th/Lowe_2aSAb1.html.
- [30] "Pipeline Inspection with Guided Waves." [Online]. Available:
<http://www.olympus-ims.com/en/applications/pipeline-inspection-with-guided-waves/>.
- [31] F. Bertoncini, M. Raugi, and F. Turcu, "Pipeline long-range inspection and monitoring by an innovative magnetic collar for magnetostrictive guided-wave systems," *e-Journal Nondestruct. Test.*, no. December, p. 1-10 (GWUT-2008-4), 2008