



Análise da causa de falha de um sistema AVAC e de sistema AQS de uma unidade hoteleira

SÓNIA NASCIMENTO AUGUSTO
(Licenciada em Engenharia Química e Biológica)

Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Manutenção e Produção

Orientadores:

Doutora Maria Teresa Oliveira Moura e Silva
Doutora Paula Ferreira Gorjão

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes
Vogais:

Doutor João Carlos Salvador Santos Fernandes
Doutora Maria Teresa Oliveira Moura e Silva

dezembro de 2024

Análise da causa de falha de um sistema AVAC e de sistema AQS de uma unidade hoteleira

SÓNIA NASCIMENTO AUGUSTO
(Licenciada em Engenharia Química e Biológica)

Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Especialização de Manutenção e Produção

Orientadores:

Doutora Maria Teresa Oliveira Moura e Silva, DEM / ISEL
Doutora Paula Ferreira Gorjão, LABMAT / ISQ

Júri:

Presidente: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mendes, ISEL/IPL

Vogais:

Doutor João Carlos Salvador Santos Fernandes, IST/UL
Doutora Maria Teresa Oliveira Moura e Silva, ISEL/IPL

dezembro de 2024

Agradecimentos

A todas as pessoas e instituições que contribuíram para o meu crescimento, quer a nível técnico quer no relacionamento interpessoal, dos quais destaco:

O corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, particularmente à Professora Doutora Teresa Moura e Silva, orientadora deste trabalho, pelo apoio e estímulo permanente, pois apesar dos meus obstáculos profissionais, acreditou sempre em mim.

Ao Instituto de Soldadura e Qualidade – Laboratório de Materiais, especialmente à Doutora Paula Gomes Gorjão, responsável técnica do Laboratório de Materiais, co-orientadora e amiga, por me orientar e por todos os ensinamentos a nível intelectual, profissional e pessoal, pela manifestação de incondicional apoio e disponibilidade, pela compreensão e por impulsionar o meu crescimento em diversas áreas da vida.

Aos meus colegas do laboratório de Materiais, evidenciando a Elisabete Vaz, pelo auxílio na realização do trabalho experimental, bem como pelo apoio técnico, transmissão de conhecimentos e amizade. Destaco ainda, a minha colega de equipa e confidente Ana Marisa Pereira, pela disponibilidade e motivação.

Aos meus amigos, com eles os momentos de maior *stress* foram atenuados, facilitando todo percurso.

À Dr.^a Inês Vieira Benkovskaia, a minha psicóloga, pelas palavras certas de orientação e incentivo, tornado os obstáculos em oportunidades.

Por último, mas não menos importante, à minha família, principalmente aos meus pais, que sem dúvida são os meus pilares, a quem devo o que sou hoje, aos valores transmitidos, sentido de responsabilidade, toda a estrutura e apoio incondicional que me proporcionaram e proporcionam para atingir os meus objetivos.

Declaração de integridade

Declaro que este relatório de estágio é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor



Lisboa, 30 de setembro de 2024

Análise da causa de falha de um sistema AVAC e de sistema AQS de uma unidade hoteleira

Resumo

O Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ), uma empresa que desenvolve soluções integradas de serviços de engenharia, inspeção, ensaios e testes, entre outros, foi consultado pelo departamento de manutenção de uma unidade hoteleira para analisar as causas de falha de um circuito de água quente.

Foram analisadas as causas de degradação de um troço de tubo de um sistema Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) e de troços de tubo de um sistema de Água Quente Sanitária (AQS) pertencentes à unidade hoteleira em causa. Concluiu-se que a degradação do tubo do circuito AVAC deveu-se à acumulação de água sob isolamento devido a fugas nos acessórios de ligação que provocaram um fenómeno de corrosão sob isolamento.

Nos tubos do circuito AQS foram observados dois fenómenos de degradação. Nas superfícies externas ocorreu um fenómeno de corrosão sob tensão resultante das tensões residuais devidas à soldadura, à presença de um metal suscetível e devido à acumulação de água entre a superfície metálica e o isolamento térmico. Esta água poderá ter tido origem em fugas nos acessórios ou em picadas e/ou fissuras trespassantes com origem na superfície interna dos tubos. Atribuiu-se a corrosão interna aos microrganismos presentes na água numa ação combinada com a presença de cloretos e potenciada pela deficiente qualidade das soldaduras que promoveu fenómeno de corrosão intersticial.

Palavras chave: Aço carbono, aço inoxidável 316L, falha por corrosão, AVAC, AQS.

Analysis of the failure cause of an HVAC and Domestic Hot Water systems in a hotel unit

Abstract

The Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ), a company that develops integrated solutions for engineering, inspection, and testing, among others, was consulted by the maintenance department of a hotel to investigate the root causes of a hot-water circuit failure.

The causes of degradation of pipes from HVAC and Domestic Hot Water (DHW) systems belonging to an hotel were analyzed. It was concluded that the degradation of the pipes in the HVAC circuit was due to the accumulation of water beneath the insulation caused by leaks in the connecting fittings, which led to a phenomenon of corrosion under insulation.

In the pipes of the DHW circuit, two degradation phenomena were observed. On the external surfaces, there was a phenomenon of stress corrosion cracking resulting from the residual stresses due to welding, the presence of a susceptible metal, and the accumulation of water between the metal surface and the thermal insulation. This water may have originated from leaks in the fittings or from pinholes and/or through cracks originating from the internal surface of the pipes. The internal corrosion was linked to microorganisms present in the water, which, combined with the presence of chlorides, lead to intense the corrosion. Additionally, the poor quality of the welds contributed to the development of interstitial corrosion.

Keywords: Carbon steel, stainless steel 316L, corrosion failure, HVAC, DHW.

Lista de Acrónimos / Siglas

AMPP – Associação para Proteção e Eficiência dos Materiais (*Association for Materials Protection and Performance*)

AQS (DHW) – Água Quente Sanitária (*Domestic Hot Water*)

AVAC (HVAC) – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*)

BC - Bomba de Calor

CBO₅ – Carência Bioquímica de Oxigênio COT - Carbono Orgânico Total

CQO - Carência Química de Oxigênio

CUI – Corrosão Sob Isolamento (*Corrosion Under Insulation*)

EDS - Espectroscopia de Dispersão de Energias de Raio-X (*Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy*)

HAZ – Zona Termicamente Afetada (*Heat Affected Zone*)

IOB - Bactérias Oxidantes de Ferro (*Iron-Oxidizing Bacteria*)

ISQ – Instituto de Soldadura e Qualidade

LABEND – Laboratório de Ensaios Não Destrutivos LABMAT – Laboratório de Materiais

LABQUI – Laboratório de Química

LSI - Índice de Saturação de Langelier (*Langelier Saturation Index*)

MIC – Corrosão Induzida por Microrganismos (*Microbiologically Induced Corrosion*)

NACE - National Association for Corrosion Engineers

OES - Espectroscopia de Emissão Ótica (*Optical Emission Spectroscopy*)

PIB – Produto Interno Bruto

PT – Líquidos Penetrantes (*Penetrant Testing*)

RBI – Inspeção Baseada no Risco (*Risk-Based Inspection*)

SCC – Corrosão Sob Tensão (*Stress Corrosion Cracking*)

SDT (TDS) - Sólidos Dissolvidos Totais (*Total Dissolved Solids*)

SEM - Microscopia Eletrônica de Varrimento (*Scanning Electron Microscopy*)

SRB – Bactérias Redutoras de Sulfato (*Sulfate Reducing Bacteria*)

SST (TSS) – Sólidos Suspensos Totais (*Total Suspended Solids*)

UFC – Unidades Formadoras de Colônia UTA – Unidade de Tratamento de Ar

VC – Ventiloinvetores

VRV - Volume de Refrigerante Variável

XRD – Difração por Raio-X (*X-Ray Diffraction*)

Índice

Agradecimentos	v
Declaração de integridade	vii
Lista de Acrónimos / Siglas.....	xiii
Índice de Figuras	xvii
Índice de Quadros	xxi
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Descrição do trabalho.....	2
1.4 Estrutura do documento.....	2
CAPÍTULO 2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO	5
2.1 Aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC)	5
2.1.1 Constituição e classificação básica dos sistemas	5
2.1.2 Classificação dos equipamentos	8
2.2 Águas quentes sanitárias (AQS).....	11
2.2.1 Sistemas solares térmicos.....	11
2.2.2 Sistema de aquecimento a gás: Esquentadores	13
2.2.3 Sistema de aquecimento elétrico: Termoacumuladores	14
2.2.4 Bombas de calor.....	14
2.3 CORROSÃO.....	16
2.3.1 Custos da corrosão.....	17
2.3.2 Mecanismos de corrosão	19
2.3.3 Passivação	21
2.3.4 Tipos de corrosão.....	25
2.3.5 Prevenção da corrosão	34
2.4 Análise Físico-química da água - Índice de saturação de Langelier (LSI)	35
CAPÍTULO 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	37
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	41
4.1 Inspeção no local	41
4.2 Análise visual	44
4.2.1 Análise visual das superfícies externas	44
4.2.2 Análise visual das superfícies internas	46
4.2.3 Análise visual após remoção de depósitos	48
4.3 Controlo radiográfico.....	50
4.4 Análise metalográfica.....	52
4.5 Análise química.....	56
4.6 Caracterização dos depósitos	56
4.6.1 Depósitos externos	56
4.6.2 Depósitos internos.....	59

4.7	<i>Análise por microscopia eletrônica de varrimento (SEM) assistida por espectroscopia de dispersão de energia (EDS)</i>	60
4.8	<i>Caracterização físico-química e microbiológica da água</i>	63
4.8.1	<i>Caracterização físico-química da água</i>	63
4.8.2	<i>Caracterização microbiológica da água</i>	64
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES, PROPOSTAS DE MELHORIA E LIMITAÇÕES		69
5.1	<i>Conclusões</i>	69
5.1	<i>Propostas de Melhoria e Limitações</i>	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		71

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Localização dos representantes internacionais do ISQ no mundo.	1
Figura 2.1 - Exemplo de um sistema de climatização centralizado [7].	6
Figura 2.2 - Exemplo de um sistema de climatização descentralizado [7].	7
Figura 2.3 – Representação esquemática dos múltiplos exemplos de sistemas AVAC [8]	10
Figura 2.4 – Representação esquemática de um circuito hidráulico termossifão [10].	12
Figura 2.5 – Representação esquemática simplificada de um sistema solar forçado [12].	13
Figura 2.6 – Esquema da constituição de uma bomba de calor [16].	15
Figura 2.7 – Exemplo do ciclo energético dos metais, especificamente do ferro metálico e óxido de ferro na forma de Hematite [17].	16
Figura 2.8 - Alguns dos principais setores que enfrentam o problema da corrosão [18].	17
Figura 2.9 – Distribuição dos custos da corrosão pelos setores económicos para cinco países, realizado pela NACE <i>International</i> [21].	18
Figura 2.10 – Ilustração das reações eletroquímicas durante a corrosão do aço [25].	20
Figura 2.11 - Exemplo de uma curva de polarização anódica (para um aço 18-8 CrNi em 1N H ₂ SO ₄ sem oxigénio a 50 °C) (adaptado de [23]).	22
Figura 2.12 – Diagrama de Pourbaix, com a indicação das zonas de imunidade, passivação e corrosão [27].	23
Figura 2.13 – Diagrama de Pourbaix para o sistema ferro-água a 25 °C, com a indicação da posição dos meios ácido, básicos, oxidantes e básicos [27].	24
Figura 2.14 –Diagrama de Pourbaix para o sistema ferro-água a 25 °C, onde é referenciado as regiões de estabilidade termodinâmica e a região de maior atividade de corrosão [27].	24
Figura 2.15 –Diagrama de Pourbaix para o sistema ferro-água a 25 °C, com a referência às linhas representadas [27].	25
Figura 2.16 – Representação dos tipos de corrosão eletroquímica do material metálico [31].	25
Figura 2.17 – Representação das formas de corrosão do material metálico [31].	26
Figura 2.18 – Os três fatores subjacentes à corrosão sob tensão [37].	29
Figura 2.19 – Esquema generalista do processo de SCC [39].	30
Figura 2.20 - Corrosão anaeróbia por SRB [41, 43].	32
Figura 3.1 - Fotografia ilustrativa das etapas do processo de aplicação do líquido penetrante [47]	38
Figura 4.1 - Evidência de oxidação das tubagens em aço inoxidável com resíduos do isolante polimérico fortemente aderente ao tubo: a) Geral; b) Pormenor da zona com ligações flangeadas e presença de óxidos na superfície do tubo.	41
Figura 4.2 - Evidências de fuga junto a ligações roscadas. Presença de depósitos esbranquiçados para além dos depósitos castanho-alaranjados típicos de corrosão de materiais ferrosos.	41
Figura 4.3 - Presença de escorrimentos e depósitos esbranquiçados sobre os revestimentos isolantes de alumínio.	42

Figura 4.4 - Vista geral de uma zona do circuito de AQS onde se podem observar locais com evidências de escorrimento esverdeado, comum em produtos de corrosão com cobre, próximo de acessórios de ligação	42
Figura 4.5 - Zona com união roscada onde se observam evidências de escorrimento de produtos esverdeados típicos indicativos da presença de cobre.....	43
Figura 4.6 - Zonas do circuito com reparação por soldadura.	43
Figura 4.7 – Amostra A onde se observa que um dos troços se encontra fortemente degradado; .	44
Figura 4.8 – Amostra B onde se observam: a) resíduos do isolamento térmico; b) zona com coloração térmica junto da soldadura; c) e d) detalhe da amostra B revelando defeitos na soldadura circunferencial.	45
Figura 4.9 – Amostra C a) com presença de depósitos esbranquiçados; b) detalhe evidenciando empolamentos e destacamento do revestimento/tinta; c) onde se verifica um desalinhamento na junta soldada.	46
Figura 4.10 - Superfícies internas da amostra A seccionada longitudinalmente: a) presença de depósitos de coloração castanho-alaranjada; b) detalhe de uma zona da meia cana com evidencias de formação de depósitos em forma de tubérculo;.....	47
Figura 4.11 - Vista geral das superfícies internas da amostra B; a) presença de depósitos de coloração castanho-clara depositados em toda a superfície; b) detalhe de uma zona da meia cana evidenciando acumulação de depósitos sobre os cordões de soldadura.....	47
Figura 4.12 – Amostra A, após remoção de depósitos: a) Troço de tubo que não apresentava degradação significativa; b) presença de picadas trespassantes no troço que apresentava maior acumulação de depósitos; c) acessório de união localizado entre os 2 troços de tubo; d) detalhe do acessório de união onde se evidencia a furação na zona roscada do tubo; e) detalhe mostrando a presença de uma picada trespassante junto do acessório de união na geratriz oposta representada à na Figura 4.12c).	49
Figura 4.13 – Amostra B após remoção de depósito: a) vista geral; b) detalhe evidenciando a presença de fissura.	49
Figura 4.14 – Amostra B após a realização do ensaio de líquidos penetrantes: a) vista geral da superfície externa onde foi aplicado o líquido penetrante seguido do relevador; b) detalhe da superfície externa com evidencias da presença de fissuras; c) vista geral da superfície interna onde foi aplicado apenas o relevador; d) presença de líquido penetrante na raiz da soldadura, e nas proximidades desta, indicando a presença de defeitos trespassante.	50
Figura 4.15 - Radiografia realizadas na amostra A, onde se verificou a presença de picadas e camada estratificada de produtos de corrosão.	51
Figura 4.16 - Radiografias realizada na amostra B, longitudinalmente: a) presença de fissuras dispersas e ramificadas em toda a superfície; b) fissuração no cordão de soldadura circunferencial e próximo do mesmo.	51
Figura 4.17 - Radiografia realizada na amostra B, transversalmente: a) descontinuidade do cordão de soldadura circunferencial, b) desalinhamento da junta.....	51
Figura 4.18 – Fotomicrografias ilustrativas de uma secção transversal evidenciando corrosão localizada na superfície externa da amostra A. Após preparação da amostra observou-se na figura	

a evolução da picada até se tornar trespassante (fotos sequenciais de a) a c)). (<i>Ampliação original: aproximadamente 25X.</i>)	52
Figura 4.19 - Fotomicrografia ilustrativa duma secção longitudinal na zona de ligação de acessórios na amostra A; a) vista geral. (<i>Ampliação original: aproximadamente 4,8X</i>); b) detalhe da Figura 20a) evidenciando a degradação do material. (<i>Ampliação original: aproximadamente 200X</i>).	52
Figura 4.20 - Fotomicrografia ilustrativa da microestrutura constituinte do material base da amostra A. (<i>Ampliação original: aproximadamente 200X</i>).	53
Figura 4.21 – Fotomicrografia ilustrativa duma secção longitudinal na zona da soldadura circunferencial da amostra B com presença de fissuras e picadas na superfície externa e na zona da raiz da soldadura.	54
Figura 4.22 – Fotomicrografia ilustrativa de duas secções longitudinais na zona da soldadura circunferencial da amostra B: a) presença de picadas da raiz da soldadura; b) fissuração ramificada no material fundido. (<i>Ampliação no original aproximadamente 12X</i>).	54
Figura 4.23 – Fotomicrografia ilustrativa da amostra B: a) picada na raiz da soldadura circunferencial. b) fissuração ramificada e trespassante maioritariamente com propagação transgranular c) fissuração ramificada essencialmente com origem na superfície externa. (<i>Ampliação original: 50X</i>)	55
Figura 4.24 – Fotomicrografia ilustrativa da microestrutura constituinte do material base da amostra B (<i>Ampliação no original 500X</i>).	55
Figura 4.25 - Espectro de EDS e respetiva composição semi-quantitativa dos resíduos externos, castanho-alaranjado, da amostra A.	57
Figura 4.26 – Difractograma de raios-X obtido para os depósitos externos da amostra A (vermelho) e sobreposição com o padrão de difração correspondente ao óxido de ferro na forma de <i>magnetite</i> (Fe_3O_4) (cinzento).	57
Figura 4.27 – Espectro de EDS e respetiva composição semi-quantitativa dos resíduos externos, esbranquiçados, encontrados na amostra C.	58
Figura 4.28 – Difractograma de raios-X obtido para os depósitos externos de coloração branca da amostra C (vermelho) e sobreposição com o padrão de difração correspondente ao carbonato de cálcio ($CaCO_3$) na forma de aragonite (cinzento).	58
Figura 4.29 – Espectro EDS e respetiva composição semi-quantitativa da amostra de resíduos internos, em forma de tubérculos, da amostra A.	59
Figura 4.30 - Difractograma de raios-X obtido para os depósitos internos da amostra A (vermelho) e sobreposição com o padrão de difração correspondente ao óxido de ferro na forma de <i>magnetite</i> (Fe_3O_4) (cinzento).	59
Figura 4.31 – Fotomicrografia obtida por SEM do filete de rosca no acessório de união da amostra A: a) zona analisada; b) espectro de EDS respetivo.	60
Figura 4.32 – Fotomicrografia obtida por SEM nos depósitos presentes na superfície externa do tubo da amostra A: a) zona analisada; b) espectro de EDS respetivo.	60
Figura 4.33 – a) Fotomicrografia obtida por SEM de uma zona com fissuração a partir da superfície interna; b) espectro de EDS realizado no interior da fissura (amostra B).	61
Figura 4.34 – Fotomicrografia obtida por SEM onde se observa a presença de fissuras no material fundido com propagação essencialmente interdendrítica. (Amostra B).	61

Figura 4.35 - Fotomicrografia obtida por SEM de uma fissura que termina em picada arredondada e com propagação para o interior em forma de túnel (Amostra B).	62
Figura 4.36 – Espectro de energias EDS e tabela com composição química semi-quantitativa para a zona A, identificada na Figura 4.35.	62
Figura 4.37 – Meios de cultura onde foi realizada a análise microbiológica da água recolhida no tanque: a) bactérias aeróbias; b) bactérias anaeróbias; c) bactérias oxidantes de ferro; d) bactérias redutoras de sulfatos.	64
Figura 4.38 – Fotografias ilustrativas dos meios de cultura onde foi realizada a análise microbiológica da amostra de água recolhida na tubagem de ida: a) meio de cultura para colónias de bactérias aeróbias; b) meio de cultura para colónias de bactérias anaeróbias; c) meio de cultura para colónias de bactérias oxidantes de ferro; d) meio de cultura para colónias de bactérias redutoras de sulfatos.	65
Figura 4.39 – Fotografias ilustrativas dos meios de cultura onde foi realizada a análise microbiológica da amostra de água recolhida na tubagem de retorno: a) meio de cultura para colónias de bactérias aeróbias; b) meio de cultura para colónias de bactérias anaeróbias; c) meio de cultura para colónias de bactérias oxidantes de ferro; d) meio de cultura para colónias de bactérias redutoras de sulfato.	65

Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Sistemas de climatização de edifícios existentes e respetivos equipamentos mais comuns.	9
Quadro 2.2 – Custo global da corrosão para cada região económica por setor (bilião US\$) 2013 [21].	19
Quadro 3.1 – Referência e descrição das amostras recolhidas para análise.	37
Quadro 4.1 – Composição química das amostras A e C.	56
Quadro 4.2 – Parâmetros físico-químicos das amostras de água recolhidas no tanque 1 da instalação e no início e no fim do circuito de água quente do sistema AVAC.	63
Quadro 4.3 – Resultados obtidos do cálculo do índice de Langelier.	64

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O presente relatório foi realizado no âmbito de um estágio profissional no Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ).

Com sede em Oeiras, perto de Lisboa, e com uma rede de 8 sucursais nacionais, o ISQ garante a cobertura de Portugal. A nível mundial, o ISQ tem uma presença permanente em mais de 15 países (Figura 1.1) e operações em cerca de 30 países.



Sede: Taguspark, Oeiras.

Sucursais nacionais: Vila Nova de Gaia, Sines, Castelo Branco, Loulé, Viseu e Monção. **Representantes internacionais:** Abu Dhabi, Argélia, Angola, Brasil, China, Guiné Equatorial, Guiana Francesa, México, Moçambique, Noruega, Omã, Catar, Arábia Saudita, Espanha, Turquia e EUA.

Figura 1.1 - Localização dos representantes internacionais do ISQ no mundo.

Fundado em 1965, o ISQ é uma empresa portuguesa, privada e independente com 1200 funcionários no mundo inteiro, dos quais 600 estão em Portugal, fornecendo serviços de inspeção, testes, ensaios, formação, consultoria técnica, pesquisa e desenvolvimento. Está presente em vários mercados como o aeroespacial, aeronáutica, energia, infraestruturas e automóvel. Possui 16 laboratórios acreditados, nas áreas da mecânica, eletricidade, fiabilidade, termodinâmica, metrologia, química, testes não destrutivos, entre outros, oferecendo aos seus clientes serviços e soluções de alta qualidade e inovadores, auxiliando-os a cumprir os padrões e regulamentos para a qualidade, segurança, ambiente e responsabilidade social.

Especificamente, o Laboratório de Materiais (LABMAT) realiza ensaios mecânicos, metalográficos e de corrosão, bem como análise química de materiais metálicos e não metálicos. Executa, também ensaios e análises em revestimentos, avaliação do comportamento de materiais a alta temperatura, análise experimental de tensões, e ainda análises de falha e peritagens.

Nessa qualidade, uma unidade hoteleira solicitou ao ISQ – LABMAT a análise das causas das falhas ocorridas em tubagens do circuito de água quente de um sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) e de um sistema de Águas Quentes Sanitárias (AQS),

onde se verificaram fugas de água e degradação do material das tubagens. De acordo com a informação fornecida, tinham sido detetadas fugas em troços de tubagem de ambos os sistemas, nas 2 torres de apartamentos da instalação hoteleira, pelo que troços de tubagem danificados foram substituídos em vários locais do circuito. Foi indicado ainda, que o ano de instalação dos sistemas tinha sido 2008.

1.2 Objetivo

Este estudo tem como objetivo averiguar as causas das falhas ocorridas nos circuitos de água quente de um sistema AVAC e AQS, de modo a promover a mitigação do problema e diminuição da frequência de falha, através de medidas de manutenção corretivas e/ou preventivas adequadas, com conseqüente aumento da eficiência energética e diminuição de custos de manutenção.

1.3 Descrição do trabalho

No decurso do trabalho realizado no ISQ-LABMAT, identificaram-se as causas da falha ocorrida no sistema AVAC e AQS da unidade hoteleira em causa. Para o efeito, técnicos do LABMAT deslocaram-se ao local para reconhecimentos dos circuitos afetados, tendo sido recolhidas amostras degradadas que foram alvo de análise detalhada, recorrendo a diferentes técnicas para a avaliação e identificação da degradação. Efetuou-se a análise visual, o estudo metalográfico, a análise dos depósitos existentes nas amostras, a análise da composição química do material, observação por microscopia eletrónica de varrimento e análise química/biológica da água.

1.4 Estrutura do documento

O presente trabalho está subdividido em 5 capítulos, dos quais o presente constitui a introdução, onde refere o enquadramento do trabalho, bem como os objetivos e a descrição e metodologias do trabalho realizado.

No CAPÍTULO 2, enquadramento teórico, encontram-se os fundamentos teóricos relevantes para uma melhor perceção do estudo realizado. Considera-se importante a compreensão do funcionamento de circuitos de sistemas AVAC e AQS e dos possíveis problemas que poderão surgir durante o seu ciclo de vida. Assim, neste capítulo, dá-se também ênfase à corrosão, um dos principais e mais frequentes problemas que ocorre neste tipo de sistemas. A corrosão do aço inoxidável é um dos objetos de estudo, sendo por isso a passivação um dos temas que constitui este Capítulo. São apresentados, também, os vários tipos e formas de corrosão que podem ocorrer, bem como os métodos de prevenção.

O CAPÍTULO 3 discrimina os procedimentos experimentais e metodologias utilizadas para a realização experimental do estudo das causas da falha em questão.

No CAPÍTULO 4 são apresentados todos os resultados experimentais obtidos.

Por fim, o CAPÍTULO 5 reúne todas as conclusões obtidas após a realização do estudo e expõe algumas limitações e propostas de melhoria bem como recomendações ao trabalho realizado e trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

Os sistemas AVAC e AQS apresentam especificações e funções distintas. Contudo, as suas principais causas de falha convergem para a inadequada seleção de materiais, ausência ou inadequado tratamento das águas, deficiências de instalação e problemas de manutenção. Em muitos casos são resultado da combinação de alguns destes fatores. Qualquer que seja a origem do problema, o resultado são tubagens e acessórios degradados, fugas e necessidade de reparações e substituição de troços ou da totalidade dos circuitos. Tal, constitui um problema grave para a manutenção devido aos custos de substituição, reparação, mão de obra e diminuição da eficiência energética [1].

Neste capítulo começa por se fazer uma breve introdução aos princípios de funcionamento dos sistemas de AVAC e AQS, após o que são apresentadas algumas noções de corrosão, dado ter sido este fenómeno, o responsável pela falha destes equipamentos.

2.1 Aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC)

As siglas AVAC ou HVAC significam Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado, ou em inglês “Heating, Ventilation and Air Conditioning”, traduzem as principais funções desta tecnologia usada pelo homem para criar as condições de conforto térmico e manutenção da qualidade do ar interior, quer ao nível dos edifícios como dos meios de transporte. Nesse sentido estes sistemas envolvem o controlo de temperatura, humidade e movimento do ar, para eliminação de odores e poeira (partículas) [2, 3].

Em resumo, os sistemas AVAC desempenham quatro funções principais:

- Aquecimento: Mantém a temperatura interior agradável durante os meses frios.
- Arrefecimento: Reduz a temperatura interior nos meses quentes.
- Ventilação: Renova o ar interior, removendo poluentes e odores.
- Condicionamento do ar: Controla a humidade e a qualidade do ar, garantindo um ambiente saudável [4].

2.1.1 Constituição e classificação básica dos sistemas

Os sistemas AVAC são compostos por diversos equipamentos e recebem uma classificação própria. Distinguem-se diferentes formas de os agrupar, consoante a localização dos equipamentos de produção de calor e de frio inerentes aos sistemas, sendo as mais relevantes a área servida pelo sistema e o tipo de fluido térmico utilizado [3, 5].

2.1.1.1 Área climatizada

Tendo em conta a área servida pelo sistema e o local onde é inicialmente produzido o calor ou o “frio”, os sistemas existentes podem ser agrupados em centralizados, semi-centralizados ou descentralizados

- Sistema centralizado: caracterizado por grandes equipamentos de aquecimento e/ou arrefecimento localizados num local próprio, normalmente denominado de zona técnica, que distribui o fluido térmico pelo edifício. Neste tipo de sistema a produção de energia térmica é gerida por um único equipamento primário como é ilustrado na Figura 2.1. É utilizado principalmente em grandes edifícios de comércio ou serviços, onde as necessidades térmicas são bastante elevadas e é importante maximizar o tempo de vida da instalação.
- Sistema semi-centralizado: nos sistemas semi-centralizados, à semelhança do sistema centralizado, os equipamentos de produção de frio e de calor também estão localizados em zonas técnicas, distintas das zonas a climatizar. Contudo, neste caso, a produção de energia térmica é gerida por um ou mais equipamentos primários, servindo várias zonas a climatizar de um edifício, podendo ser ampliado facilmente
- Sistema descentralizado: normalmente utilizado em construções de pequena ou média dimensão, ou servindo apenas um espaço de um edifício, compostos por uma unidade interior e outra exterior. Frequentemente classificados como sistemas autónomos de expansão direta de um fluido frigorigéneo, com uma ou mais unidades individuais de AVAC, conforme exemplificado na Figura 2.2 [3, 5, 6].

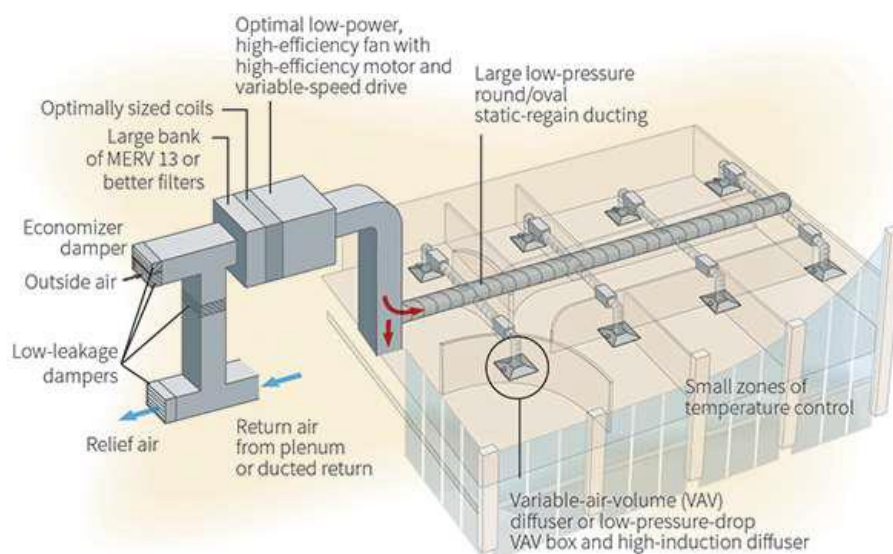


Figura 2.1 - Exemplo de um sistema de climatização centralizado [7].

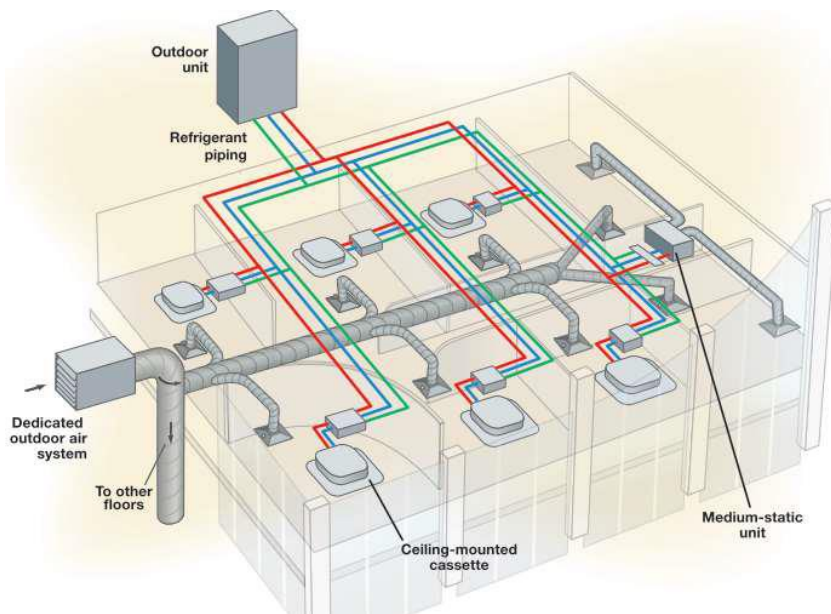


Figura 2.2 - Exemplo de um sistema de climatização descentralizado [7].

2.1.1.2 Tipo de fluido térmico

Os sistemas podem também ser classificados quanto ao nível do fluido térmico utilizado. Geralmente consideram-se os seguintes tipos de sistemas:

- Sistema Tudo-ar: o “frio” ou o calor são transportados ao local a climatizar por ar previamente arrefecido ou aquecido numa Unidade de Tratamento de Ar. Estes podem subdividir-se em sistemas de dupla conduta, em que numa das condutas circula ar frio e na outra ar quente, e conduta única, em que todo o ar é transportado para o espaço a climatizar por uma única conduta.
- Sistema Tudo-água: é distribuído pelos equipamentos terminais existentes em cada ambiente unicamente água fria ou quente em função das necessidades de arrefecimento ou aquecimento do local. Estes sistemas têm a vantagem de necessitarem de um espaço reduzido para o circuito de tubagem para distribuição de água aos diferentes locais.
- Sistema Ar-água: o condicionamento dos ambientes dos diferentes locais é feito utilizando em simultâneo a distribuição de água e de ar. O ar introduzido mecanicamente nos locais a climatizar é designado por ar primário, e é constituído normalmente apenas por ar novo, que foi tratado numa unidade de tratamento de ar.

As unidades de tratamento de ar são compostas por baterias normalmente de água (podendo ser também de expansão direta ou elétrica) funcionando como permutadores, responsáveis pelo aquecimento ou arrefecimento do ar conforme as necessidades do local a climatizar. A principal função do ar primário é assegurar as necessidades mínimas de ventilação e o controlo da humidade relativa dos diferentes locais.

- Sistema Expansão direta: é utilizado um fluido frigorigéneo/refrigerante que muda o seu estado físico, absorvendo ou rejeitando calor (latente) do espaço a climatizar, de forma a promover o arrefecimento ou aquecimento do local. Esta troca de calor é efetuada diretamente entre o ar ambiente e o fluido [2, 5].

2.1.2 Classificação dos equipamentos

Os sistemas AVAC são compostos por uma variedade de equipamentos mecânicos e elétricos que trabalham em conjunto para garantir o conforto térmico e a qualidade do ar interior. A estes, é atribuída uma classificação consoante a sua função e aplicação num sistema.

- Equipamentos primários: são utilizados para a produção de energia térmica, e normalmente são instalados nas áreas técnicas, coberturas ou fachadas do edifício.

Tendo como exemplo, os equipamentos mais comuns:

- Chillers
 - Caldeiras
 - Bomba de calor
 - Unidades de Tratamento de Ar (UTA)
 - Rooftop
- Equipamentos intermédios: estão instalados entre os equipamentos primários e terminais, sendo responsáveis por distribuir e regular os fluidos primários até aos equipamentos terminais. Por exemplo:
 - Bombas
 - Válvulas de controlo
 - Permutadores de calor
 - Registos
 - Filtros
- Equipamentos terminais: neste caso, o papel destes equipamentos é receber o fluido primário e direcioná-los para as zonas a climatizar. Por este motivo encontram-se situados na área a climatizar ou próximos desta. Tais como:
 - Difusores

- Grelhas
 - Radiadores
 - Convectores
 - Ventiloinvetores (VC)
 - Volume de refrigerante variável (VRVs)
- Equipamentos de regulação: têm como função o controlo, regulação e segurança, através da medição e monitorização dos parâmetros do sistema.
- Sondas
 - Termóstatos
 - Reguladores [5].

De forma a anular o efeito das cargas térmicas, latentes e sensíveis, com eficiência nos ambientes a condicionar, são utilizados determinados tipos de fluidos nos equipamentos terminais. O Quadro 2.1 mostra a relação entre os grupos de sistema de climatização de edifícios com os equipamentos mais utilizados em cada uma das classes. Para melhor perceção da relação entre os componentes e elementos com os múltiplos sistemas existentes das instalações AVAC, é representado um esquema geral na Figura 2.3.

Quadro 2.1 - Sistemas de climatização de edifícios existentes e respetivos equipamentos mais comuns.

Sistema de climatização	Equipamentos mais comuns
Tudo ar	UTAs; Roof-Tops; Ventiladores; Cortinas de ar; Recuperadores de calor.
Tudo água	Caldeira; Radiadores; Toalheiros.
Ar - água	Chillers; VCs.
Expansão direta	Splits; Multi-Splits; VRVs;

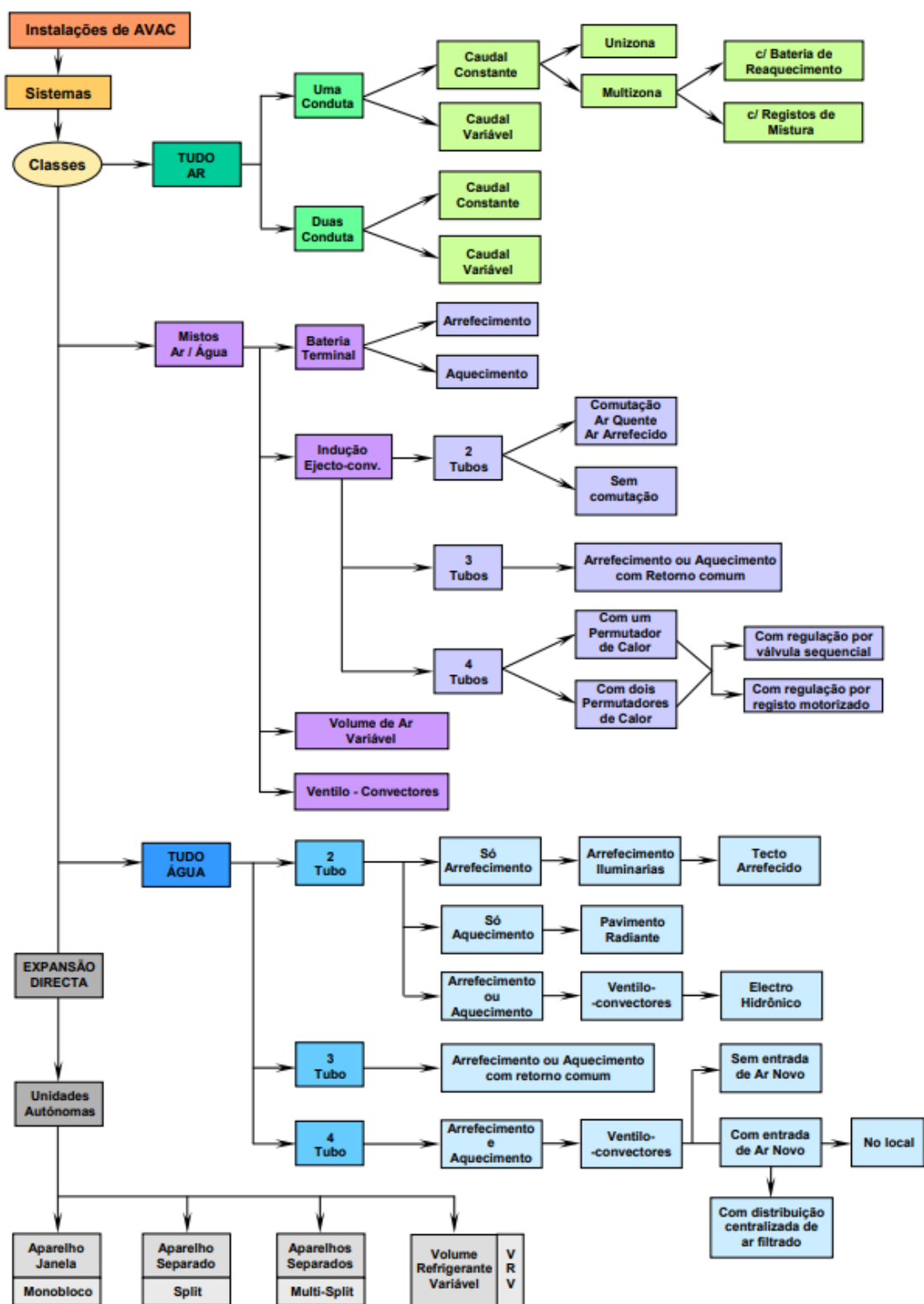


Figura 2.3 – Representação esquemática dos múltiplos exemplos de sistemas AVAC [8]

Relativamente à vida útil de um sistema AVAC, esta varia dependendo do tipo de equipamento e da manutenção efetuada. Em média, estima-se que um sistema de aquecimento dure cerca

de 15 a 20 anos, enquanto um sistema de ar condicionado pode durar de 10 a 15 anos. No entanto, é importante referir que a manutenção regular desempenha um papel fundamental na maximização da vida útil do sistema [9].

2.2 Águas quentes sanitárias (AQS)

Um sistema de água quente sanitária (AQS) funciona aquecendo a água para uso doméstico, como banhos, limpeza e lavagem de roupas e loiças. Existem diferentes tipos de sistemas de aquecimento de água, mas os mais comuns são os sistemas de aquecimento solar, sistemas a gás e sistemas elétricos.

2.2.1 Sistemas solares térmicos

O sol é uma fonte de energia inesgotável, contudo o seu aproveitamento depende de vários fatores como a intensidade da radiação, horas solares, localizações das instalações, capacidade de captação, inclinações, orientações, entre outros. Desta forma, para dimensionar instalações que garantam a captação de energia em função das necessidades, é indispensável complementar com sistemas de apoio de energia convencional. Para o aquecimento de água, através de energia proveniente da radiação solar é utilizado um coletor ou painel solar, que tem como finalidade absorver a radiação solar. Este processo de aquecimento de água através da energia solar, pode ser realizado através de um sistema de circulação natural (termossifão) ou via de um sistema de circulação forçada [10].

2.2.1.1 Sistema solar termossifão

O sistema de circulação natural denominado termossifão é um sistema limitado em termos de capacidade de armazenamento de energia e de área de captação. No entanto, este tipo de sistema não depende de meios mecânicos para circulação do fluido ou controlos eletrónicos para o seu funcionamento. É um sistema compacto, simples, de fácil instalação e de baixo custo. Frequentemente é aplicado em instalações mais reduzidas, ou seja, quando existem limitações em termos de espaço, quer na cobertura quer na zona técnica do edifício. É constituído por um depósito acumulador de calor, coletor solar, fluido térmico e as ligações hidráulicas, representados na Figura 2.4 [10, 11].

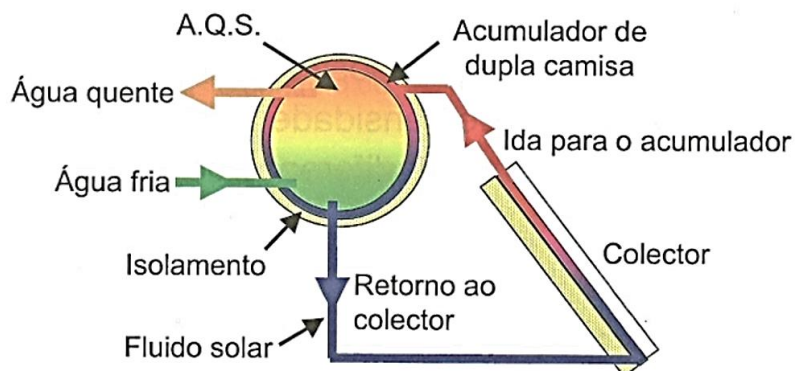


Figura 2.4 – Representação esquemática de um circuito hidráulico termossifão [10].

Em termos de funcionamento, no circuito primário circula o fluido térmico. Quando a radiação incide no coletor ocorre um aumento de temperatura deste fluido e, conseqüentemente, a diminuição da densidade do mesmo. Desta forma, o fluido circula com maior facilidade ascendendo do coletor para o depósito acumulador por convecção natural. No permutador do acumulador é transmitida a energia do fluido, na forma de calor, para a água que se encontra no interior do mesmo.

Quanto maior for a radiação solar disponível, maior será o caudal do fluido térmico que assegura a continuidade do processo. Por conseguinte, a temperatura no coletor deve ser sempre superior à temperatura no acumulador, de modo a permitir a circulação do fluido térmico. Quando tal não se verifica esta é interrompida suspendendo o funcionamento do sistema.

2.2.1.2 Sistema solar forçado

Comparativamente com a circulação natural, este tipo de instalação é um sistema mais eficaz, mas mais complexo, na medida em que envolve mais componentes e é tecnicamente mais exigente implicando um dimensionamento adequado para o seu funcionamento eficiente. Trata-se de uma solução ideal para habitações com espaço interior para o depósito, possibilitando a ampliação futura da instalação. Existem inúmeras formas de instalação de sistemas de circulação forçada. Estas podem variar quanto ao processo de transferência de calor (direta ou indireta), ao tipo e à quantidade de equipamentos utilizados, às ligações hidráulicas (em série, em paralelo ou em paralelo de canais) bem como quanto às aplicações (sistema AQS, apoio ao aquecimento central e apoio ao aquecimento de piscinas). No sistema de circulação forçada existe uma variedade de componentes, como já referido. Para além dos constituintes do sistema de circulação natural, acrescem um grupo hidráulico, que incorpora uma bomba garantindo a deslocação do fluido térmico do coletor para o depósito acumulador

com permutadores internos, caldeiras, vaso de expansão, para absorver as dilatações do fluido, controladores e sondas de temperatura (Figura 2.5).

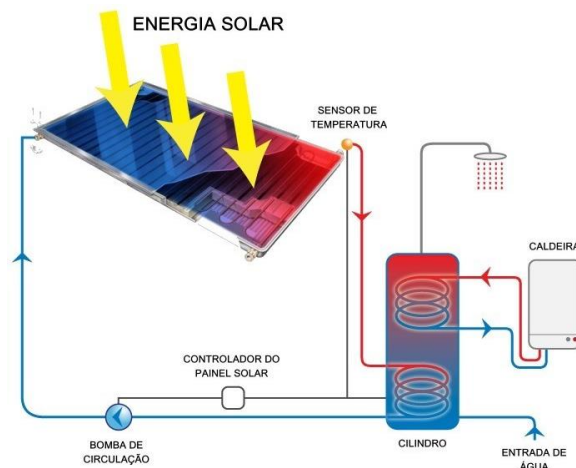


Figura 2.5 – Representação esquemática simplificada de um sistema solar forçado [12].

Nestes sistemas, uma vez que o transporte de energia é assegurado por uma bomba circuladora que permite o escoamento do fluido térmico, o acumulador pode ser instalado a um nível inferior aos coletores e sem limite de distância. Contrariamente ao sistema de circulação natural, o gradiente de temperatura entre o coletor e o acumulador, torna-se irrelevante, visto que quando a temperatura é inferior nos coletores solares, é acionado o controlador que fornece energia elétrica à bomba circuladora permitindo a deslocação do fluido térmico.

2.2.2 Sistema de aquecimento a gás: Esquentadores

Esquentadores a gás são equipamentos de produção instantânea de AQS, uma vez que produzem água quente no momento da sua utilização, entrando em funcionamento somente nessa ocasião. É bastante utilizado no sector doméstico, mas também em utilizações com menores necessidades, em contexto de edifícios de serviços, como em instalações sanitárias, cozinhas, copas ou laboratórios. O seu corpo compacto, a sua facilidade de utilização, economia e fácil integração são algumas das razões que tornaram os esquentadores tão populares, principalmente em apartamentos [13, 14].

Funcionam habitualmente a gás (natural, propano ou butano), podem ser de exaustão natural, ventilados (quando possuem um ventilador incorporado que força a saída dos gases de combustão) ou de condensação. Os esquentadores de condensação aproveitam o calor contido nos gases de combustão para efetuar o pré-aquecimento da água, permitindo-lhes atingir rendimentos na ordem dos 100% (o rendimento de um esquentador convencional é da ordem dos 85%)

O calor gerado na câmara de combustão pela queima do gás, alimentado por uma conexão de gás, é trocado com a água fria através de um permutador de calor. Aquando da saída da

água do esquentador, esta encontra-se à temperatura regulada no controlo do esquentador. Este controlo pode ser analógico ou digital, mas é sempre um controlo de simples utilização. Todos os esquentadores vêm equipados com equipamentos de segurança para prevenir que haja um sobreaquecimento da água à saída ou, no caso de se apagar a chama, um corte do gás para prevenir possíveis acidentes. [13, 14].

2.2.3 Sistema de aquecimento elétrico: Termoacumuladores

Uma solução tradicional para a produção de AQS por acumulação são os termoacumuladores elétricos, também conhecidos como cilindros ou depósitos. São reservatórios que aquecem um determinado volume de água, volume este que depende da capacidade escolhida e que varia tipicamente entre 15 e 300 litros. Existem versões especificamente concebidas para um aquecimento rápido, com elevados rácios de potência por volume de acumulação, que permitem uma resposta quase instantânea às necessidades de água quente. Estes equipamentos podem ser instalados vertical ou horizontalmente, consoante o espaço disponível. No entanto, na vertical, a repartição entre água quente e fria é melhor (estratificação mais eficiente). São constituídos por uma proteção exterior, e internamente possuem um depósito/reservatório em aço vitrificado ou em cobre, com a resistência química necessária evitar a degradação, por corrosão, do reservatório. O espaço entre o depósito/reservatório e a proteção exterior é ocupado por um material termicamente isolante. Os termoacumuladores apresentam um custo acessível e são de fácil instalação [14, 15]. Nestes equipamentos o aquecimento da água é tipicamente efetuado por meio de uma resistência elétrica, evitando a produção de gases o que dispensa a necessidade de chaminés e/ou de condutas de exaustão. O seu princípio de funcionamento é extremamente simples, permitindo produzir água quente por acumulação de calor para posterior utilização, sendo a temperatura controlada por termóstato. Basicamente a água fria é encaminhada para um aquecedor elétrico, onde é aquecida por meio de resistências elétricas, após o seu aquecimento é armazenada em um tanque onde fica disponível para uso imediato. O aquecedor elétrico carece da conexão a uma fonte de energia elétrica [14, 15].

2.2.4 Bombas de calor

As bombas de calor para produção de AQS são uma das opções mais eficientes e com menores custos de operação que se encontra disponível no mercado, possibilitando uma poupança considerável, na ordem dos 85%, quando comparadas aos termoacumuladores convencionais. Além de serem um dos sistemas de aquecimento de água mais económicos e sustentáveis, também asseguram o aquecimento do espaço, transferindo ou movimentando o calor do ar, do solo ou da água para o aquecimento com um baixo impacto ambiental. Quando as temperaturas ambientes sobem as bombas de calor podem ter um efeito oposto,

retirando o calor do ambiente interior e transferindo-o para o exterior, refrigerando o espaço. Apesar de exigirem um investimento inicial mais elevado, o mesmo acaba por ser compensado rapidamente, uma vez que as bombas de calor reduzem o consumo energético e o consumo de água graças a economizadores de água para uma maior eficiência de aquecimento. A energia consumida para operar uma bomba de calor AQS é cerca de quatro vezes inferior à energia consumida por uma resistência elétrica o que se traduz numa poupança efetiva, não só económica, mas também de recursos naturais. Algumas bombas de calor permitem a integração de apoio solar, através de um permutador, semelhante aos usados em termoacumuladores esmaltados comuns. Estas BC AQS vêm preparadas para só trabalhar fora do período de aquecimento solar e caso exista necessidade de águas quentes, reduzindo o consumo de eletricidade ao máximo. Com a integração de um sistema solar com a BC AQS, os custos de operação do sistema reduzem-se ainda mais, o que faz desta, a solução com menores custos de operação disponível no mercado. Existem vários tipos de bombas de calor e com diferentes relações entre a fonte de calor e o fluido de permuta: água – água, água – ar, ar – água, ar – ar, solo – água ou solo – ar [14, 16].

O funcionamento de uma bomba de calor para produção de AQS é idêntico ao de uma bomba de calor para climatização, isto é, baseia-se num ciclo frigorífico funcionando, do ponto de vista termodinâmico, de modo inverso, mas similar, na medida em que aproveita o calor do ar para produzir energia, na forma de calor. A bomba de calor para produção de águas quentes sanitárias (BC AQS) pode ser vista como sendo composta por duas partes, a bomba de calor em si e o depósito de águas quentes sanitárias envolvido numa serpentina, onde ocorre a transferência de calor. A bomba de calor em si é acoplada na parte superior da BC AQS e o fluido de refrigeração comprimido é forçado a trocar calor com a água sanitária através da serpentina (Figura 2.6).

Ligações:

- 1 – Ânodo de corrente impressa
- 2 – Saída secundária de AQS
- 3 – Resistência elétrica
- 4 – Entrada do permutador
- 5 – Bainha para sonda solar ou caldeira
- 6 – Saída do permutador
- 7 – Entrada de água fria sanitária
- 8 – Bainha para sonda
- 9 – Painel de controlo

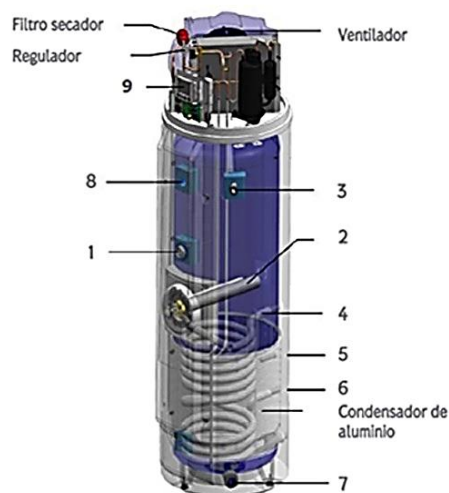


Figura 2.6 – Esquema da constituição de uma bomba de calor [16].

Um sistema de tubos faz a ligação aos quatro elementos essenciais da bomba de calor (evaporador, compressor, condensador e válvula de expansão), no qual circula um fluido refrigerante que vaporiza ao receber calor e condensa ao perdê-lo. O fluido, quando presente no evaporador, encontra-se no estado líquido a baixa pressão. Ao absorver calor da fonte fria vaporiza-se e torna-se gás a baixa pressão, sendo encaminhado para o compressor que, ao atuar sobre este vapor, aumenta a sua pressão e a sua temperatura. O vapor, passa para o condensador onde é condensado transmitindo o calor para o ambiente a aquecer. O fluido passa para o estado líquido, ainda a alta pressão. A válvula de expansão permite que a pressão e a temperatura diminuam [14].

2.3 CORROSÃO

Na natureza, os metais raramente são encontrados na sua forma pura. Na generalidade estão presentes em formas combinadas, como óxidos, sulfuretos, entre outros compostos, sendo necessário promover a redução destes para os transformar na sua forma metálica pura, num processo que requer energia. Consequentemente, os metais encontram-se num estado de maior energia, pelo que a sua tendência é regressar espontaneamente a estados mais estáveis e de menor energia, o que ocorre através da corrosão — uma oxidação espontânea e gradual do metal. A Figura 2.7, ilustra o ciclo do ferro que inicia com a extração do mineral de minério de ferro, na forma de óxido de ferro, Fe_2O_3 , (hematite). Após vários processos siderúrgicos, que envolvem fornecimento de energia, o óxido de ferro é reduzido a ferro metálico (Fe), que é então processado para a produção de aço e utilizado em diversas aplicações industriais [17]. Ao longo do tempo o Fe metálico vai-se progressivamente oxidando (corroendo), formando compostos oxidados de menor energia, como a ferrugem.

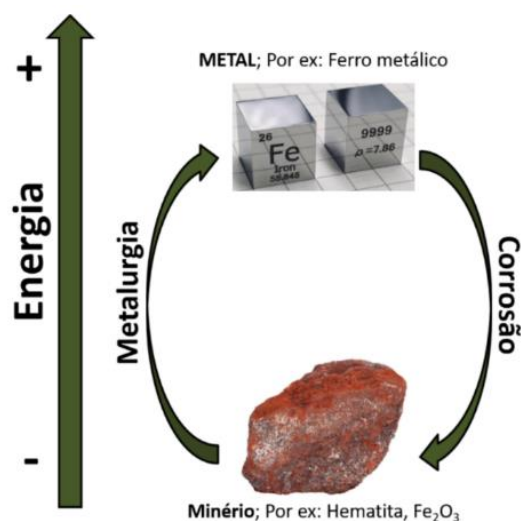


Figura 2.7 – Exemplo do ciclo energético dos metais, especificamente do ferro metálico e óxido de ferro na forma de Hematite [17].

2.3.1 Custos da corrosão

Sendo a corrosão um processo de degradação espontâneo, este torna-se um desafio para a produção e manutenção nos variados setores de atividade, como indústrias petrolíferas, serviços de abastecimento de água, estação de tratamento de águas residuais, aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC), centrais termoelétricas, construção, setores alimentar e farmacêutico, indústria automóvel e muitos outros (Figura 2.8) [18]. Está presente em toda a parte na civilização; basta olhar ao redor para constatar a presença deste fenómeno, pontes, cais, edifícios civis e industriais, reservatórios, tubagens, barcos, automóveis, estruturas metálicas, são apenas alguns exemplos de elementos suscetíveis ao fenómeno da corrosão, que em condições propícias, pode propagar-se de forma rápida e silenciosa, com danos significativos. Trata-se, portanto, de um fenómeno à escala mundial do qual resultam consequências graves e custos elevados [19, 20].

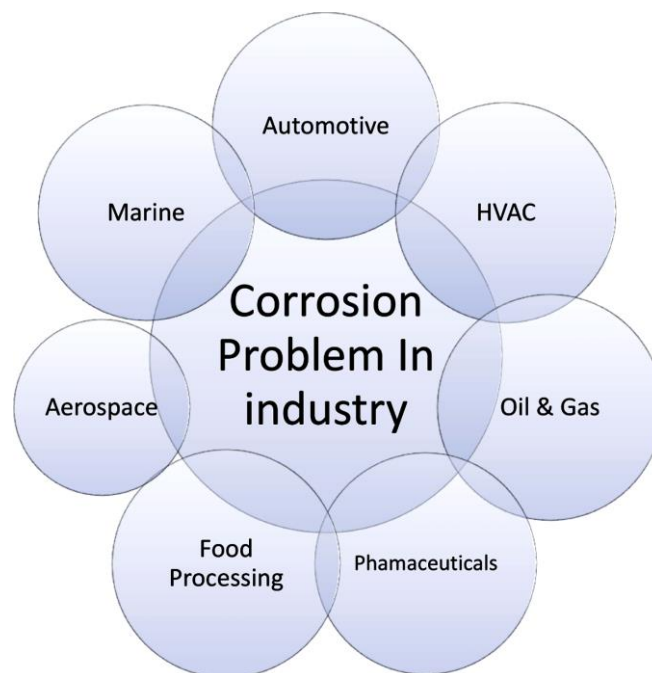


Figura 2.8 - Alguns dos principais setores que enfrentam o problema da corrosão [18].

Em termos económicos, a corrosão acarreta, ademais dos custos para a sua prevenção que são cerca de 4 a 7% do custo total da construção, custos para controlo da mesma, com reparações, substituição e perda de materiais, paragens de produção, diminuição de eficiência e contaminação de produtos. Acarreta ainda, custos indiretos, consequentes deste fenómeno de degradação, como custos sociais ou efeitos sobre outras companhias [19, 20].

De acordo com o *International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies (IMPACT)* de 2016 da NACE (*National Association of Corrosion Engineers*) *International*, um estudo realizado para avaliar a percentagem dos custos com a

corrosão nos setores económicos da indústria, serviços de transporte e armazenamento, e agricultura, através da análise do custo global da corrosão utilizando dados do setor económico e do Produto Interno Bruto (PIB) do Banco Mundial, países como os Estados Unidos, Japão e Reino Unido, apresentam um perfil idêntico, uma vez que são países economicamente desenvolvidos nas áreas da indústria e dos serviços. Por sua vez, a Índia, com uma economia no sector da agricultura significativo, e o Kuwait, onde predomina o sector da indústria do petróleo, apresentam perfis muito distintos como evidenciado na Figura 2.9 [21, 22].

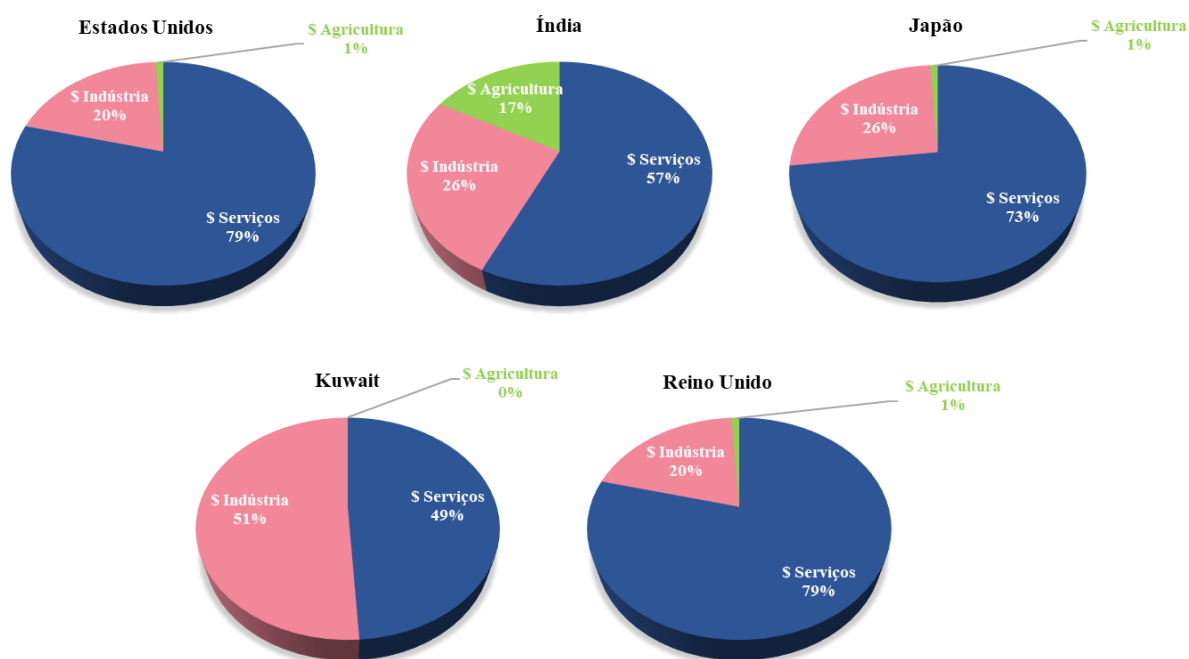


Figura 2.9 – Distribuição dos custos da corrosão pelos setores económicos para cinco países, realizado pela NACE *International* [21].

Assim, de acordo com o Banco Mundial, a economia global foi dividida em regiões económicas com economias semelhantes, permitindo uma análise mais precisa e comparável dos setores económicos em todo o mundo. Estas regiões são: Estados Unidos, Índia, Região europeia, Mundo Árabe, China, Rússia, Japão, Quatro Tigres Asiáticos + Macau e Resto do Mundo. Desta forma foi possível estimar o custo global da corrosão através da soma dos custos de corrosão totais de cada uma das regiões económica referidas, conforme mostra o Quadro 2.2. De notar que nestes valores não estão incluídos outros custos, mais difíceis de contabilizar, associados com problemas de segurança ou ambientais.

Quadro 2.2 – Custo global da corrosão para cada região económica por setor (bilhão US\$) 2013 [21].

Regiões económicas	Custos de corrosão (bilhão US\$)				PIB Total (bilhão US\$)	% do custo da corrosão equivalente ao total PIB da região
	Setores económicos			Total		
	Indústria	Serviços	Agricultura			
Estados Unidos	\$ 303,20	\$ 146,00	\$ 2,0	\$ 451,20	\$16 720,00	2,7%
Índia	\$ 20,30	\$ 32,30	\$ 17,7	\$ 70,30	\$ 1 670,00	4,2%
Região Europeia	\$ 401,00	\$ 297,00	\$ 3,5	\$ 701,50	\$18 331,00	3,8%
Mundo Árabe	\$ 34,20	\$ 92,60	\$ 13,3	\$ 140,10	\$ 2 789,00	5,0%
China	\$ 192,50	\$ 146,20	\$ 56,2	\$ 394,90	\$ 9 330,00	4,2%
Rússia	\$ 37,20	\$ 41,90	\$ 5,4	\$ 84,50	\$ 2 113,00	4,0%
Japão	\$ 45,90	\$ 5,10	\$ 0,6	\$ 51,60	\$ 5 002,00	1,0%
Quatro tigres asiáticos e Macau	\$ 29,90	\$ 27,30	\$ 1,5	\$ 58,70	\$ 2 302,00	2,5%
Resto do Mundo	\$ 382,50	\$ 117,60	\$ 52,4	\$ 552,50	\$16 057,00	3,4%
Global	\$ 1 446,70	\$ 906,00	\$ 152,6	\$ 2 505,30	\$74 314,00	3,4%

De acordo com o estudo da NACE *International*, e com a AMPP, *Association for Materials Protection and Performance*, a autoridade mundial em corrosão, verifica-se que os encargos devido aos problemas de corrosão a nível global ascendem a aproximadamente 2,5 triliões de dólares, o equivalente a 3,4% do PIB. No caso de Portugal, este valor representa mais de 5 mil milhões de €. É um valor de proporções significativas que coloca a corrosão não só nas temáticas da durabilidade de estruturas e impacto ambiental, mas também na discussão económica e financeira [20, 21].

2.3.2 Mecanismos de corrosão

Em termos gerais, a corrosão é definida como a degradação de um material, geralmente metálico, ou das suas propriedades, causada pela reação com o ambiente no qual está inserido. Pode ocorrer e manifestar-se de diversas formas e com uma frequência relativa que

varia consoante o material utilizado, o meio a que está exposto e as condições de serviço em geral.

De uma forma abrangente, a corrosão pode dividir-se em três grupos principais:

- Corrosão eletroquímica ou húmida, em que o ambiente corrosivo é aquoso com espécies dissolvidas, constituindo o eletrólito.
- Corrosão em outros fluidos, tais como sais fundidos e metais fundidos.
- Corrosão química ou seca, onde o ambiente corrosivo é um gás seco, sem a presença de um eletrólito e geralmente a alta temperatura [23, 24].

Uma vez que o presente trabalho trata de fenómenos de degradação por corrosão na presença de água com espécies dissolvidas, será abordada apenas a corrosão eletroquímica. O processo de corrosão eletroquímica baseia-se em reações de oxidação-redução, ou redox, onde ocorre a transferência de eletrões entre o metal e espécies presentes num eletrólito (solução aquosa), normalmente oxigénio (O_2), como exemplificado no esquema representado na Figura 2.10, que ilustra a corrosão eletroquímica do aço. Basicamente, a semirreação de oxidação, equação (2.1), também designada por reação anódica, acontece no ânodo onde o metal é oxidado, ou seja, ocorre a dissolução do metal e este perde eletrões formando iões metálicos (M^{2+}) que permanecem na solução aquosa. Os eletrões, por sua vez, migram através do metal para o cátodo, onde são consumidos na semirreação de redução equação (2.2) ou reação catódica. Em meios agressivos neutros ou básicos onde exista oxigénio dissolvido este recebe os eletrões (reduz-se) originando os iões hidróxido (OH^-). Desta forma o circuito elétrico é fechado pela condução iónica através do eletrólito. Os iões em solução, OH^- e M^{2+} reagem formando produtos insolúveis que precipitam na forma de hidróxido do metal, conforme as equações (2.3) e (2.4) [1, 23].

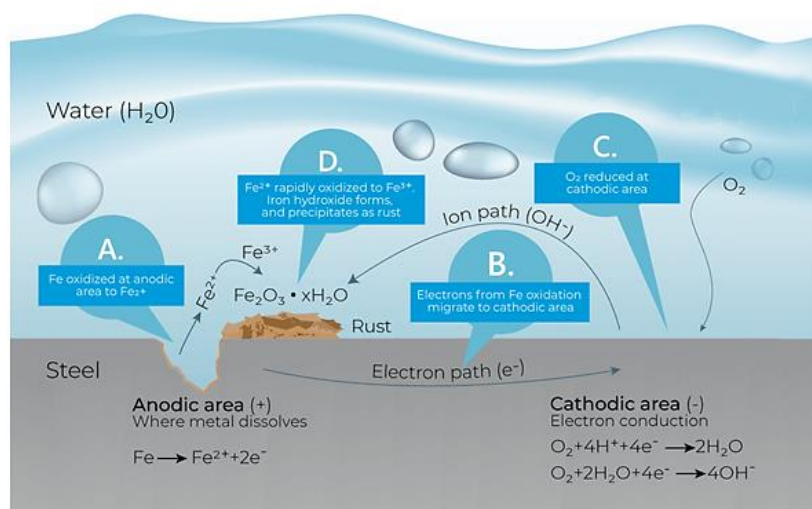
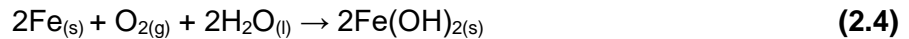


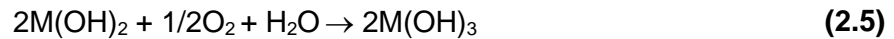
Figura 2.10 – Ilustração das reações eletroquímicas durante a corrosão do aço [25].



Utilizando o aço como exemplo, a reação global da corrosão do ferro (Fe), obtida da combinação das três reações apresentadas seria:



De notar que os produtos de corrosão podem ser, por sua vez, ser oxidados a óxidos/hidróxidos de estado de oxidação superior, tal como traduzido na equação (2.5) [1].



2.3.3 Passivação

2.3.3.1 Filmes passivos

A passivação metálica é um fenómeno observado durante a exposição de certos metais e ligas. De uma forma simplificada pode ser definida como uma perda de reatividade, isto é, um aumento substancial da resistência à corrosão sob certas condições ambientais. Este fenómeno corresponde à formação de um filme de óxidos, muito fino (da ordem dos nm), compacto e aderente que se forma na superfície dos metais como resultado de corrosão. Uma vez formado, este filme vai atuar como uma barreira entre o metal e o meio agressivo, impedindo a progressão da corrosão. O grau de proteção conferido pelos filmes passivos é obviamente dependente das suas características: existem metais e ligas altamente resistentes à corrosão devido à formação de filmes passivos mais resistentes enquanto, noutros casos, onde a película protetora é pouco resistente ou o meio é mais reativo, a corrosão não é eficientemente detida [28, 29, 30].

O fenómeno de passivação pode ser ilustrado através duma curva corrente-potencial (Figura 2.11). Verifica-se um crescimento inicial da corrente, provocada por um aumento de potencial na direção anódica, correspondente à dissolução metálica. Após atingir um máximo, a corrente decresce rapidamente com a polarização anódica, até estabilizar num patamar, característico do estado de passivação. Nesta fase, o elétrodo mantém-se no estado passivo mesmo com o aumento contínuo do potencial. Para potenciais ainda mais elevados, a corrente aumenta novamente, indicando a possível destruição do filme passivo pela ação de

espécies agressivas do meio. O aumento da corrente pode indicar ainda, a libertação de oxigénio [28, 29].

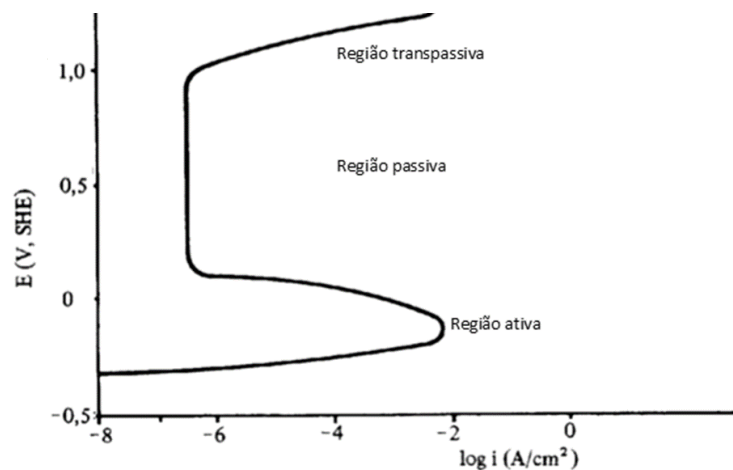


Figura 2.11 - Exemplo de uma curva de polarização anódica (para um aço 18-8 CrNi em 1N H₂SO₄ sem oxigénio a 50 °C) (adaptado de [23]).

Do ponto de vista da engenharia, o fenómeno da passivação é extremamente importante pois permite a seleção e utilização de metais ou ligas que, não sendo excessivamente caros, apresentam elevada resistência à corrosão. É assim importante que metais e ligas sejam capazes de se passivarem espontaneamente (auto-passiváveis) quando em contacto com os meios agressivos mais comuns. Além deste aspeto, para que possam ser usados com segurança, caso a película de passivação seja danificada, o que colocaria o material em risco de falha, esta deve ser capaz de se autorregenerar [1].

Um exemplo de ligas metálicas que reúnem as condições referidas, isto é formação espontânea de um filme de óxidos protetor capaz de se regenerar, são os aços inoxidáveis desenvolvidos na década de 1920. Estas ligas são uma escolha popular para diversas aplicações em diversos setores devido às suas propriedades físico-químicas e mecânicas. Este material é constituído por ligas à base de ferro que contêm pelo menos 10.5% de crómio (Cr), que reage naturalmente com o oxigénio formando uma fina película de óxido de crómio, impedindo a oxidação do ferro, proporcionando a proteção do aço contra a corrosão. Apesar da capacidade destes filmes passivos se autorrepararem, mesmo quando danificados, em determinadas condições pode ocorrer a rutura local do filme, ficando o metal exposto ao meio externo e a condições agressivas que levam à corrosão localizada do mesmo. Nestes casos a ocorrência de corrosão deve-se, normalmente, à ação de iões cloreto que quebram o filme de passivação ou impedem a formação do mesmo.

2.3.3.2 Diagramas de Pourbaix

Os diagramas de Pourbaix indicam os domínios de estabilidade termodinâmica de uma espécie ou composto químico em função do potencial e do pH [1]. Ou seja, como o potencial do processo de corrosão depende do equilíbrio das reações de corrosão, e estas dependem do pH, pode-se estabelecer uma relação em função do pH, representado graficamente como diagrama de Pourbaix, conhecido por diagrama de equilíbrio termodinâmico. Na Figura 2.12 observam-se três zonas distintas. A zona de imunidade, correspondente à zona onde a corrosão é termodinamicamente desfavorável, o metal não se corrói, permanecendo estável para qualquer valor de pH. A zona definida como passivação representa as condições em que são formados os estados passivantes, a formação do filme passivante que impede a oxidação do metal, tornando estáveis os óxidos ou hidróxidos do metal. Por fim, as zonas onde as combinações de pH e potencial indicam que os íons de metal ou íons complexos são as fases estáveis, ou seja, onde ocorre corrosão [26].

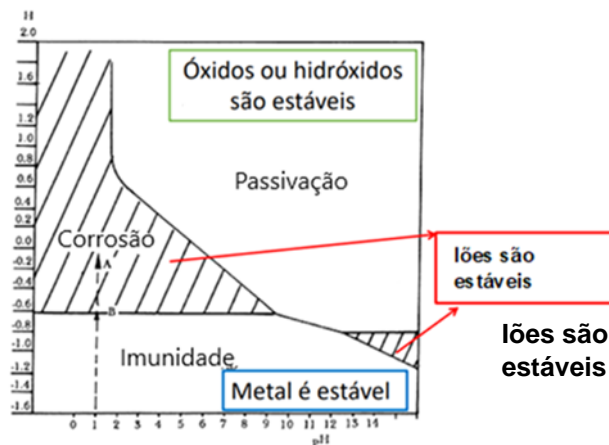


Figura 2.12 – Diagrama de Pourbaix, com a indicação das zonas de imunidade, passivação e corrosão [27].

Na Figura 2.13, observa-se o diagrama de Pourbaix específico para o sistema ferro-água a 25 °C, que apresenta diferentes zonas de estabilidade do ferro, onde este pode estar na forma metálica ou oxidada, dependendo do potencial eletroquímico e do pH. Verifica-se que, em potenciais e pH muito baixos, o meio é redutor, e o ferro tende a permanecer estável na forma metálica (Fe) - região de imunidade. Quando o potencial é elevado, mas o pH apresenta valores muito baixos o meio é oxidante e ácido. Nestas condições verifica-se que as espécies termodinamicamente mais estáveis são os íons metálicos pelo que é de esperar corrosão metálica. Pelo contrário, para potenciais e pH (meios oxidantes e alcalinos), os hidróxidos e óxidos metálicos são estáveis, pelo que esses meios induzem a passivação do metal.

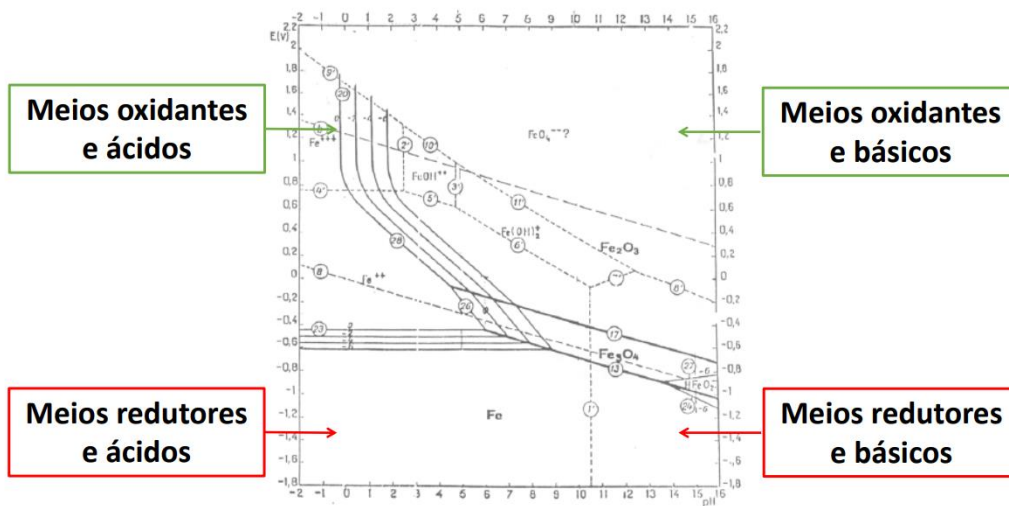


Figura 2.13 – Diagrama de Pourbaix para o sistema ferro-água a 25 °C, com a indicação da posição dos meios ácido, básicos, oxidantes e básicos [27].

Estas linhas diagonais tracejadas (a) e (b) delimitam a zona onde a água é termodinamicamente estável. A linha (a) traduz o equilíbrio químico em meios desarejados e a linha (b) traduz o equilíbrio químico em meios arejados. Abaixo da linha (a) a corrosão ocorre com evolução do hidrogénio, enquanto acima da linha (b) tem-se a evolução de oxigénio, como representado nas Figura 2.14 e Figura 2.15 [1]. Estes tipos de diagramas podem, portanto, ser utilizados para prever o comportamento face à corrosão dos metais pela identificação das regiões passiva e ativa. Estes diagramas ajudam na interpretação das causas de perda da natureza protetora do filme passivo na região [26].

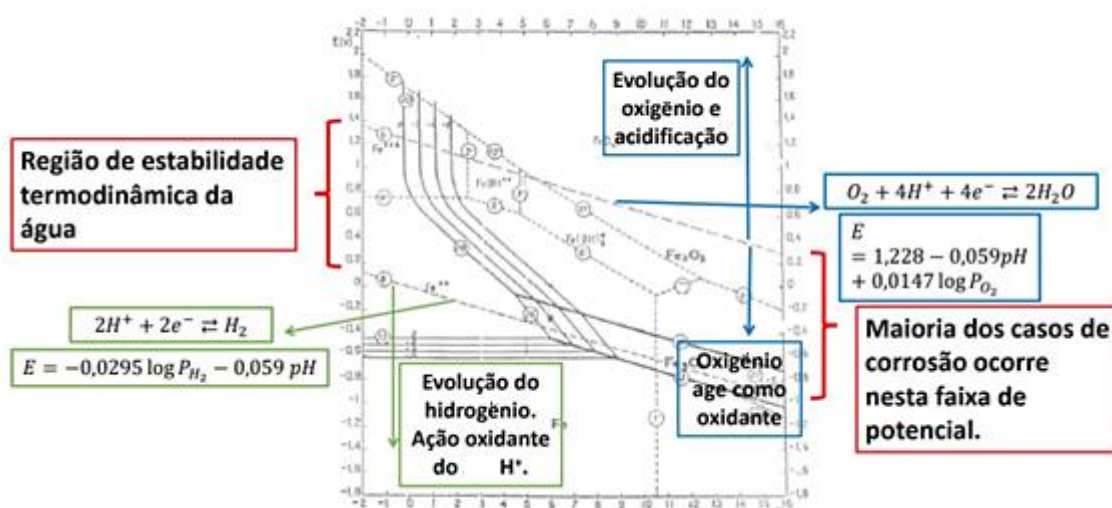


Figura 2.14 –Diagrama de Pourbaix para o sistema ferro-água a 25 °C, onde é referenciado as regiões de estabilidade termodinâmica e a região de maior atividade de corrosão [27].

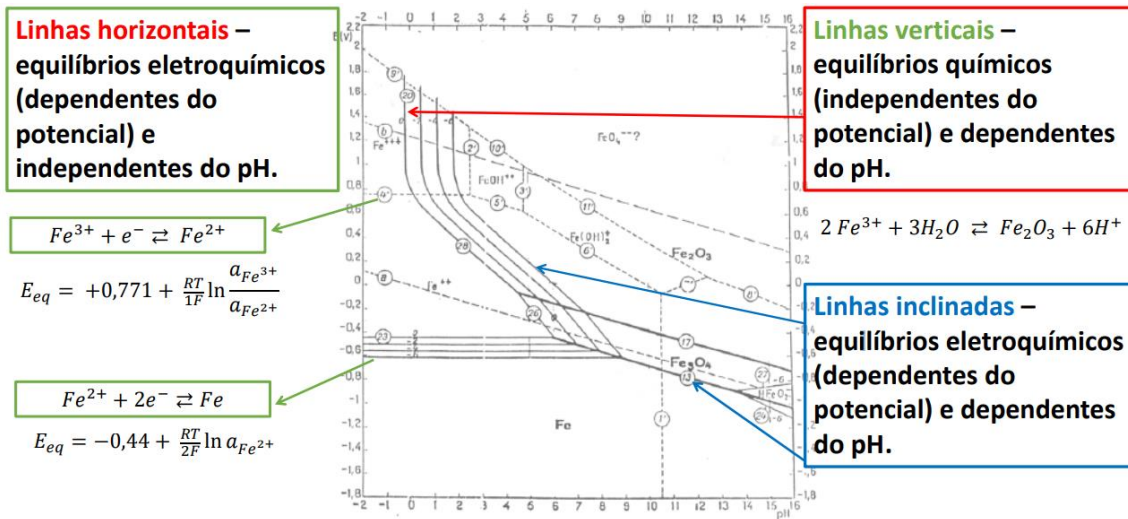


Figura 2.15 –Diagrama de Pourbaix para o sistema ferro-água a 25 °C, com a referência às linhas representadas [27].

2.3.4 Tipos de corrosão

As formas de degradação podem manifestar-se de diversas formas, estando-se muitas vezes perante um verdadeiro atlas de corrosão. É habitual classificar a corrosão de acordo com a aparência da superfície corroída, sendo de considerar dois grupos: uniforme, ou seja, por toda a superfície do material, ou localizada, onde as estruturas se apresentam corroídas apenas em determinadas zonas. O esquema representado na Figura 2.16 e a Figura 2.17 ilustram algumas formas de corrosão eletroquímica.

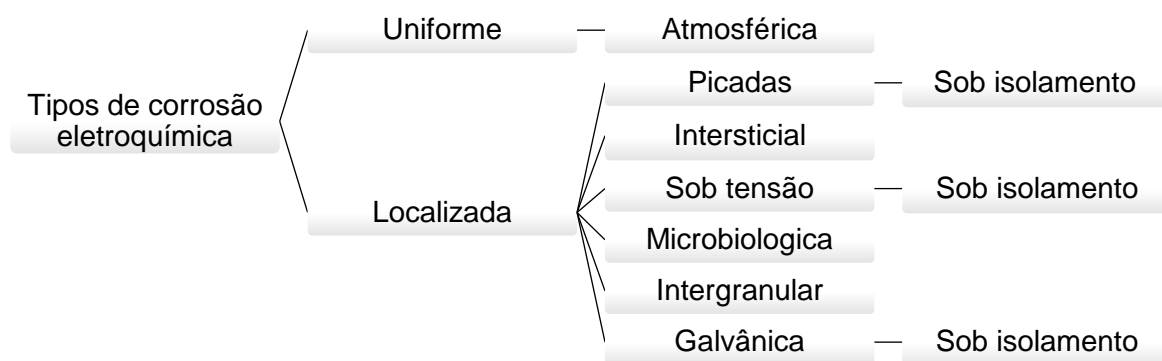


Figura 2.16 – Representação dos tipos de corrosão eletroquímica do material metálico [31].

Dado que no presente trabalho foram identificadas como causa para a falha das tubagens alguns destes tipos de corrosão, optou por se detalhar nas secções seguintes, essas formas de ataque corrosivo.

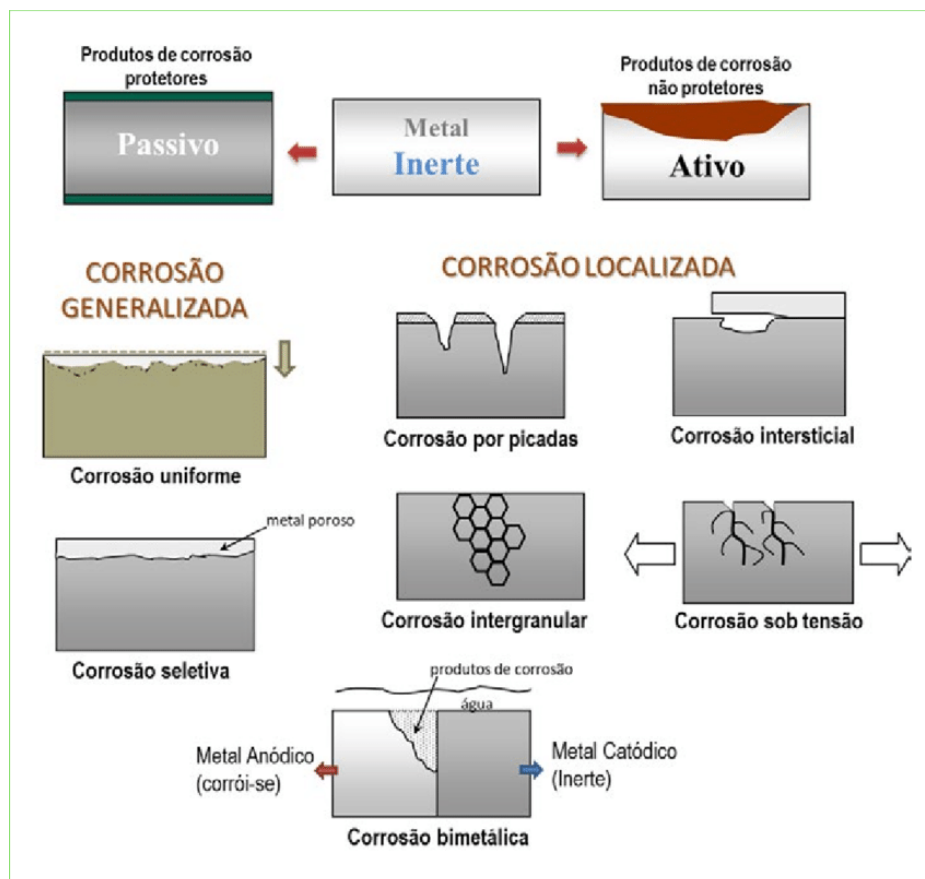


Figura 2.17 – Representação das formas de corrosão do material metálico [31].

2.3.4.1 Corrosão por picadas (*pitting*)

Uma das formas de corrosão mais prejudicial é a corrosão por picadas. Neste caso trata-se de uma corrosão localizada, manifestada pela presença de perfurações de pequeno diâmetro (picadas) na superfície do metal. O raio das picadas tem magnitude igual ou inferior à sua profundidade estas podem ter diversas formas consoante o tipo de material, bem como o ambiente envolvente.

Este tipo de corrosão está associado a uma rotura local do filme passivo que pode ocorrer em zonas de fragilidade como discontinuidades ou defeitos da superfície na presença de ambientes quimicamente degradantes (corrosivo). As zonas de fragilidade dos filme passivos podem resultar por exemplo de danos mecânicos, diferentes fases microestruturais, defeitos como vazios ou inclusões etc.

Ocorre em metais e ligas passivos, em ambientes contendo iões cloretos, brometos, iodetos ou percloratos, quando o potencial de elétrico excede um valor crítico – potencial picada – que depende de várias condições. A reação é geralmente relativamente lenta na fase inicial, mas a taxa de corrosão pode aumentar significativamente à medida que a picada cresce devido a uma variação no potencial eletroquímico entre a superfície da picada e o resto da superfície original e não afetada do metal.

A quantidade de material perdido do metal é relativamente pequena, e claramente muito localizada. A resistência global do componente pode não ser afetada de forma significativa, mas a penetração localizada pode causar a perfuração rápida de tubos e recipientes de paredes finas originando a falha do equipamento, por exemplo, perda de pressão ou de produto [23, 32, 33].

Existem duas teorias que interpretam a ação dos íons cloreto durante o processo de corrosão. Na teoria da adsorção, os íons cloreto são adsorvidos na interface filme de passivação/eletrólito em competição com o oxigênio ou íons hidróxido dissolvidos. Na teoria do filme de óxido, os íons cloreto penetram no filme através de poros ou lacunas presentes no mesmo [30].

2.3.4.2 Corrosão sob isolamento (CUI)

A corrosão sob isolamento ou corrosion under insulation (CUI) define-se como qualquer tipo de corrosão que ocorre na superfície externa de equipamentos isolados, devido à presença de umidade retida entre a superfície e a camada de isolamento. Este tipo de dano retrata um dos problemas com maior relevância nas indústrias pois, apesar de ser um mecanismo de degradação bem investigado e compreendido, continua a representar uma percentagem excessivamente elevada das despesas globais de manutenção das instalações.

O ataque pode ser causado por múltiplos fatores e pode ocorrer em equipamento com isolamento térmico que estejam em serviço, fora de serviço ou em serviço cíclico. Uma vez que estas superfícies não estão geralmente disponíveis/acessíveis para exame visual, o que dificulta frequentemente uma inspeção e monitorização precisas, o início da corrosão não pode ser facilmente identificado. Por exemplo, nos serviços a quente, tubos de aço-carbono e recipientes sob pressão que operam até 175°C podem sofrer CUI, enquanto tubos em aços inoxidáveis austenítico e duplex podem sofrer CUI entre 50° e 175°C. A presença de isolamento térmico e de revestimento retarda a evaporação da água prolongando o período de humedecimento. Desta forma, a corrosão prossegue sem ser detetada e pode resultar em danos catastróficos, como fugas, perda de contenção e até mesmo incêndio e explosão, com consequente perda de integridade do sistema, paragem de uma unidade de processo ou de toda uma instalação. Nalguns casos, pode mesmo comprometer a segurança do processo.

A presença de água e de espécies corrosivas, como os íons de cloreto, são fatores importantes que determinam a probabilidade de ocorrer CUI. Esta também pode resultar da água retida da chuva ou da condensação da humidade atmosférica. A água acaba por atingir a superfície do aço, criando uma célula de corrosão eletroquímica em que a redução do oxigênio é a reação catódica dominante.

O ataque corrosivo propriamente dito pode manifestar-se de várias formas, sendo as mais comuns a galvânica, a ácida ou alcalina e a corrosão por cloretos.

- Corrosão galvânica: resulta geralmente de um isolamento húmido com um eletrólito ou sal presente que permite um fluxo de corrente entre metais diferentes, ou seja, a superfície metálica isolada e o revestimento exterior ou acessórios.
- Corrosão alcalina ou ácida: resulta da presença de um meio alcalino ou ácido e de humidade em determinados isolamentos fibrosos ou granulares.
- Corrosão por cloretos: pode ser promovida pela presença de iões cloreto lixiviados do isolamento ou do ambiente externo. A exposição prolongada a altas temperaturas pode aumentar os teores de cloreto lixiviáveis em certos materiais de isolamento.

A CUI manifesta-se de várias formas. Como corrosão localizada na superfície de aço-carbono em áreas com revestimentos degradados. Nos aços inoxidáveis, particularmente no tipo austenítico, manifesta-se através de fissuras de corrosão sob tensão externa [34,35].

2.3.4.3 Corrosão intersticial

Este tipo de corrosão consiste numa corrosão localizada focada em interstícios onde os espaços são suficientemente grandes para o líquido penetrar na fenda e suficientemente estreitos para que o líquido estagne.

A corrosão intersticial tipicamente ocorre em metais passivos (aços inoxidáveis, alumínio e aços de baixa liga em ambientes alcalinos), quando estes materiais são expostos a espécies agressivas que podem conduzir à rotura camada superficial de óxido [23].

O mecanismo da corrosão intersticial é semelhante ao mecanismo da corrosão por picadas, ou seja, ambas originam cavidades sob a ação de aniões, em particular os cloretos. O interior do interstício torna-se anódico devido à carência em oxigénio que não se pode renovar, enquanto a área exterior mais oxigenada será catódica, e como tal protegida. Deste modo, esta forma de corrosão é tomada como um caso particular da corrosão por picadas, também na presença de iões agressivos, ainda que ocorra para potenciais de corrosão inferiores [32]. O desenvolvimento deste tipo de corrosão ocorre em duas fases. Considerando uma junta de um metal M, exposto a um meio de água neutra contendo oxigénio e iões cloreto Cl⁻, no início o metal corrói-se à mesma velocidade no interior e no exterior do interstício de acordo com as seguintes reações:

- Reação catódica:



- Reação anódica:



Quando o oxigénio for completamente consumido dentro do interstício, deixa de ocorrer a reação de redução do oxigénio, equação (2.6) embora continue a ocorrer a dissolução do metal equação (2.7), produzindo um excesso de carga positiva (M⁺) devido à falta de produção de iões hidroxilo (OH⁻). O equilíbrio de carga é mantido pela migração de iões cloreto (Cl⁻)

para os interstícios, conforme a equação (2.8), criando-se um meio extremamente agressivo dentro do interstício.



Este tipo de corrosão ocorre sob juntas de flange, anilhas e cabeças de parafusos, em arestas revestidas de tinta, em juntas de sobreposição, entre tubos, chapas tubulares em permutadores de calor e em torno do cordão de soldadura nas zonas onde há fusão incompleta. A sua prevenção só é possível através de um projeto cuidadoso que dê particular atenção à geometria do sistema e aos materiais envolvidos [1, 36].

2.3.4.4 Corrosão sob tensão (SCC)

O mecanismo da SCC é influenciado por fatores mecânicos, metalúrgicos e químicos/ambientais. Não existe um mecanismo geral ou único para explicar este fenómeno, pois este resulta da ação combinada de tensões mecânicas presentes no material, de um meio corrosivo específico e da microestrutura do material envolvido, sem estes três fatores, a corrosão sob tensão não pode ocorrer (Figura 2.18). Desta forma, cada caso específico (material e meio) apresenta a sua particularidade [1, 29].



Figura 2.18 – Os três fatores subjacentes à corrosão sob tensão [37].

As fissuras iniciam-se na superfície do material, onde existe algum defeito no revestimento, pintura ou sistema de proteção, em contato com soluções aquosas contendo, principalmente, Cl^- , H^+ , OH^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , CO_2 , H_2S , combinado com a presença de tensões, que podem ser geradas através de cargas externas, forças centrífugas e alterações de temperatura ou por tensões internas induzidas por trabalhos a frio, processos de soldadura ou tratamentos

térmicos [1, 23]. Estas propagam-se na direção perpendicular à direção do esforço, ao longo da microestrutura (Figura 2.19). A evolução da fissura pode ser intragranular (também denominada como transgranular), ou seja, através do grão, e/ou intergranular (ou intercrystalina) difundindo-se ao longo das fronteiras de grão [38].

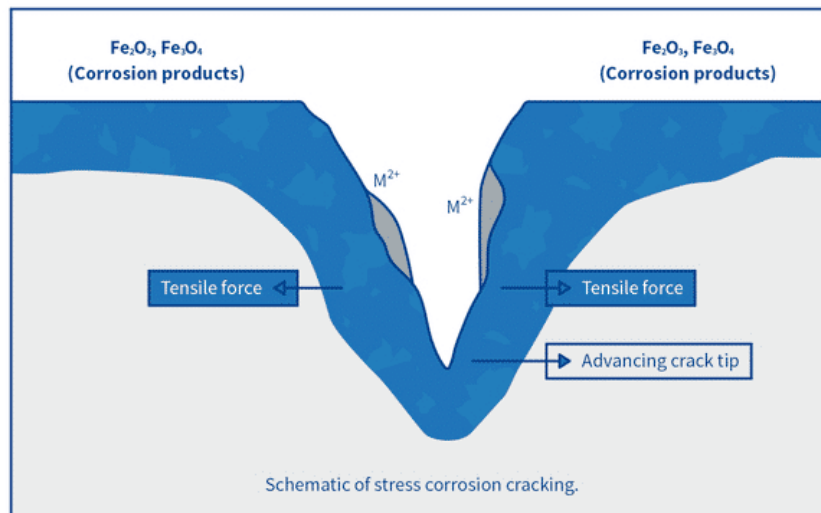


Figura 2.19 – Esquema generalista do processo de SCC [39].

Uma série de modelos de mecanismo de SCC foram propostos pelos especialistas para explicar o fenômeno. Os modelos comumente aceites incluem:

- **Modelo de adsorção:** Uma espécie química específica, presente no meio, é adsorvida na superfície do material na extremidade da fissura, promovendo a redução da resistência das ligações químicas neste local, conseqüentemente, facilitando a propagação da fissura por SCC
- **Modelo de ruptura do filme:** A tensão rompe a película passiva localmente e cria uma célula ativa-passiva. A película passiva recém-formada é novamente rompida sob tensão e o ciclo continua até à falha.
- **Modelo do caminho ativo pré-existente:** A tensão aplicada rompe o filme superficial principalmente nos pontos mais suscetíveis da microestrutura. Nestes locais, o metal desprotegido sofre ataque do meio agressivo, dissolvendo os componentes através dos caminhos ativos pré-existentes, como os limites de grão onde se formam intermetálicos e compostos. Conseqüentemente, a resistência do material diminui, fazendo evoluir rapidamente a propagação da fissura.
- **Modelo de fragilização por hidrogênio:** A fragilização ocorre quando existem átomos de hidrogênio (H) tanto em solução sólida como gerados na superfície devido a processos catódicos pré-existentes. Esses átomos são adsorvidos na interface solução/metal e, devido ao seu volume reduzido, difundem-se facilmente no metal.

Contudo, uma grande parte do hidrogénio tende a combinar-se, formando hidrogénio molecular (H_2), o que aumenta as tensões na estrutura cristalina. Os átomos de hidrogénio tendem a se difundir para locais de maior concentração de tensões, como a extremidade da fissura, fragilizando o metal [38, 39].

2.3.4.5 Corrosão induzida por microrganismos (MIC)

Quando os microrganismos estão envolvidos na corrosão dos metais, a situação torna-se mais complicada do que para um ambiente abiótico, porque os microrganismos não só modificam o ambiente químico próximo da superfície do metal, através do seu metabolismo, mas também podem interferir nos processos eletroquímicos que ocorrem na interface metal/meio [1].

A corrosão induzida por microrganismos, também denominada microbiológica ou MIC (*Microbiological Induced Corrosion*) é uma das formas mais comuns de corrosão em sistemas que contém água, especialmente em sistemas de água de arrefecimento. Ao mesmo tempo, é também um dos mecanismos mais complexos e menos conhecidos. Processa-se, mais frequentemente, sob a influência de bactérias que segregam resíduos, formando ambientes para a corrosão. Diversos fatores, como os níveis de concentração de carbono orgânico e azoto, a velocidade de escoamento, o teor de oxigénio e amoníaco, o tratamento da água aplicado, o pH, a temperatura e outras influências (muitas das quais ainda desconhecidas), contribuem para esse fenómeno [40, 41].

Distinguem-se três processos de MIC, nomeadamente:

➤ Despolarização catódica

As bactérias utilizam o hidrogénio formado nas áreas catódicas durante o seu metabolismo levando a uma despolarização catódica com conseqüente aumento da velocidade do processo catódico e da velocidade de corrosão. A produção de substâncias agressivas por algumas bactérias pode também aumentar a taxa de corrosão ao atacar diretamente o metal.

➤ Ataque por produtos do metabolismo

O metabolismo bacteriano produz substâncias agressivas, por exemplo, sulfuretos, ácido sulfúrico, ácido nítrico ou ácidos orgânicos, que podem atacar o metal e/ou o betão.

➤ Formação de células eletroquímicas

Estas células eletroquímicas formam-se sob os depósitos onde ocorrem diferenças de arejamento, concentração de sais, pH, entre outros fatores. Essa diferenciação resulta em potenciais eletroquímicos distintos, favorecendo a corrosão. Esta é uma das formas mais comuns e difundidas de corrosão microbiológica.

Materiais como o aço-carbono, ferro fundido, cobre e suas ligas, aço inoxidável, níquel e certas ligas de níquel, alumínio e betão podem ser suscetíveis à corrosão induzida por microrganismos (MIC), dependendo das condições específicas do ambiente [41]. Bactérias e bolores também podem decompor materiais poliméricos, utilizando-os como fonte de nutrientes [24].

As bactérias dividem-se em dois grupos, anaeróbias, ativas em ambientes deficientes em oxigénio, onde se incluem as bactérias redutoras de sulfatos (SRB), e aeróbias, que realizam atividades em ambientes ricos em oxigénio, como por exemplo, as bactérias oxidantes de ferro (IOB) [41].

Bactérias redutoras de sulfatos (SRB)

Normalmente, a MIC ocorre na maioria dos ambientes onde se podem formar depósitos. O fundo lamacento de qualquer massa de água relativamente estagnado ou solos encharcados, suportam o crescimento maciço de SRB [41]. Estas representam um grupo de microrganismos capazes de utilizar o sulfato para o processo de respiração anaeróbia. A maioria das SRB apresenta um crescimento ótimo entre os 25 e 40°C a pH 7,2 [42]. Quaisquer instalações metálicas enterradas ou imersas em tais ambientes podem sofrer MIC.

Na Figura 2.20 é apresentado o mecanismo de corrosão anaeróbia por bactérias redutoras de sulfato [41, 43].

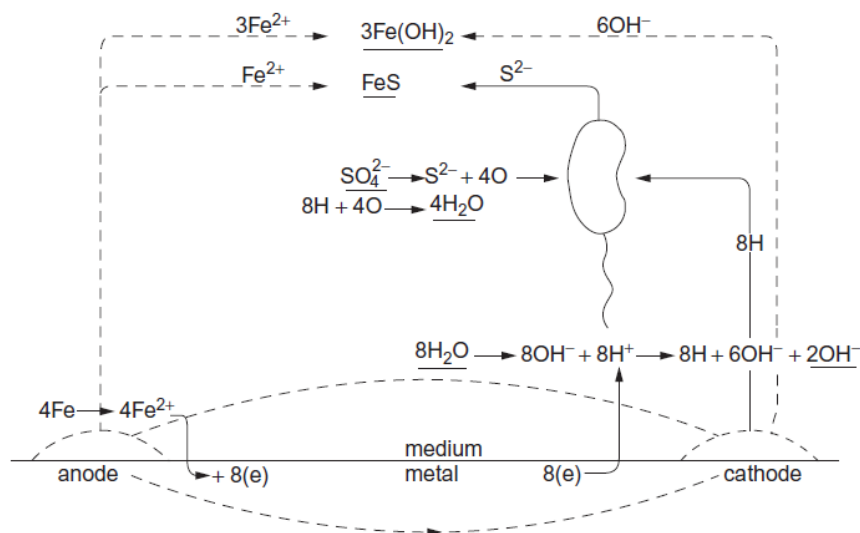


Figura 2.20 - Corrosão anaeróbia por SRB [41, 43].

A corrosão começa com a típica reação redox entre o ferro (Fe) e a água (H_2O). Em seguida, inicia-se a atividade bacteriana com a despolarização catódica, ou seja, a bactéria utiliza o hidrogénio (H) formado no cátodo para reduzir o ião sulfato (SO_4^{2-}). O produto resultante do metabolismo bacteriano, os iões sulfureto (S^{2-}), juntamente com os iões hidróxido (HO^-) e iões

ferro (II) (Fe^{2+}), resultantes da reação redox, formam depósitos de produtos de corrosão, ou seja, o sulfureto de ferro (FeS) e hidróxido de ferro $\text{Fe}(\text{OH})_2$. O FeS formado reage catodicamente com o ferro metálico, ativando assim a célula eletroquímica [41]. Considerando que as SRB são microrganismos aerotolerantes, ou seja, toleram oxigênio atmosférico por tempo limitado, a corrosão ocorre debaixo de tubérculos (camadas de produto de corrosão), sob os quais se podem encontrar picadas profundas [1].

Bactérias oxidantes de Ferro (IOB)

Em tubagens de distribuição de águas, a presença de depósitos espessos sob a forma de tubérculos de óxido de ferro hidratado, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, acompanhado pela presença de flocos, ambos formados devido à presença de IOB, podem obstruir as tubagens bem como criar condições para corrosão por arejamento diferencial ou intersticial [1, 41].

As IOB utilizam a energia libertada pela oxidação do Fe^{2+} em Fe^{3+} , o que lhes permite crescer autotroficamente, ou seja, sintetizam sua própria matéria orgânica a partir de água e nutrientes inorgânicos.

Em materiais como o aço inoxidável, a corrosão inicia-se preferencialmente na raiz dos cordões de soldadura circunferenciais da tubagem, isto é, aparece nas soldaduras de montagem, mas não nas soldaduras longitudinais de fabrico, bem como nas zonas termicamente afetadas (HAZ) mais próximas das respetivas soldaduras. Este fenómeno é constatado através da presença de nódulos de coloração castanha que se espalham, frequentemente, perpendicularmente ao cordão de soldadura na direção do fluxo de água. Outra evidência do resultado deste mecanismo de corrosão, é morfologia particular da picada formada. Na superfície do material atacado esta apresenta uma dimensão muito reduzida, não sendo facilmente visível. No entanto, a picada propaga-se para o interior, em forma de túnel onde é característica a presença de uma cavidade acentuadamente maior. Muitas vezes, o túnel formado abaixo da superfície pode levar a fugas na HAZ e, consoante as condições, a taxa de penetração é de 0,5 a 1,5 mm/mês. A MIC dos cordões de soldadura em aço inoxidável ocorre em particular na água estagnada que permanece no equipamento de aço inoxidável após o teste de pressão, mas também no caso de água de arrefecimento contendo ferro, ou água potável. No entanto os problemas de biocorrosão ocorrem mais frequentemente em sistemas novos quando estes entram em contacto com a água pela primeira vez. Se ocorrer um problema num sistema em serviço, este resulta normalmente de alterações no sistema, como a utilização de uma nova fonte de água de qualidade, novos materiais de construção utilizados durante reparações, novos procedimentos de funcionamento (por exemplo permitir que a água permaneça durante uma paragem, quando anteriormente era drenada) ou novas condições de funcionamento, especialmente a temperatura.

Um possível mecanismo do ataque por IOB poderá ser o seguinte:

- Colonização de IOB e de manganês no cordão de soldadura, formando-se assim uma célula de concentração de oxigênio.
- Dissolução do ferro sob o depósito.
- Atração de cloretos do meio aquoso.
- Oxidação pelas bactérias do ferro (bivalente) em ferro (trivalente) e formação de uma solução de cloreto fortemente agressiva e ácida, que promove a formação de picadas.

Para além destas formas de corrosão direta dos metais, devem ser mencionados outros efeitos que promovem a corrosão em geral como resultado do crescimento bacteriano, nomeadamente o consumo de inibidores de corrosão pelo metabolismo bacteriano, ou seja, a decomposição dos inibidores de corrosão (nitritos, amins) por oxidação; a degradação dos revestimentos pela sua utilização como nutriente ou pelos produtos do metabolismo formados. Tal como outras produtoras de exopolissacarídeos, fungo e algas bem como biofilmes [40, 41].

2.3.5 Prevenção da corrosão

Um dos principais motivos para realizar uma investigação de falha é identificar os mecanismos e causas de um problema, a fim de evitar que este ocorra novamente. No entanto, é crucial reconhecer a corrosão como um fator de falha desde cedo, pois informações importantes podem ser perdidas, além de ocorrerem alterações ou contaminações antes que observações, testes e análises adequados sejam realizados. [24].

Embora sejam identificadas as causas da falha de corrosão, mitigar ou diminuir o problema nem sempre é um processo simples, rápido e económico. Por esta razão, é essencial ter em consideração a questão da corrosão, bem como exercício de boas práticas de engenharia durante a fase de projeto e ao longo de todo o ciclo de vida do equipamento [35].

A prevenção da corrosão passa por diversas fases:

- Seleção de materiais, tendo em conta a combinação material/meio.
- Projeto, evitar heterogeneidades, pares galvânicos, zonas de acumulação de líquidos, tensões mecânicas elevadas, entre outros.
- Definir programas de inspeção e manutenção periódica, incluindo a limpeza regular dos sistemas.
- Modificação do meio corrosivo como a temperatura, o pH, a concentração de oxigênio, uso de inibidores de corrosão ou dosagem controlada de biocidas (MIC).
- Modificação do potencial do sistema através da proteção catódica ou anódica.
- Proteção por revestimentos orgânicos como as tintas e vernizes, ou por revestimentos inorgânicos metálicos ou não metálicos [40, 41].

- Inspeção baseada no risco (RBI) de modo otimizar os programas de inspeção e monitorização, as mudanças dos materiais de construção e controlo dos principais parâmetros do processo [44].

Numa perspetiva geral, a respeito dos sistemas AVAC e AQS, existem várias medidas que se podem considerar para melhorar a eficiência destes sistemas, nomeadamente:

- Manutenções regulares, como já referido, assegurando que sistema é inspecionado e mantido regularmente por um profissional. Isto inclui limpeza de filtros, verificação de existência de fugas, lubrificação de peças móveis e ajuste dos controles.
- Atualização de equipamentos, ou seja, considerar substituir equipamentos antigos por modelos mais eficientes energeticamente.
- Utilizar termostatos programáveis que permitem o ajuste da temperatura de acordo com as rotinas diárias, evitando o uso desnecessário do sistema.
- Melhorar o isolamento de forma a garantir que as zonas a climatizar estão devidamente isoladas para evitar perdas de calor ou arrefecimento excessivo. Desta forma é reduzida a carga no sistema, melhorando a eficiência geral do mesmo [9].

No que se refere à eventual presença de bactérias que se reproduzem em ambientes aquáticos não marinhos naturais, como aparelhos de ar condicionado, torres de refrigeração e redes prediais de água quente e água fria, é recomendado:

- Manter a temperatura da água, no circuito de água quente e no ponto mais afastado do circuito ou na tubagem de retorno ao acumulador, acima dos 50°C.
- Os depósitos e termoacumuladores devem manter a temperatura da água próxima dos 60°C.
- No caso de instalações sensíveis recomenda-se a realização de inspeções específicas regulares para deteção de bactérias [14].

2.4 Análise Físico-química da água - Índice de saturação de Langelier (LSI)

A água é um fator essencial para diversas empresas, sendo utilizada para fins de processamento, refrigeração, alimentação de caldeiras e propósitos sanitários. Indústrias específicas requerem água de alta qualidade, não incrustantes e corrosivas. A ocorrência destes fenómenos é um desafio constante e grave para a manutenção [45]. De forma a estabilizar a água de diferentes qualidades e controlar a corrosão interna e a deposição de incrustações foi criado o Índice de Saturação *Langelier* (LSI). A fórmula para o cálculo deste índice envolve parâmetros físico-químicos, tais como o pH, alcalinidade, concentração de cálcio e carbonato de cálcio, sólidos dissolvidos totais e temperatura da água [43].

Este índice é calculado através da equação (2.9) [44, 45], tendo em conta a diferença entre o pH real, da água a analisar, e o pH de saturação com carbonato de cálcio (pH_s), determinado pela equação (2.10) [45].

$$LSI = pH - pH_s \quad (2.9)$$

$$pH_s = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad (2.10)$$

onde os parâmetros A, B, C, e D, são calculados a partir dos valores de concentração e temperaturas (°C) (parâmetros da água) obtidos, de acordo com as equações (2.11), (2.12), (2.13) e (2.14), respetivamente.

$$A = (\text{Log}_{10}[\text{TDS}] - 1)/10 \quad (2.11)$$

$$B = 13,12 \times \text{Log}_{10}(^{\circ}\text{C} + 273) + 34,55 \quad (2.12)$$

$$C = \text{Log}_{10}[\text{Ca}_2 + \text{CaCO}_3] - 0,4 \quad (2.13)$$

$$D = \text{Log}_{10}[\text{alcalinidade CaCO}_3] \quad (2.14)$$

O resultado do índice obtido indica a tendência do carbonato de cálcio para se depositar ou dissolver:

- **LSI < 0** - A água está sub-saturada em relação ao carbonato de cálcio. A água sub-saturada tende a remover as camadas protetoras de carbonato de cálcio existentes em tubagem e equipamentos.
- **LSI = 0** - A água é considerada neutra ou equilibrada. Nem forma nem remove incrustações.
- **LSI > 0** - A água está sobressaturada em relação ao carbonato de cálcio (CaCO₃) e pode ocorrer a formação de sais incrustantes [44, 46].

CAPÍTULO 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O presente relatório de estágio apresenta a análise das causas de falha verificadas nas tubagens do circuito de água quente de um sistema AVAC e de um sistema AQS, em que ambos apresentavam várias fugas. Para tal, técnicos do LABMAT deslocaram-se ao local para reconhecimentos dos circuitos afetados e recolha de amostras de água e de troços de tubagem representativos do problema em análise.

As amostras recolhidas foram referenciadas conforme representado Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Referência e descrição das amostras recolhidas para análise.

	Referência da amostra	Descrição da amostra
Tubagem de água quente	A	Troço de tubagem em aço carbono constituído por 2 tubos unidos por um acessório, circuito AVAC
	B	Troço de tubagem em aço inoxidável, circuito AQS retorno ($T_{\text{água}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C} / 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$).
	C	Troço de tubagem em aço inoxidável, circuito AQS retorno ($T_{\text{água}} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C} / 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$).
Água	Tanque 1	Água recolhida no tanque 1 da instalação ($T = \text{ambiente}$)
	Ida	Água recolhida no início do circuito do sistema AVAC ($T = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$)
	Retorno	Água recolhida no fim do circuito do sistema AVAC ($T = 58 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Identificaram-se visualmente os pormenores relevantes da superfície externa e interna das amostras A, B e C para a análise, antes e após remoção dos depósitos, efetuando o respetivo registo fotográfico. Para a análise da superfície interna procedeu-se ao corte longitudinal de 2 amostras representativas (Amostras A e B). Após uma primeira análise, com a presença dos produtos depositados, efetuou-se a remoção mecânica dos mesmos.

Tendo-se constatado a presença de fissuras na amostra B, realizou-se um ensaio de líquidos penetrantes de modo a verificar se as mesmas eram trespessantes. Foi aplicado líquido penetrante colorido na superfície externa da amostra. Após 15 min realizou-se a limpeza com solvente e aplicou-se o revelador em ambas as superfícies, externa e interna, conforme exemplificado na Figura 3.1.

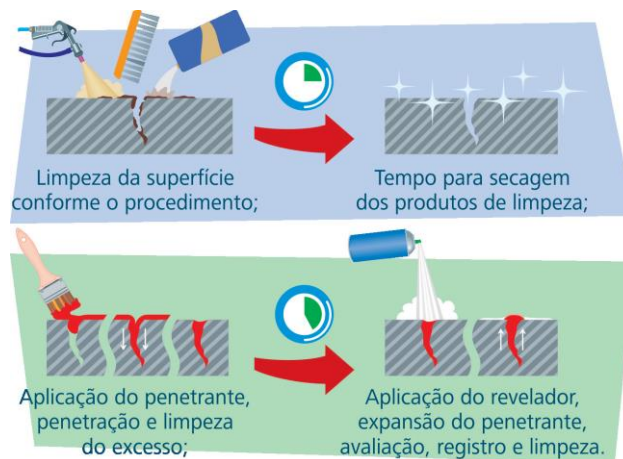


Figura 3.1 - Fotografia ilustrativa das etapas do processo de aplicação do líquido penetrante [47]

Para localização e identificação de eventuais picadas e/ou de outros fenómenos relevantes, solicitou-se o ensaio radiográfico ao Laboratório de Ensaios Não Destrutivos (LABEND) do ISQ. O ensaio foi realizado por técnicos certificados, contudo, a interpretação dos dados foi realizada pelo LABMAT. O controlo radiográfico das amostras A e B foi realizado longitudinalmente e transversalmente na amostra C.

Tendo como base a análise radiográfica, foram preparadas secções transversais e longitudinais dos tubos. Estas foram realizadas, segundo as normas ASTM 262 (1993) e ASTM E 3, em zonas identificadas com presença de picadas, fissuração e/ou defeitos de descontinuidade. As amostras foram embutidas a quente em baquelite no equipamento *Struers LaboPress-3*. Em seguida foram submetidas a polimento mecânico numa lixadeira rotativa *AROTEC APL-4*, com lixas de carboneto de silício (SiC) *politriz AROTEC APL – 4*, de granulometria entre 80 a 1000 *mesh*

Após a limpeza com acetona realizou-se o polimento final utilizando pasta de diamante de 6 μm e 1 μm da *Struers*, respetivamente. Aplicou-se o contrastante Nital 2% (98 ml álcool etílico com 2 ml de ácido nítrico) na amostra A, adequado para aço carbono. A amostra B, em aço inoxidável, foi contrastada através de ataque eletroquímico. Para tal a amostra foi ligada ao ânodo de uma fonte de corrente, tendo sido aplicada uma densidade de corrente de 1 A/cm² num eletrólito de ácido oxálico 10%. Para caracterizar o fenómeno corrosivo, realizou-se a análise macrográfica utilizando uma lupa com ampliação x50. Realizou-se, também, a análise micrográfica no microscópio ótico *Axiotech*, com ampliações compreendidas entre x50 e x200. Efetuou-se ainda a análise por Microscopia Eletrónica de Varrimento, usando o equipamento JEOL JSM-6500F acoplado a um sistema de microanálise por Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raio-X (EDS) (SP15710 da *Oxford Instruments*).

Foi determinada através de Espectroscopia de Emissão Ótica (OES) a composição química do material de dois troços de tubo recebidos, nomeadamente da amostra A e a amostra C.

Para tal utilizou-se o espectrómetro de emissão ótica de bancada, da marca *Hilger Analytical* e modelo Polyvac 2000 series. Os produtos depositados nas superfícies externas das amostras A e C, bem como os produtos encontrados na superfície interna da amostra A, foram recolhidos e analisados.

A análise química semi-quantitativa destes depósitos foi realizada por SEM com suporte de EDS. A análise estrutural dos compostos cristalinos foi realizada através da Difração de Raios-X (XRD), com um difratómetro de Raios-X *Rigaku Miniflex* a operar em modo contínuo com uma velocidade de varrimento de 0,5 graus/min numa gama entre 15,0 e 90,0 graus. A identificação de picos foi realizada com recurso a comparação com a base de dados PDF-4 Minerals 2016. Determinaram-se também os parâmetros físico-químicos e microbiológicos das amostras de água recolhidas no tanque, no início, e no fim do circuito de água quente, de forma a identificar agentes que possam estar relacionados com o problema ocorrido.

As amostras de água recolhidas foram entregues no Laboratório de Química (LABQUI) do ISQ, de forma a serem determinados os seus parâmetros físico-químicos, tais como:

- | | | |
|---------------------------------------|----------------|-----------------------|
| ➤ Condutividade; | ➤ Cálcio; | ➤ Nitratos |
| ➤ pH; | ➤ Ferro total; | ➤ Fosfatos; |
| ➤ Sólidos Dissolvidos
Totais (SDT) | ➤ Sódio; | ➤ CBO5; |
| ➤ Sólidos Suspensos
Totais (SST) | ➤ Potássio; | ➤ CQO; |
| ➤ Dureza total | ➤ Cloretos | ➤ COT; |
| | ➤ Sulfatos; | ➤ Alcalinidade; |
| | ➤ Sulfuretos; | ➤ Oxigénio dissolvido |

Após a determinação dos parâmetros da água foi calculado o índice de saturação de *Langelier Saturation Index* (LSI), para avaliar se água, recolhida ao longo do circuito, é tendencialmente corrosiva, equilibrada ou incrustante.

Para analisar a presença de microrganismos nas amostras de água recolhida, foram antecipadamente, produzidos meios de cultura específicos para bactérias aeróbia, bactérias anaeróbias (meios sólidos), bactérias oxidantes de ferro e bactérias redutoras de sulfato (meios líquidos). Todos os meios de cultura preparados foram esterilizados a 121° C durante 20 minutos numa autoclave de marca *Uniclave 88-AJC*. Para preparação do branco (controlo negativo) foi utilizada água destilada igualmente esterilizada. Após a esterilização e arrefecimento até à temperatura ambiente, os meios de cultura preparados foram conservados no frigorífico à temperatura de aproximadamente 4 °C.

Uma vez recolhidas as amostras de água, procedeu-se imediatamente à inoculação dos meios de cultura. Este processo foi realizado numa câmara de fluxo laminar de *Telstar PV-100*, na presença de uma chama (bico de *Büsen*) de forma a manter a área de trabalho

esterilizada. Esterilizou-se uma pequena quantidade da amostra água recolhida, na autoclave, que foi utilizada para realizar as diluições bem como as amostras em branco.

No caso dos meios de cultura sólidos, prepararam-se amostras com concentrações 1:1, 1:10 e 1:100 ml, enquanto os meios líquidos foram inoculados com concentrações de 10 e 50%.

Todos os meios preparados, foram acomodados numa estufa à temperatura de 37 ± 2 °C.

Após uma semana analisaram-se os resultados obtidos. Repetiu-se a análise semanalmente durante 3 semanas. No caso dos meios sólidos procedeu-se à contagem das colónias para todas as diluições, através das unidades formadoras de colónia (UFC). Relativamente dos meios líquidos realizou-se apenas uma análise qualitativa através do aspeto visual.

As SRB são identificadas pela alteração de turbidez do meio inoculados e a existência das IOB, através do desenvolvimento de uma coloração alaranjada.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 Inspeção no local

Nesta secção são apresentadas as evidências recolhidas na visita à instalação hoteleira pelos técnicos do ISQ. O objetivo desta visita foi o reconhecimento dos circuitos afetados do sistema AQS em ambos os edifícios da unidade hoteleira. Foram detetados os seguintes problemas:

- Presença de corrosão das tubagens em aço inoxidável sob a forma de depósitos castanhos-alaranjados (Figuras 4.1 e 4.2). A degradação é mais evidente próximo das ligações (flanges, uniões roscadas).



Figura 4.1 - Evidência de oxidação das tubagens em aço inoxidável com resíduos do isolante polimérico fortemente aderente ao tubo: a) Geral; b) Pormenor da zona com ligações flangeadas e presença de óxidos na superfície do tubo.

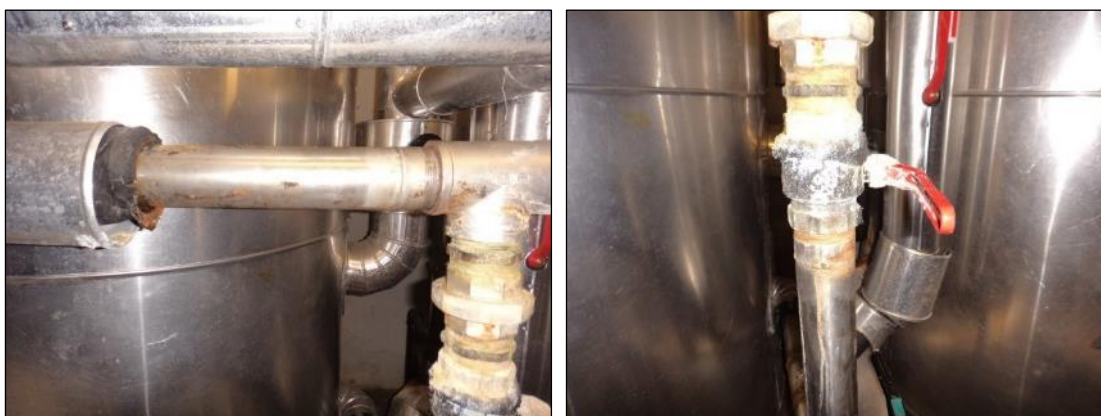


Figura 4.2 - Evidências de fuga junto a ligações roscadas. Presença de depósitos esbranquiçados para além dos depósitos castanho-alaranjados típicos de corrosão de materiais ferrosos.

- Em diversos locais da instalação, foram também observadas evidências de fugas que resultaram na presença de escorrimentos e de produtos de corrosão. Este fenômeno ocorreu sobretudo em zonas próximas de acessórios de ligação tal como pode ser observado nas Figura 4.3, 4.4 e 4.5.



Figura 4.3 - Presença de escorrimentos e depósitos esbranquiçados sobre os revestimentos isolantes de alumínio.



Figura 4.4 - Vista geral de uma zona do circuito de AQS onde se podem observar locais com evidências de escorrimento esverdeado, comum em produtos de corrosão com cobre, próximo de acessórios de ligação



Figura 4.5 - Zona com união roscada onde se observam evidências de escoamento de produtos esverdeados típicos indicativos da presença de cobre.

- Finalmente é também de notar a presença de zonas do circuito com reparações por soldadura, em que troços das tubagens foram substituídos devido ao avançado nível de degradação (Figura 4.6).



Figura 4.6 - Zonas do circuito com reparação por soldadura.

4.2 Análise visual

A análise visual foi realizada na superfície externa e interna das amostras A, B e C, antes e após remoção dos depósitos, sendo que para a análise da superfície interna se procedeu ao corte longitudinal de 2 amostras representativas (Amostras A e B).

4.2.1 Análise visual das superfícies externas

A análise visual das amostras tal como recebidas revelou os seguintes aspetos:

Amostra A (aço-carbono, AVAC):

- De um dos lados do acessório de ligação, o tubo apresenta-se fortemente degradado, com acumulação de depósitos castanho-alaranjado e esbranquiçados. São ainda visíveis resíduos de revestimento isolante térmico elastomérico. O acessório de ligação também se apresenta degradado. O tubo do outro lado do acessório não apresenta degradação significativa (Figura 4.7).



Figura 4.7 – Amostra A onde se observa que um dos troços se encontra fortemente degradado;

Amostra B (aço inoxidável, AQS):

- Observam-se vestígios do material isolante elastomérico fortemente aderentes ao tubo (Figura 4.8a));
- A presença de resíduos brancos depositados na superfície do troço de tubo (Figura 4.8b)).
- Observa-se coloração térmica junto da soldadura circunferencial indicando ausência de passivação da soldadura (Figura 4.8c)).
- As raízes das soldaduras apresentam-se muito irregulares sugerindo ter havido deficiências nas proteções das mesmas (purga) durante a execução (Figura 4.8d) e e)).



Figura 4.8 – Amostra B onde se observam: a) resíduos do isolamento térmico; b) zona com coloração térmica junto da soldadura; c) e d) detalhe da amostra B revelando defeitos na soldadura circunferencial.

Amostra C (aço inoxidável, AQS):

- Presença de depósitos de cor esbranquiçada acumulados na zona da soldadura (Figura 4.9a)).
- Empolamentos e destacamento do revestimento/tinta (Figura 4.9b)).
- A junta soldada (soldadura circunferencial) apresenta um desnível na zona de união dos 2 troços (Figura 4.9)).

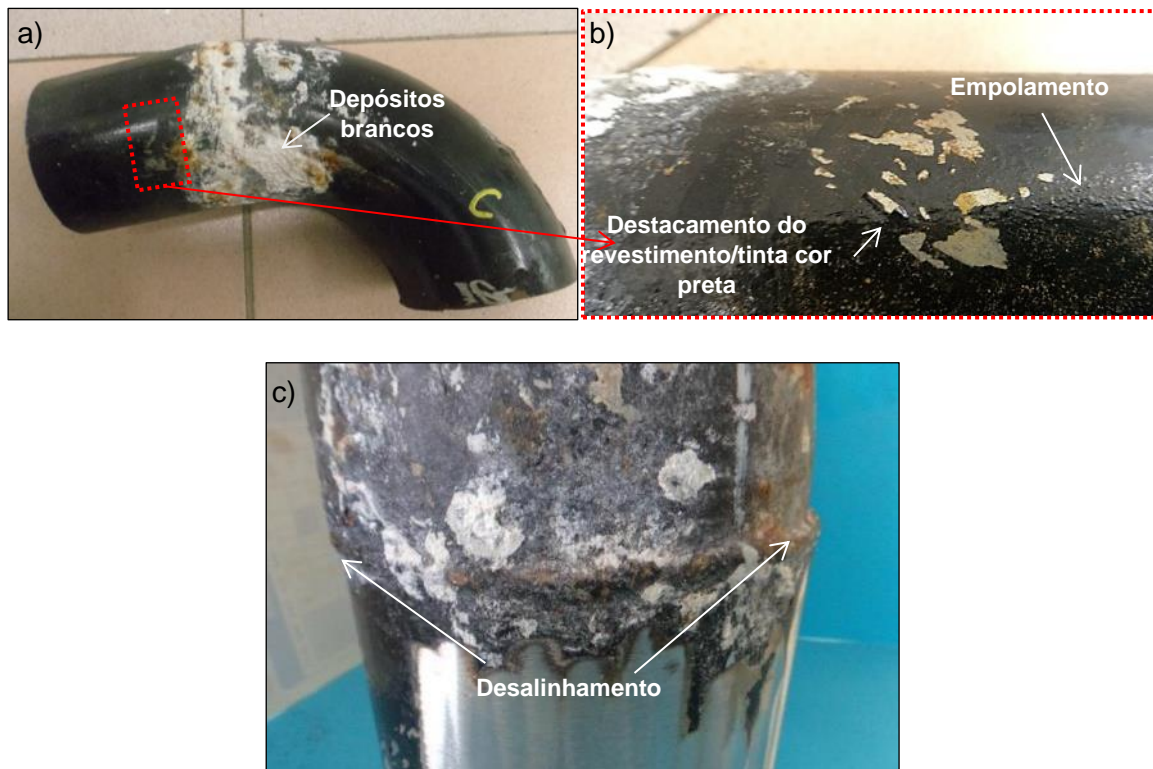


Figura 4.9 – Amostra C a) com presença de depósitos esbranquiçados; b) detalhe evidenciando empolamentos e destacamento do revestimento/tinta; c) onde se verifica um desalinhamento na junta soldada.

4.2.2 Análise visual das superfícies internas

De forma a analisar com detalhe o fenómeno de corrosão nas superfícies internas dos troços de tubo, procedeu-se ao corte longitudinal de 2 amostras representativas, A e B (Figura 4.10 e Figura 4.11). No caso da amostra A, a análise visual da superfície interna revela a presença de depósitos castanhos-alaranjados, na forma de tubérculos, distribuídos por toda a superfície interna deste troço de tubagem (Figura 4.10a) e b)).

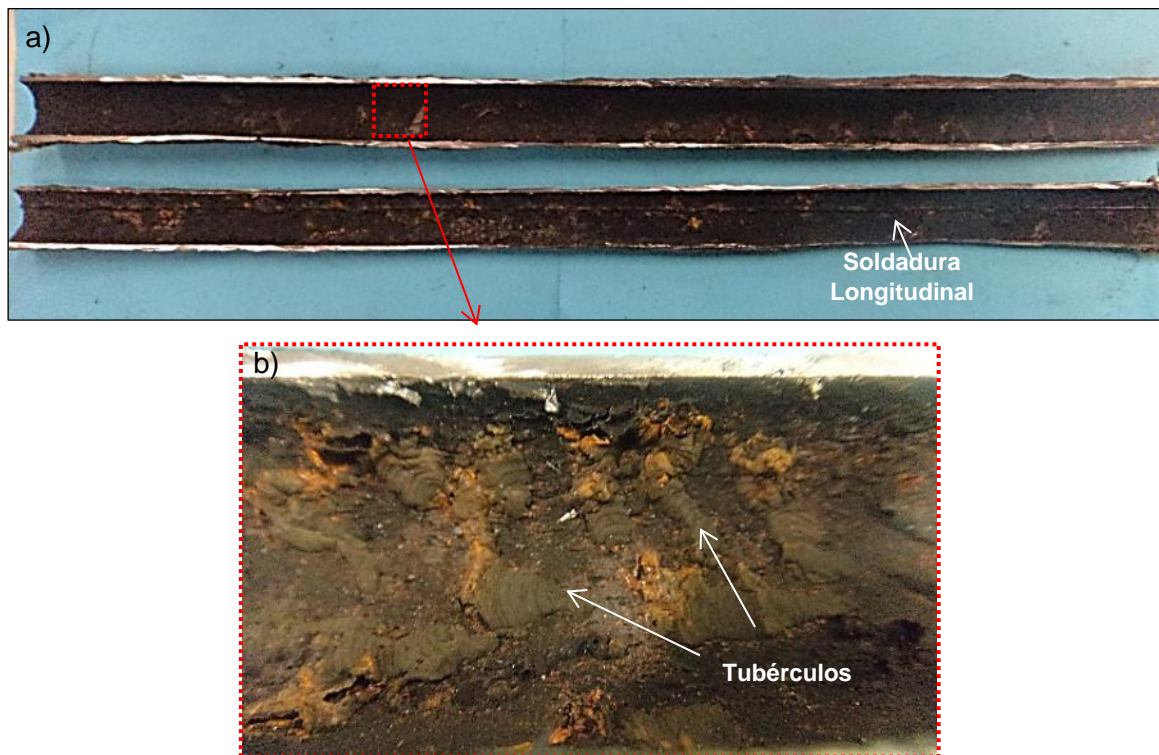


Figura 4.10 - Superfícies internas da amostra A seccionada longitudinalmente: a) presença de depósitos de coloração castanho-alaranjada; b) detalhe de uma zona da meia cana com evidências de formação de depósitos em forma de tubérculo;

No caso da amostra B observou-se a presença de depósitos de coloração castanho-clara em toda a superfície analisada, havendo, contudo, uma maior acumulação sobre a raiz dos cordões das soldaduras circunferenciais (Figura 4.11a e b)).

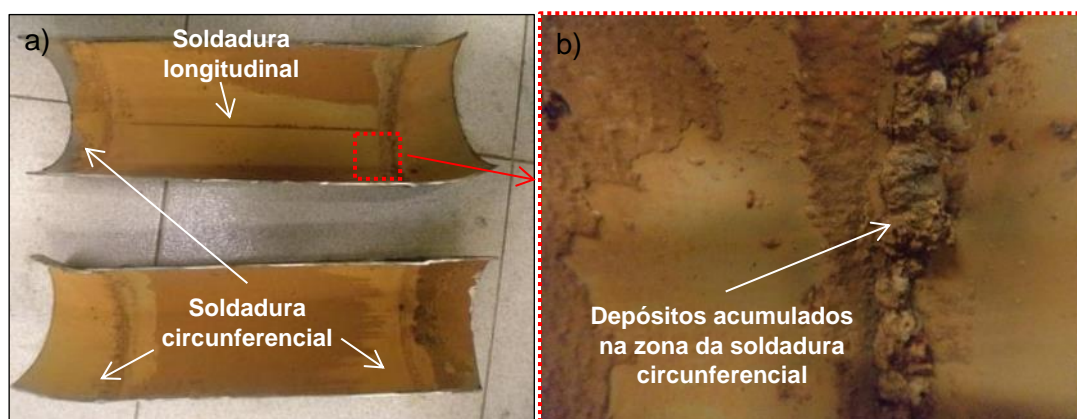


Figura 4.11 - Vista geral das superfícies internas da amostra B; a) presença de depósitos de coloração castanho-clara depositados em toda a superfície; b) detalhe de uma zona da meia cana evidenciando acumulação de depósitos sobre os cordões de soldadura.

4.2.3 Análise visual após remoção de depósitos

As amostras A e B foram decapadas - remoção mecânica dos depósitos e eventuais revestimento - para análise do estado efetivo de degradação do material. Foram observados os seguintes aspetos:

Amostra A (aço-carbono, AVAC):

- Presença de diversas picadas trespassantes com variadas dimensões, dispersas em toda a superfície do troço de tubo fortemente degradado (Figura 4.12a)). Em acordo com a observação pré-decapagem, o segmento tubo do outro lado do acessório de ligação não apresentava qualquer tipo de degradação (Figura 4.12b));
- O acessório de ligação apresentava degradação acentuada também em apenas um dos lados, observando-se roturas, com perfurações de diâmetro considerável, e picadas trespassantes (Figura 4.12c), d) e e)).



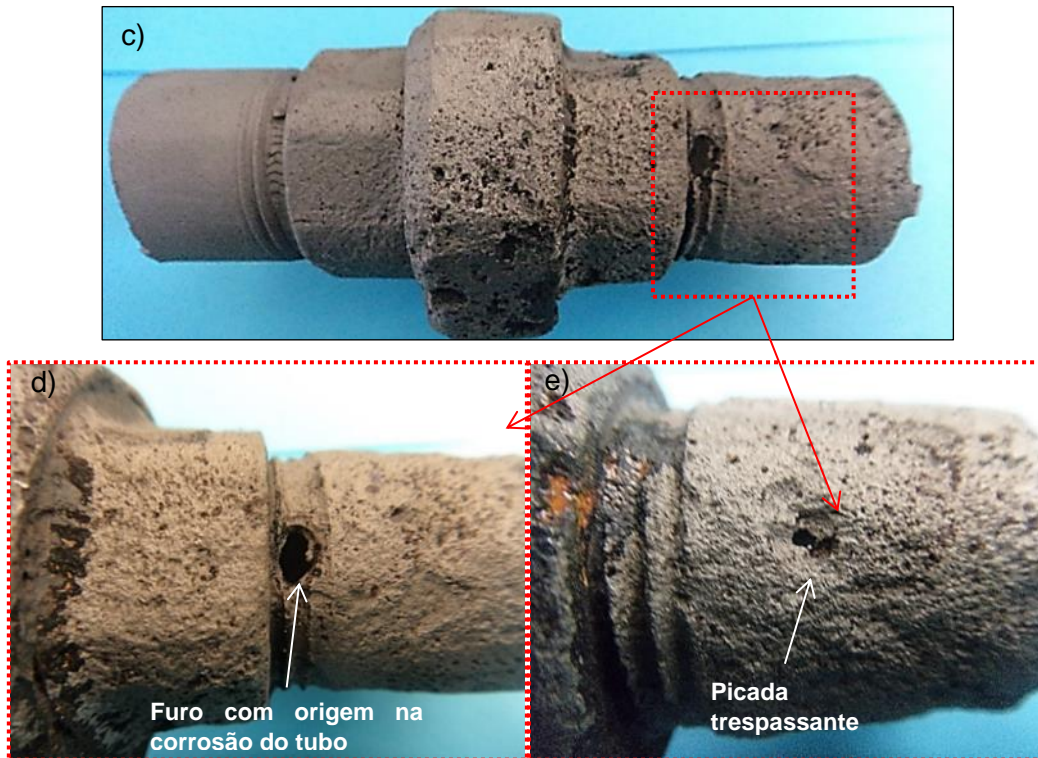


Figura 4.12 – Amostra A, após remoção de depósitos: a) presença de picadas trespassantes no troço que apresentava maior acumulação de depósitos; b) Troço de tubo que não apresentava degradação significativa; c) acessório de união localizado entre os 2 troços de tubo; d) detalhe do acessório de união onde se evidencia a furação na zona roscada do tubo; e) detalhe mostrando a presença de uma picada trespassante junto do acessório de união na geratriz oposta representada à na Figura 4.12c).

Amostra B (aço inoxidável, AQS):

- Verificou-se a presença de fissuração na superfície externa (Figura 4.13).
- De modo a verificar se as fissuras observadas na amostra B eram trespassantes, realizou-se o ensaio de líquidos penetrantes numa das meias canas. Constatou-se que estas eram trespassantes na zona da soldadura circunferencial (Figura 4.14).

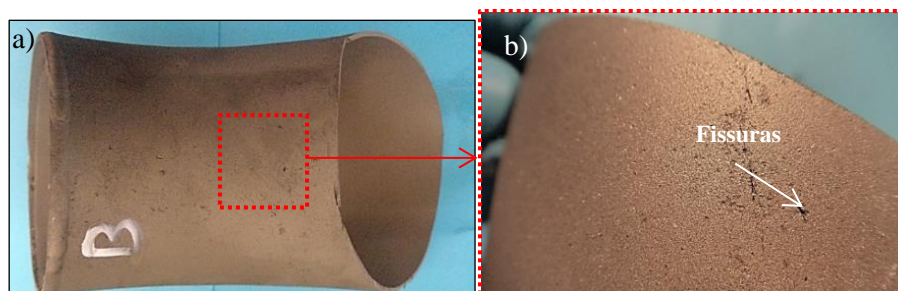


Figura 4.13 – Amostra B após remoção de depósito: a) vista geral; b) detalhe evidenciando a presença de fissura.

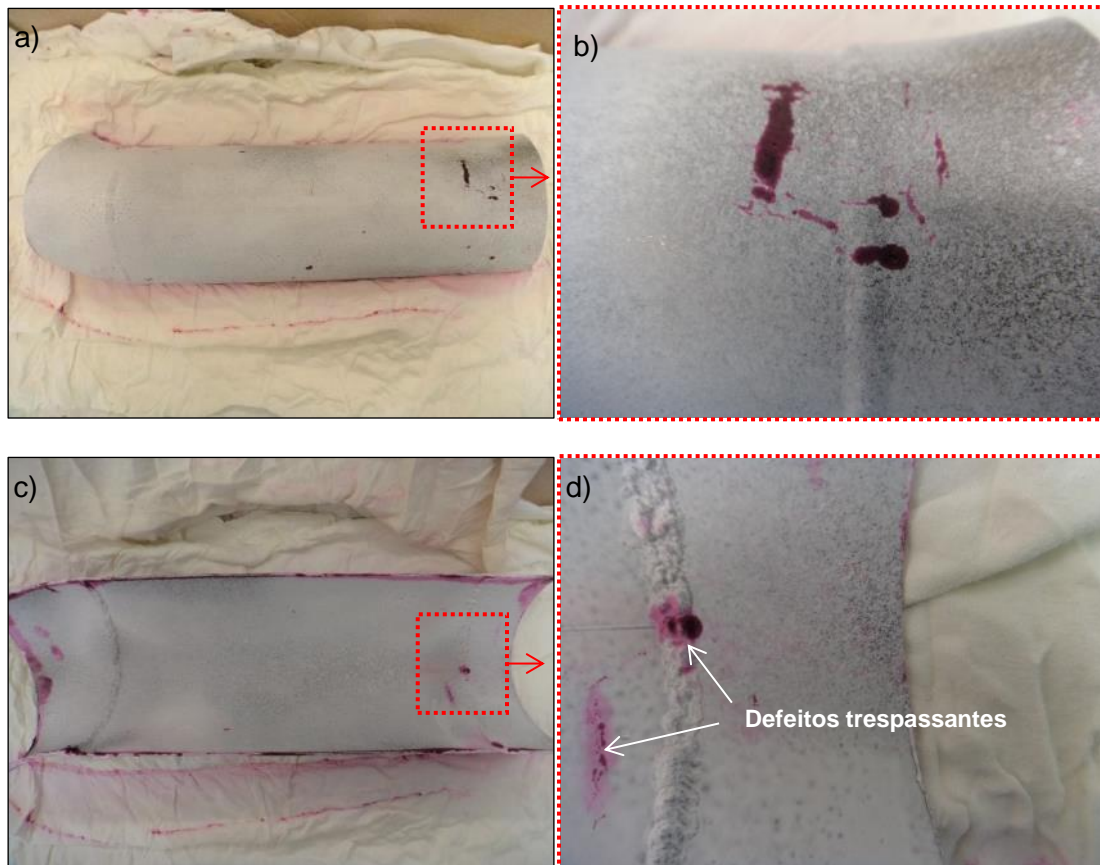


Figura 4.14 – Amostra B após a realização do ensaio de líquidos penetrantes: a) vista geral da superfície externa onde foi aplicado o líquido penetrante seguido do relevador; b) detalhe da superfície externa com evidências da presença de fissuras; c) vista geral da superfície interna onde foi aplicado apenas o relevador; d) presença de líquido penetrante na raiz da soldadura, e nas proximidades desta, indicando a presença de defeitos trespassante.

4.3 Controlo radiográfico

De forma a identificar e localizar eventuais defeitos, efetuou-se o controlo radiográfico dos troços de tubo das amostras A e B. A análise das radiografias realizadas revelou os seguintes aspetos:

Amostra A: presença de picadas distribuídas aleatoriamente e de dimensões variadas; camada estratificada de depósitos (Figura 4.15);

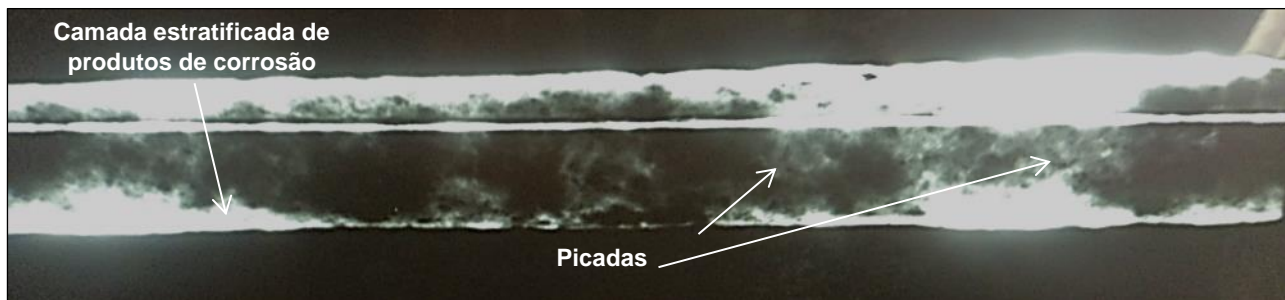


Figura 4.15 - Radiografia realizadas na amostra A, onde se verificou a presença de picadas e camada estratificada de produtos de corrosão.

Amostra B: presença de fissuras dispersas e ramificadas em toda a superfície incluindo na soldadura circunferencial (Figura 4.16a) e b)). As radiografias revelaram ainda defeitos na soldadura circunferencial nomeadamente, fusão incompleta (Figura 4.17a)). Foi observado, também, desalinhamento da junta soldada (Figura 4.17b)).

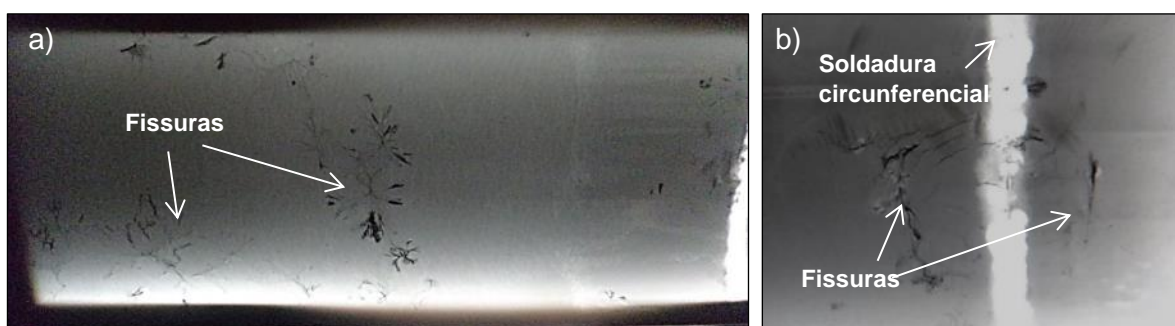


Figura 4.16 - Radiografias realizada na amostra B, longitudinalmente: a) presença de fissuras dispersas e ramificadas em toda a superfície; b) fissuração no cordão de soldadura circunferencial e próximo do mesmo.

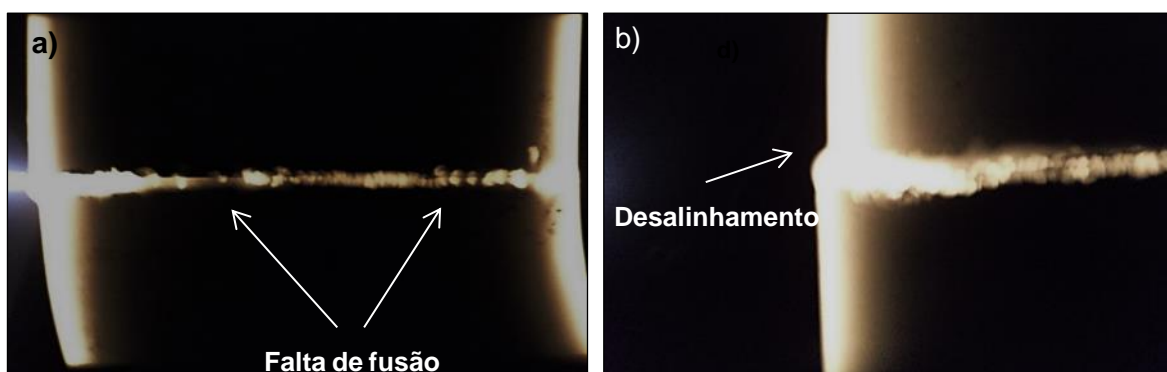


Figura 4.17 - Radiografia realizada na amostra B, transversalmente: a) descontinuidade do cordão de soldadura circunferencial, b) desalinhamento da junta.

4.4 Análise metalográfica

Tendo em conta os resultados das análises e ensaios anteriores, foram preparadas metalograficamente secções transversais e longitudinais das amostras A e B em zonas onde se identificaram picadas, fissuração e /ou defeitos de continuidade.

A análise metalográfica através de microscopia ótica e lupa estereoscópica permitiu constatar:

Amostra A (aço-carbono, AVAC):

- Após preparação adequada observou-se a evolução de uma picada de corrosão, na superfície externa, até se tornar trespassante. Verificou-se igualmente a presença de múltiplas picadas (Figura 4.18);
- Degradação por corrosão dos filetes de rosca na zona de ligação do acessório (Figura 4.19);
- A microestrutura do material base é constituída por ferrite e perlite, consentânea com um material do tipo aço carbono de baixo teor em carbono (Figura 4.20).

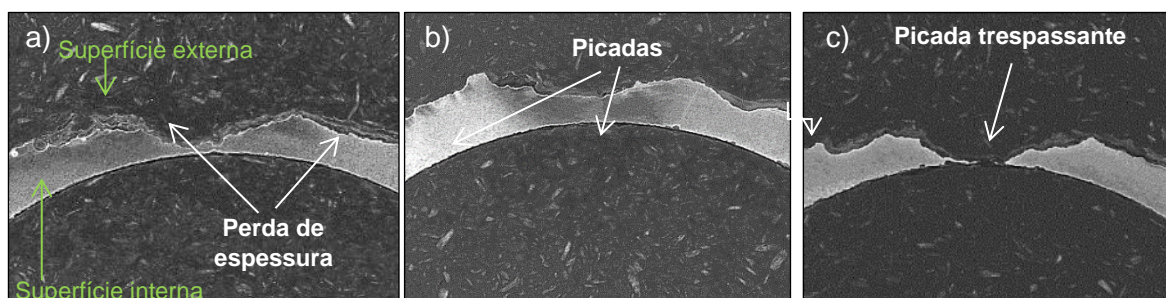


Figura 4.18 – Fotomicrografias ilustrativas de uma secção transversal evidenciando corrosão localizada na superfície externa da amostra A. Após preparação da amostra observou-se na figura a evolução da picada até se tornar trespassante (fotos sequenciais de a) a c)). (Ampliação original: aproximadamente 25X.)

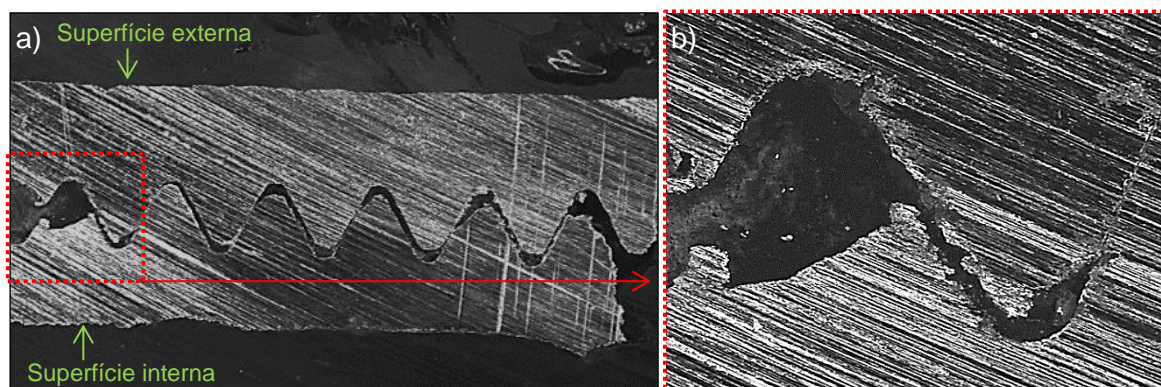


Figura 4.19 - Fotomicrografia ilustrativa duma secção longitudinal na zona de ligação de acessórios na amostra A; a) vista geral. (Ampliação original: aproximadamente 4,8X); b) detalhe da Figura 20a) evidenciando a degradação do material. (Ampliação original: aproximadamente 200X).

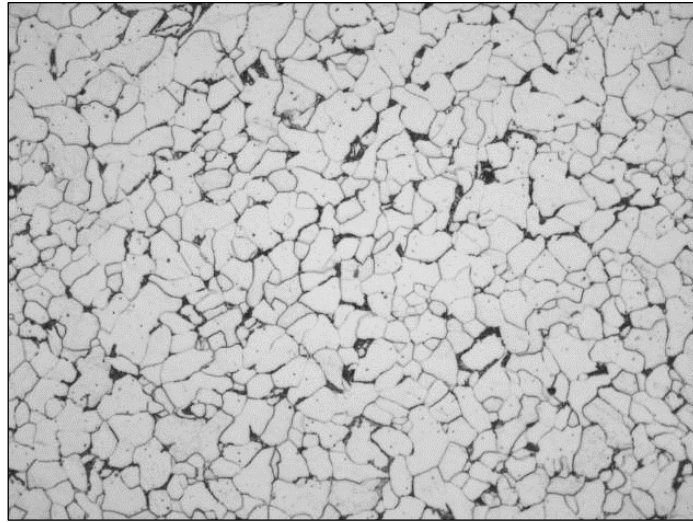


Figura 4.20 - Fotomicrografia ilustrativa da microestrutura constituinte do material base da amostra A. (*Ampliação original: aproximadamente 200X*).

Amostra B (aço inoxidável, AQS):

- Presença de fissuras trespessantes com origem na superfície externa (Figura 4.21).
- Picadas localizadas na raiz do cordão de soldadura (Figura 4.22a)) e fissuração na zona do material fundido e ZTA (Figura 4.22b)).
- Picada com formato arredondado com origem em picada mais estreita localizada na raiz da soldadura circunferencial (Figura 4.23a)).
- A fissuração observada a partir da superfície externa é ramificada com propagação transgranular e intragranular com uma morfologia comum em fenômenos de corrosão sob tensão (Figura 4.23b) e c)).
- A microestrutura do material base da amostra B é constituída por grãos austeníticos, consentânea com um material do tipo aço inoxidável austenítico (Figura 4.24).

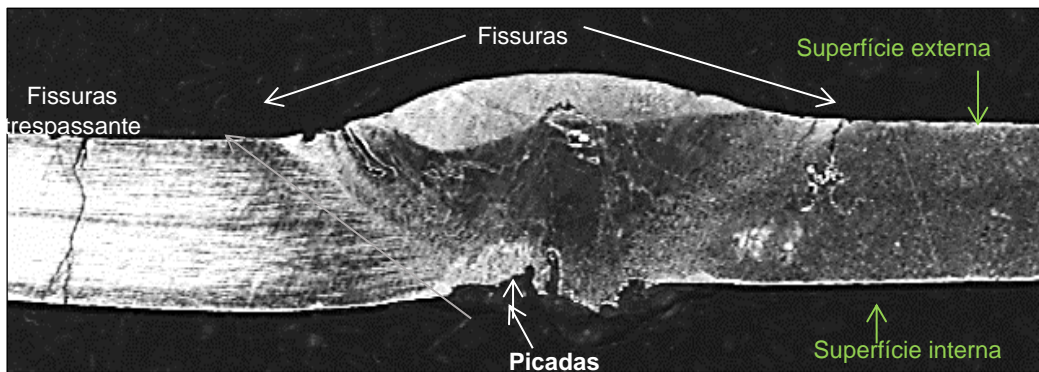


Figura 4.21 – Fotomacrografia ilustrativa duma secção longitudinal na zona da soldadura circular da amostra B com presença de fissuras e picadas na superfície externa e na zona da raiz da soldadura.

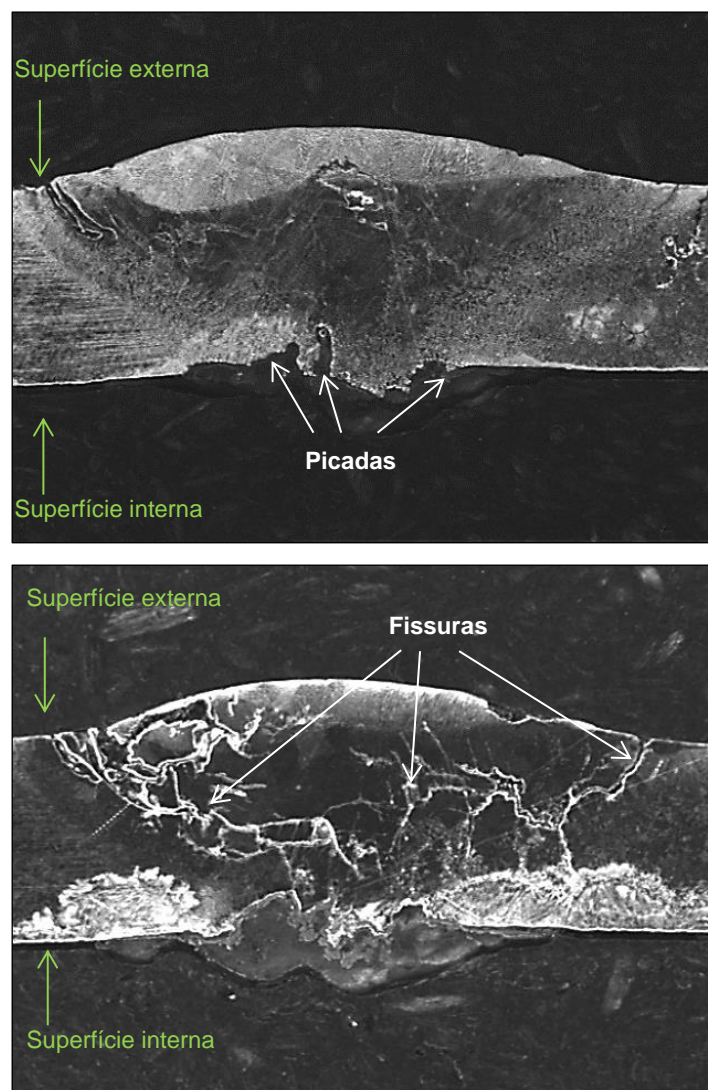
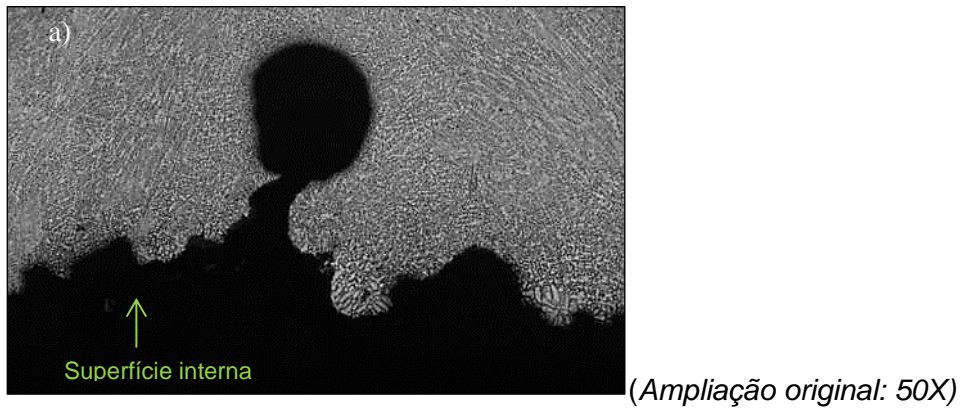
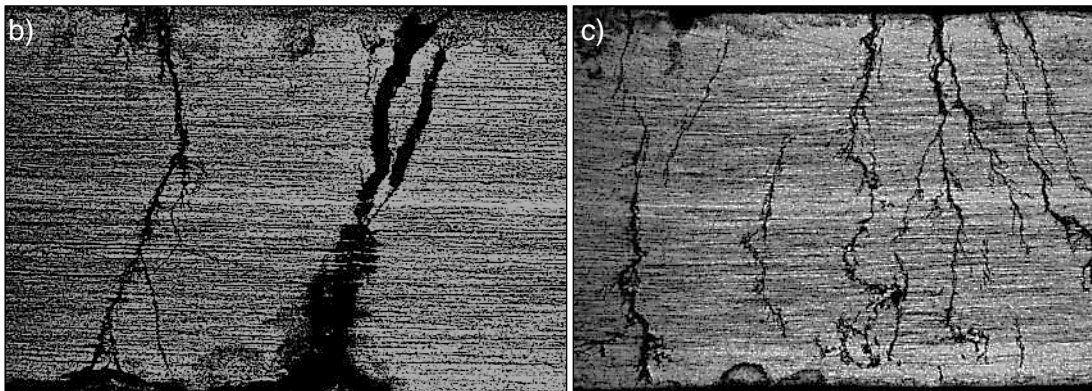


Figura 4.22 – Fotomacrografia ilustrativa de duas secções longitudinais na zona da soldadura circular da amostra B: a) presença de picadas da raiz da soldadura; b) fissuração ramificada no material fundido. (*Ampliação no original aproximadamente 12X.*)



Superfície externa



Superfície interna

Figura 4.23 – Fotomicrografia ilustrativa da amostra B: a) picada na raiz da soldadura circunferencial. b) fissuração ramificada e trespessante maioritariamente com propagação transgranular c) fissuração ramificada essencialmente com origem na superfície externa. (Ampliação original: 50X)



Figura 4.24 – Fotomicrografia ilustrativa da microestrutura constituinte do material base da amostra B (Ampliação no original 500X)

4.5 Análise química

A composição química do material dos dois troços de tubagem recebidos, nomeadamente da amostra A e da amostra C, foi determinada através de Espectroscopia de Emissão Ótica. A amostra A revelou uma composição típica de um aço carbono e a amostra C revelou a composição aproximada de aço inoxidável do tipo AISI 316L. Os resultados encontram-se no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Composição química das amostras A e C.

Referência/ Reference	Elementos (%) / Elements (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	V	Nb
Amostra A	0,07	< 0,04	0,70	<0,009	<0,023	< 0,02	< 0,02	---	0,04	0,02	---	---
Amostra C	0,026	0,43	1,14	0,031	0,007	16,95	10,05	2,01	---	0,53	0,058	0,010

4.6 Caracterização dos depósitos

Os depósitos encontrados nas superfícies externas das amostras A, castanho-alaranjado, e da amostra C, esbranquiçados, foram recolhidos e analisados. Foram ainda caracterizados os depósitos em forma de tubérculos encontrados na superfície interna da amostra A.

A amostra B e superfície interna da amostra C não reuniam quantidade suficiente de resíduos, não se tendo considerado a sua análise essencial para as conclusões finais.

A análise química semi-quantitativa destes depósitos foi realizada por EDS e a análise estrutural dos compostos cristalinos foi realizada através de DRX.

4.6.1 Depósitos externos

Como pode ser observado na

Figura 4.25, a análise EDS aos depósitos castanho-alaranjado encontrados no exterior da tubagem revelaram a presença de quantidades significativas de ferro (Fe), oxigénio (O), bem como percentagens inferiores de outros elementos como o cloro (Cl), cálcio (Ca), sódio (Na) e magnésio (Mg). Dos ensaios de difração por raios-X foi possível identificar a existência de óxidos de ferro na forma de *magnetite* - Fe_3O_4 (Figura 4.26). Assim estes resultados permitem identificar a presença de óxido de ferro, como resultado da corrosão do aço. A presença dos outros elementos em menor teor têm origem na água utilizada no processo (ver composição na secção 4.8).

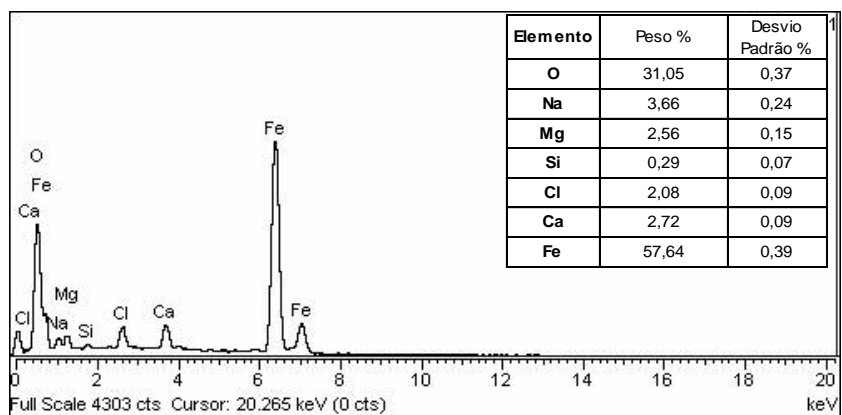


Figura 4.25 - Espectro de EDS e respetiva composição semi-quantitativa dos resíduos externos, castanho-alaranjado, da amostra A.

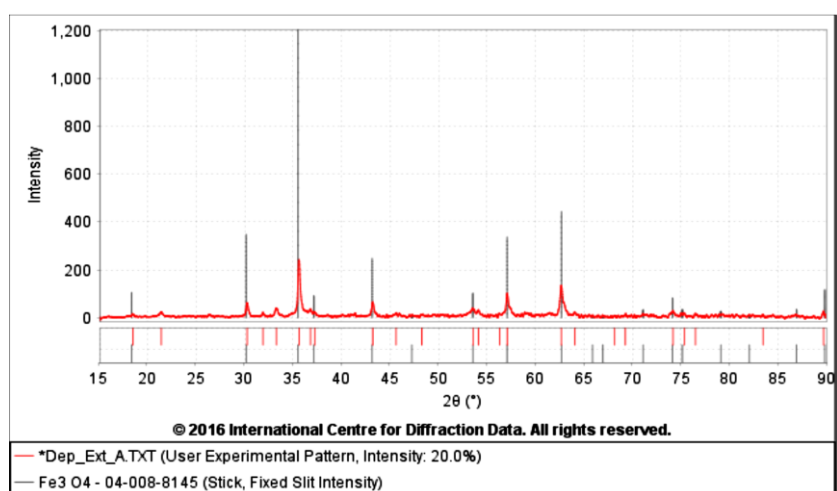


Figura 4.26 – Difractograma de raios-X obtido para os depósitos externos da amostra A (vermelho) e sobreposição com o padrão de difração correspondente ao óxido de ferro na forma de *magnetite* (Fe_3O_4) (cinzento).

No caso da amostra C, onde foram observados depósitos de cor esbranquiçada que se acumulavam na zona da soldadura, a análise de EDS revelou principalmente a presença de cálcio (Ca), oxigénio (O), além de outros elementos secundárias (C) cloro (Cl), sódio (Na) magnésio (Mg), silício (Si), ferro (Fe) e enxofre. Por DRX foi identificada a fase *Aragonite* do carbonato de cálcio, $CaCO_3$ (Figura 4.28). Assim, desta análise pode concluir-se que estes depósitos são muito provavelmente sais resultantes da evaporação da água, não estando diretamente relacionados com o processo corrosivo.

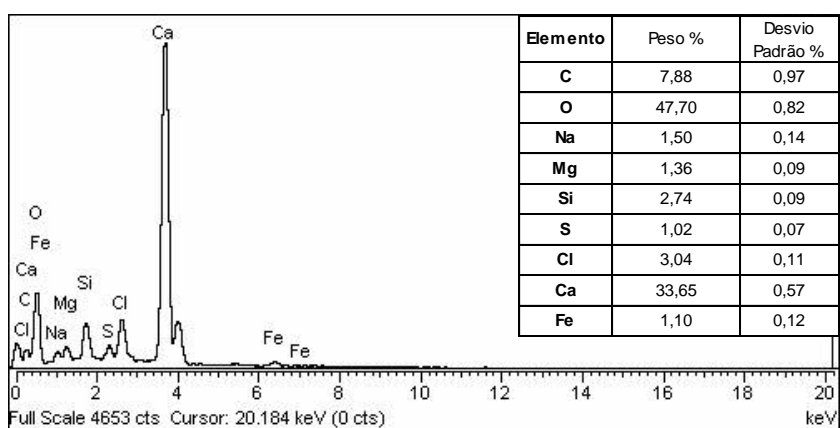


Figura 4.27 – Espectro de EDS e respetiva composição semi-quantitativa dos resíduos externos, esbranquiçados, encontrados na amostra C.

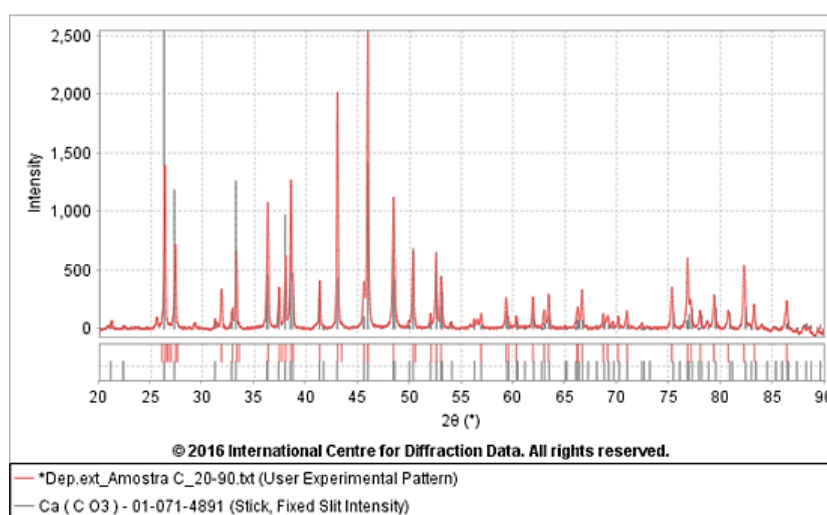


Figura 4.28 – Difractograma de raios-X obtido para os depósitos externos de coloração branca da amostra C (vermelho) e sobreposição com o padrão de difração correspondente ao carbonato de cálcio (CaCO₃) na forma de aragonite (cinzento).

4.6.2 Depósitos internos

No caso dos depósitos internos – tubérculos encontrados na amostra A – a análise EDS indicou que estas são constituídos essencialmente por ferro (Fe) e oxigénio (O) para além de vestígios de Si, Cl e Ca, elementos presentes na composição da água (Figura 4.29). Por DRX foi identificada a presença de óxidos de ferro na forma de Fe_3O_4 *Magnetite* (Figura 4.30), produtos de corrosão comuns do aço. Os tubérculos encontrados na superfície interna da tubagem de aço-carbono estão, portanto, associados à degradação do material devido à corrosão, uma vez que a presença de óxidos de ferro, como a magnetite (Fe_3O_4), é indicativa de um processo corrosivo em andamento

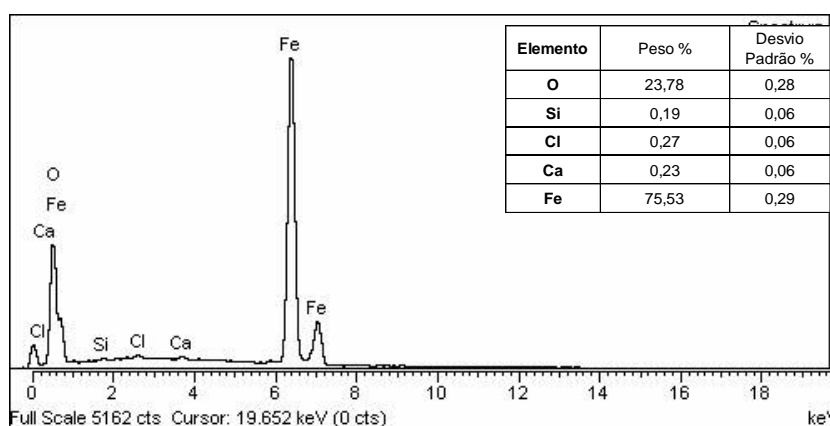


Figura 4.29 – Espectro EDS e respetiva composição semi-quantitativa da amostra de resíduos internos, em forma de tubérculos, da amostra A.

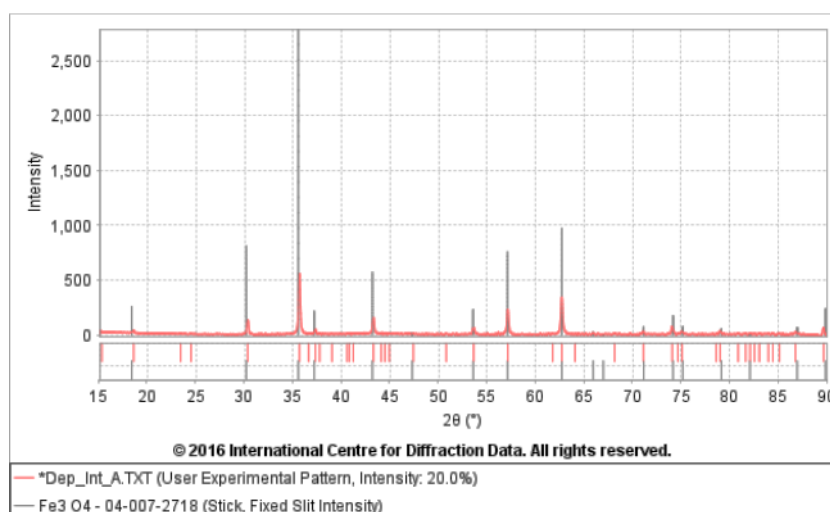


Figura 4.30 - Difractograma de raios-X obtido para os depósitos internos da amostra A (vermelho) e sobreposição com o padrão de difração correspondente ao óxido de ferro na forma de *magnetite* (Fe_3O_4) (cinzento).

4.7 Análise por microscopia eletrônica de varrimento (SEM) assistida por espectroscopia de dispersão de energia (EDS).

As amostras preparadas metalograficamente foram analisadas no SEM com análise por EDS. Foram feitas as seguintes observações:

Amostra A (aço-carbono, AVAC):

- Detetou-se a existência de cloro (Cl) entre os filetes de rosca do acessório de união na amostra A (Figura 4.31);
- Confirmou-se a presença residual de cloro (Cl) nos produtos depositados na superfície externa do tubo, para além de ferro e oxigênio resultantes da oxidação/corrosão do material. (Figura 4.32).

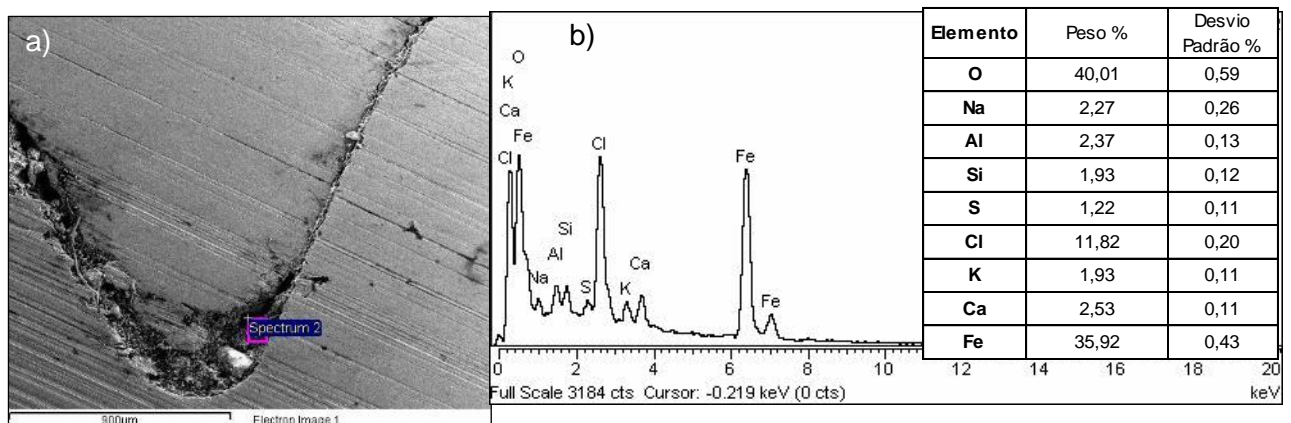


Figura 4.31 – Fotomicrografia obtida por SEM do filete de rosca no acessório de união da amostra A: a) zona analisada; b) espectro de EDS respetivo.

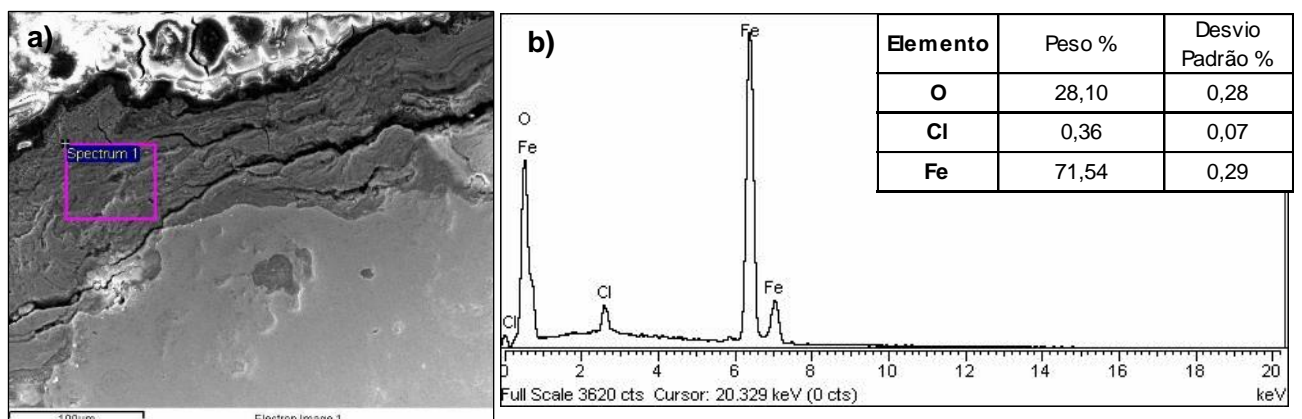


Figura 4.32 – Fotomicrografia obtida por SEM nos depósitos presentes na superfície externa do tubo da amostra A: a) zona analisada; b) espectro de EDS respetivo.

Amostra B (aço inoxidável, AQS):

- No interior de uma fissura, com origem na superfície interna, e localizada no material fundido da soldadura circunferencial, verificou-se a presença de oxigênio, crómio e níquel muito provavelmente sob a forma de óxidos destes elementos, bem como a presença de cloro (Figura 4.33):
- No material fundido observou-se fissuração essencialmente interdendrítica. (Figura 4.34);
- Observa-se uma picada sub-superficial, larga e profunda, a partir de uma picada estreita com origem na superfície interna na zona do material fundido da soldadura. A picada é profunda possivelmente propagando-se em forma de túnel (Figura 4.35 e 4.36). Esta é uma morfologia típica de corrosão por microrganismos.

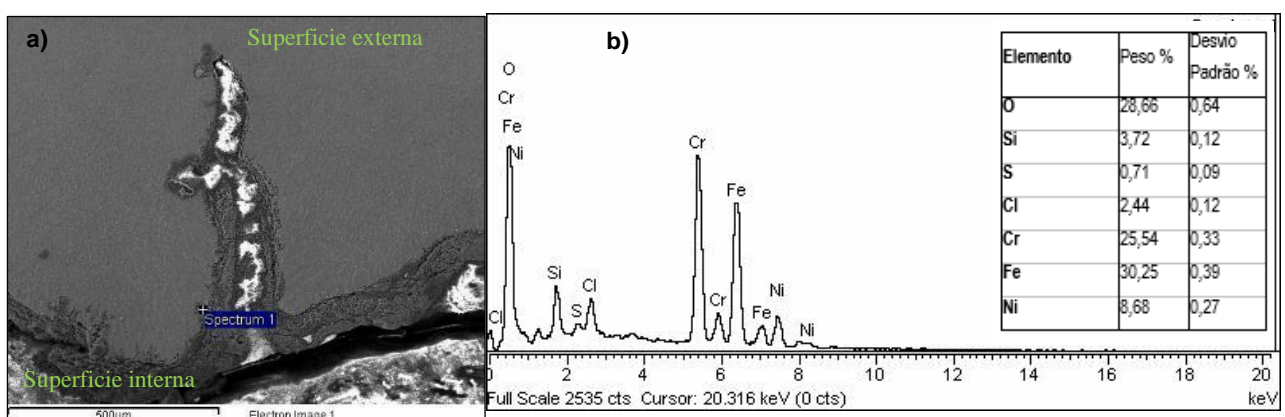


Figura 4.33 – a) Fotomicrografia obtida por SEM de uma zona com fissuração a partir da superfície interna; b) espectro de EDS realizado no interior da fissura (amostra B).

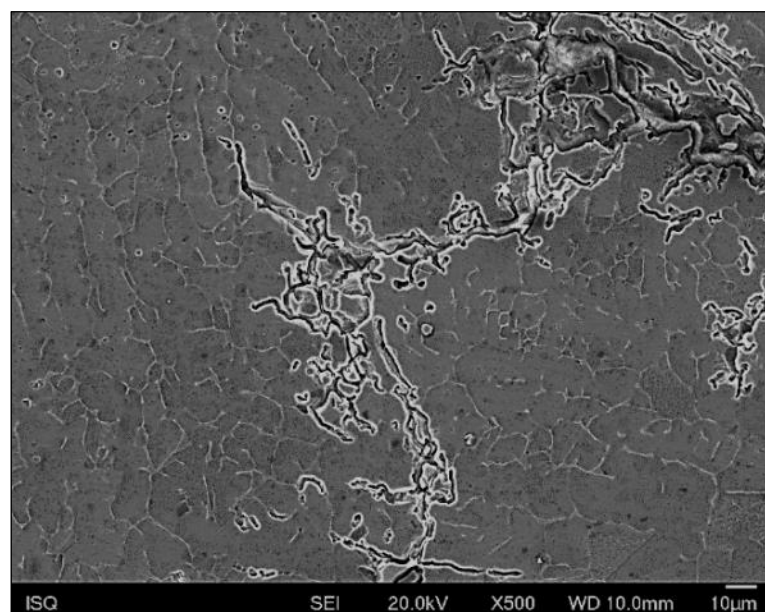


Figura 4.34 – Fotomicrografia obtida por SEM onde se observa a presença de fissuras no material fundido com propagação essencialmente interdendrítica. (Amostra B).

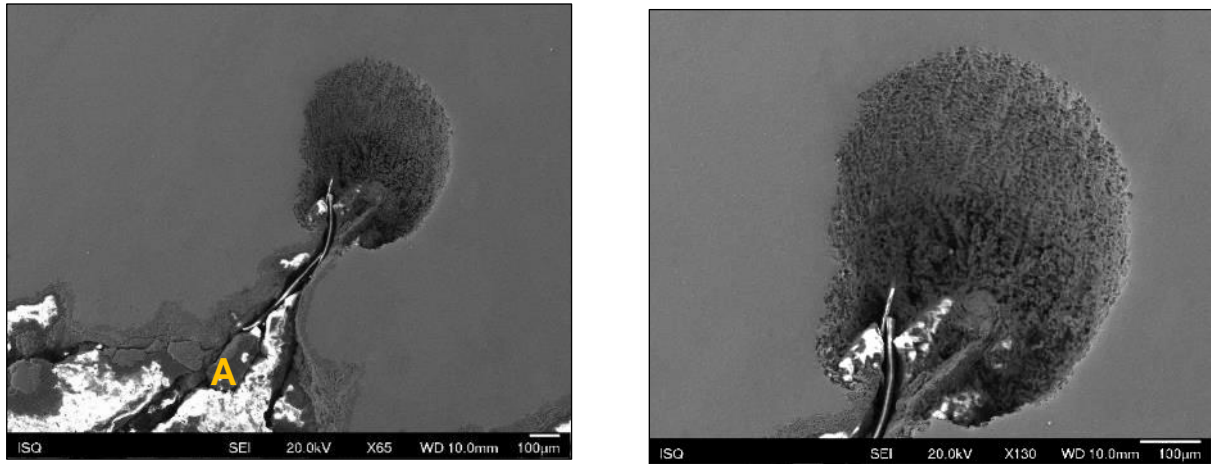


Figura 4.35 - Fotomicrografia obtida por SEM de uma fissura que termina em picada arredondada e com propagação para o interior em forma de túnel (Amostra B).

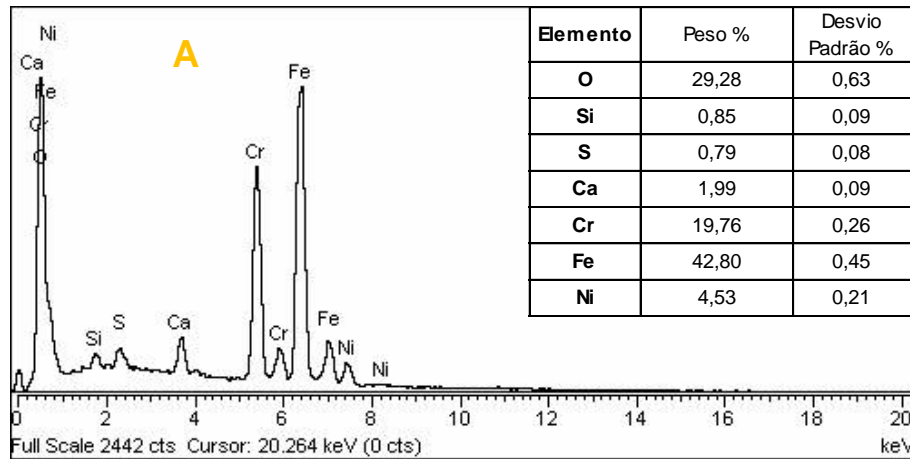


Figura 4.36 – Espectro de energias EDS e tabela com composição química semi-quantitativa para a zona A, identificada na Figura 4.35.

4.8 Caracterização físico-química e microbiológica da água

Foram recolhidas amostras de água em três locais da instalação, nomeadamente no tanque, no início do circuito (“ida”) e no fim do circuito (“retorno”), do sistema AVAC.

4.8.1 Caracterização físico-química da água

A análise dos parâmetros físico-químicos das águas recolhidas, nomeadamente os valores pH, Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), Dureza Total e Alcalinidade, apresentados no Quadro 4.2, permitiu determinar o Índice de Saturação de Langelier (LSI) de cada uma das amostras, que se apresenta no Quadro 4.3.

Quadro 4.2 – Parâmetros físico-químicos das amostras de água recolhidas no tanque 1 da instalação e no início e no fim do circuito de água quente do sistema AVAC.

PARÂMETRO	AMOSTRA DE ÁGUA RECOLHIDA			UNIDADES
	Tanque 1 (T=amb.)	Ida (T=60°C)	Retorno (T=58°C)	
Condutividade (25°)	9,1 x 10 ²	9,0 x 10 ²	8,9 x 10 ²	µS/cm
pH (20°)	7,7	7,9	7,8	Escala de Sorensen
Sólidos suspensos totais (SST)	< 10 (LQ)	< 10 (LQ)	< 10 (LQ)	mg/L
Sólidos dissolvidos totais (SDT)	6,3 x 10²	5,6 x 10²	7,1 x 10²	mg/L
Dureza total	2,3 x 10²	2,3 x 10²	2,3 x 10²	mg CaCO ₃ /L
Cálcio	27	47	48	mg Ca/L
Ferro Total	2,3 x 10 ⁻²	2,0 x 10 ⁻²	2,0 x 10 ⁻²	mg Fe/L
Potássio	3,0	3,0	3,1	mg K/L
Cloretos	1,5 x 10 ²	1,0 x 10 ²	99	mg Cl-/L
Sulfatos	17	18	16	mg SO ₄ ²⁻ /L
Sulfuretos	< 1,0 (LQ)	< 1,0 (LQ)	< 1,0 (LQ)	mg S ₂ ⁻ /L
Nitratos	< 3,0 (LQ)	< 3,0 (LQ)	< 3,0 (LQ)	mg NO ₃ ⁻ /L
Fosfatos	< 0,12 (LQ)	< 0,12 (LQ)	< 0,12 (LQ)	mg PO ₄ ⁻ /L
Carência Bioquímica de oxigénio (CBO ₅)	< 3,0 (LQ)	< 3,0 (LQ)	< 3,0 (LQ)	mg O ₂ /L
Carência Química de oxigénio (CQO)	< 10 (LQ)	< 10 (LQ)	< 10 (LQ)	mg O ₂ /L
Carbono Orgânico Total (COT)	< 2,0 (LQ)	< 2,0 (LQ)	< 1,0 (LQ)	mg C/L
Alcalinidade	1,1 x 10²	1,1 x 10²	1,1 x 10²	mg CaCO ₃ /L
Oxigénio Dissolvido	9,3	6,4	6,6	mg O ₂ /L
Sódio	77	78	77	mg Na/L

Índice de Saturação de Langelier (LSI)

Quadro 4.3 – Resultados obtidos do cálculo do índice de Langelier.

AMOSTRA DE ÁGUA RECOLHIDA			
	Tanque 1 (T = amb)	Ida (T = 60°)	Retorno (T = 58°)
LSI calculado	0,14	1,05	0,87
Conclusão	LSI > 0	LSI > 0	LSI > 0

Como se pode observar, obtiveram-se, para as amostras de água analisadas valores de LSI>0, indicando sobressaturação em relação ao carbonato de cálcio (CaCO₃) com a possibilidade de ocorrer a formação de sais incrustantes. Desta forma, constatou-se que as amostras analisadas têm tendência a ser ligeiramente incrustantes à temperatura de funcionamento conforme referido anteriormente.

4.8.2 Caracterização microbiológica da água

A análise microbiológica consistiu no despiste da presença de colónias de bactérias aeróbias totais e anaeróbias totais, assim como de bactérias oxidantes de ferro (BOF) e de bactérias redutoras de sulfato (BRS) – colónias/bactérias associadas à corrosão microbiológica de materiais metálicos.

A análise microbiológica revelou após 3 semanas de incubação:

Na amostra retirada do Tanque: presença de colónias aeróbias totais, anaeróbias totais, de bactérias oxidantes de ferro, identificadas pela coloração alaranjada, e de bactérias redutoras de sulfato, indicadas pelo aumento da turbidez (Figura 4.37).

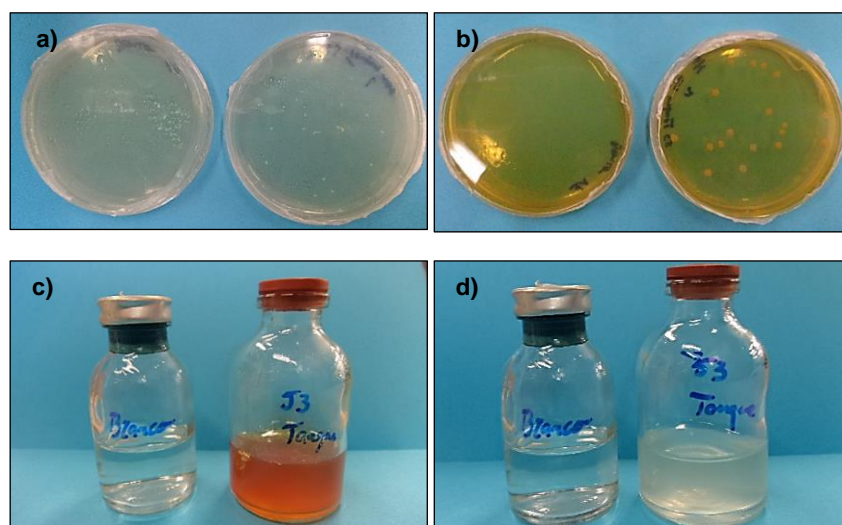


Figura 4.37 – Meios de cultura para a análise microbiológica da água recolhida no tanque: a) bactérias aeróbias; b) bactérias anaeróbias; c) bactérias oxidantes de ferro; d) bactérias redutoras de sulfatos.

Nas amostras recolhidas do circuito e referenciadas como “Ida”: a ausência de colónias anaeróbias totais e presença das restantes bactérias em estudo (Figura 4.38).

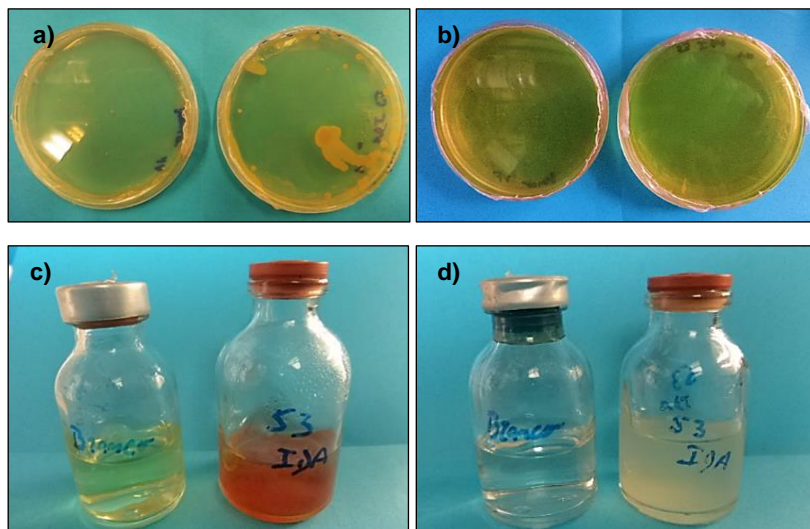


Figura 4.38 – Fotografias ilustrativas dos meios de cultura onde foi realizada a análise microbiológica da amostra de água recolhida na tubagem de ida: a) meio de cultura para colónias de bactérias aeróbias; b) meio de cultura para colónias de bactérias anaeróbias; c) meio de cultura para colónias de bactérias oxidantes de ferro; d) meio de cultura para colónias de bactérias redutoras de sulfatos.

Nas amostras recolhidas do circuito e referenciadas como “Retorno”: a ausência de colónias anaeróbias totais e presença das restantes bactérias em estudo (Figura 4.39).

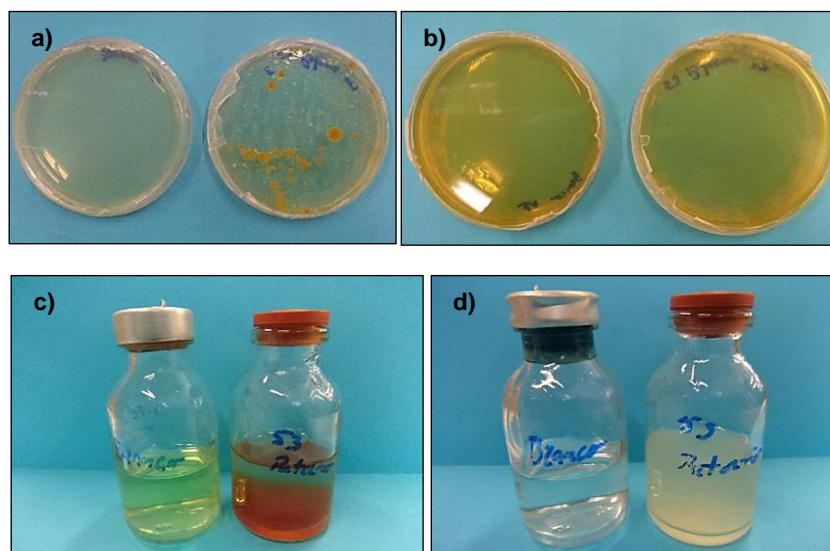


Figura 4.39 – Fotografias ilustrativas dos meios de cultura onde foi realizada a análise microbiológica da amostra de água recolhida na tubagem de retorno: a) meio de cultura para colónias de bactérias aeróbias; b) meio de cultura para colónias de bactérias anaeróbias; c) meio de cultura para colónias de bactérias oxidantes de ferro; d) meio de cultura para colónias de bactérias redutoras de sulfato.

Os resultados das análises realizadas no circuito AVAC (aço-carbono) permitem constatar que a degradação observada na generalidade das superfícies externas da tubagem da amostra A está associada ao fenómeno de corrosão sob isolamento manifestando-se sob a forma de picadas. Esse fenómeno é promovido pela presença de água resultante de fugas, que humedece a manga de isolamento e permite a concentração de agentes agressivos, entre os quais se destacam os iões cloreto, que aceleram a corrosão do aço. Adicionalmente, a evaporação da água provocada pela temperatura, intensifica a concentração destes iões, que podem atingir teores muito superiores ao valor medido nas análises da água. Com efeito, foi identificada a presença do elemento cloro (possivelmente na forma de ião cloreto) na superfície externa do troço de tubo.

Por sua vez, as fugas tiveram muito provavelmente origem nos acessórios de ligação roscada, que aparentam não ter estanquicidade suficiente para evitar que água percole pelos filetes atingindo a superfície externa dos tubos. De notar que também foi detetada corrosão nestes elementos o que agrava ainda mais o problema.

Relativamente ao circuito AQS (aço inoxidável), verificou-se que a razão para a falha das tubagens neste sistema está diretamente associada com a deficiente qualidade das soldaduras do aço inoxidável. Efetivamente, as observações efetuadas nas amostras B e C, através da análise visual, revelaram uma irregularidade do perfil dos cordões de soldadura na raiz, resultado da utilização de uma técnica operatória inadequada. De facto, a significativa oxidação da raiz, revela ausência ou deficiente purga, durante a execução das soldaduras, o que compromete a resistência à corrosão do material. Além disso, a irregularidade da penetração do cordão (fusão incompleta), interstícios onde as condições locais são alteradas, promovendo a acumulação de agentes corrosivos. Com efeito, foram observadas picadas de corrosão nos interstícios criados por falta de fusão/penetração do cordão de soldadura. Também se verificou a presença de cloro no interior das picadas localizadas na superfície interna dos tubos, o que por si só justifica a sua progressão quer em termos de profundidade quer em fissuração ramificada, podendo atingir a superfície externa.

Acresce que foi observada uma picada sub-superficial, de área elevada, originada numa picada estreita existente na superfície interna da tubagem que se propagou como que em túnel - morfologia típica de corrosão por microorganismos. Esta constatação é suportada pelos resultados da análise microbiológica da água que detetaram a presença de microorganismos promotores/aceleradores de corrosão, tais como bactérias redutoras de sulfato e bactérias oxidantes de ferro.

Por fim, a fissuração observada na superfície externa dos tubos em aço inoxidável, pode ser atribuída a um fenómeno de corrosão sob tensão. Esta forma de ataque é mais evidente junto às soldaduras por estas serem zonas com maiores tensões residuais. Atendendo a que a fissuração tem origem maioritariamente na superfície externa, o meio agressivo necessário

ao processo corrosivo é resultante de fugas na tubagem, com origem nos acessórios de ligação, e/ou em picadas trespassantes que permitem que a água que circula no interior atinja a superfície externa. De facto, atendendo às condições ambientais, a única razão plausível para a observação de resíduos de carbonato de cálcio na superfície externa do tubo de aço inoxidável é a existência de fugas que permitiram a acumulação de água no espaço entre o tubo e a manga de isolamento térmico. As condições de temperatura da água estagnada terão promovido a evaporação parcial da água ao longo do tempo, o que promoveu não apenas a deposição de sais, mas também o aumento gradual da concentração do ião cloreto

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES, PROPOSTAS DE MELHORIA E LIMITAÇÕES

5.1 Conclusões

Como previamente referido, o objetivo deste trabalho consistiu na identificação das causas das falhas por corrosão de sistemas de circulação de água de uma unidade hoteleira. Com base nos dados obtidos dos ensaios de caracterização realizados durante este estágio de foi possível concluir que:

- A degradação da tubagem do circuito AVAC deveu-se à acumulação de água sob isolamento devido a fugas nos acessórios de ligação que provocaram um fenómeno de corrosão sob isolamento.
- Nas superfícies externas dos tubos do circuito AQS ocorreu um fenómeno de corrosão sob tensão resultante das tensões residuais devido à soldadura, bem como, à presença de um metal suscetível e à acumulação de água entre a superfície metálica e o isolamento térmico. Esta água poderá ter tido origem em fugas nos acessórios ou em picadas e/ou fissuras trespassantes com origem na superfície interna dos tubos
- Ainda no circuito AQS, atribuiu-se a corrosão interna aos microrganismos presentes na água numa ação combinada com a presença de cloretos e potenciada pela deficiente qualidade das soldaduras que promoveu fenómeno de corrosão intersticial.

5.1 Propostas de Melhoria e Limitações

Este trabalho, permitiu assim a compreensão das causas do problema, essenciais para a mitigação de falhas futuras.

Nesta perspetiva nesta secção são abordadas algumas mas medidas a implementar para prevenir a falha prematura e melhorar a eficiência destes sistemas, nomeadamente:

- Manutenções regulares, assegurando que sistema é inspecionado e mantido regularmente por um profissional, (incluindo inspeções específicas regulares para deteção de bactérias), por exemplo limpeza de filtros, verificação de existência de fugas, lubrificação de peças móveis e ajuste dos controles.).
- Controlo dos parâmetros, como a temperatura, pH, concentração de oxigénio, uso de inibidores de corrosão ou dosagem controlada de biocidas (MIC).
- Proteção por revestimentos orgânicos como as tintas e vernizes, ou por revestimentos inorgânicos metálicos ou não metálicos

- Atualização de equipamentos e materiais, ou seja, considerar substituir equipamentos antigos por modelos mais apropriados e eficientes energeticamente.
- Utilizar termostatos programáveis que permitem o ajuste da temperatura de acordo com as rotinas diárias, evitando o uso desnecessário do sistema.
- Melhorar o isolamento de forma a garantir que as zonas a climatizar estão devidamente isoladas para evitar perdas de calor ou arrefecimento excessivo.

Para a determinação dos procedimentos a adotar, no que respeita à manutenção preventiva, corretiva e possíveis correções, seria essencial o conhecimento das particularidades dos sistemas quanto ao seu funcionamento. Por conseguinte, constata-se uma limitação a um estudo mais abrangente, considerando-se, no entanto, que a ausência desta informação não impediu que o objetivo do trabalho fosse concretizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. Gentil, *Corrosão*, 3ª ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 1996.
- [2] F.C. McQuiston, J.D. Parker and J.D. Spitler, *Heating, Ventilating, and Air Conditioning: Analysis and Design*, 6th ed. USA: John Wiley & Sons, 2005.
- [3] A.J.A. Santos, *AVAC, Um Manual de Apoio: Fundamentos*, 2ª ed. Porto, Portugal: Quântica Editora, 2021.
- [4] S.Pereira. (2024, Ago). *Sistemas AVAC: O Conforto da Climatização. Arquitectura, Construção e Imobiliário, Arrefecimento* [Online]. Disponível em <https://www.4paredes.info/sistemas-avac-o-conforto-da-climatizacao/>
- [5] L. Marques, “Avaliação Técnico-Económica de Sistemas de AVAC”, Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2011.
- [6] L. Roriz, *Climatização: Conceção, Instalação e Condução de Sistemas*, 2ª ed. Amadora, Portugal: Edições Orion, 2006.
- [7] B.X.R. Droguett “Embodied Carbon of Heating, Ventilation, Air Conditioning and Refrigerants (HVAC+R) Systems” Dissertação de doutoramento, University of Washington, Washington, 2019.
- [8] J.M.F. Marques, “Manutenção de uma Instalação de AVAC das Áreas Limpas de uma Indústria Farmacêutica”, Dissertação de mestrado, Universidade do Porto, Porto, 2005.
- [9] Esfera Brutal, pichelaria AVAC. A (2024 ,Ago). *AVAC Dicas EsferaBrutal Inovação Sustentabilidade, Perguntas Frequentes sobre AVAC*. [online]. Disponível em <https://esferabrutal.pt/perguntas-frequentes-sobre-avac/>
- [10] L.M.R. Carvalho et.al. J.C.L. Barbosa et.al. T.M.M. Teixeira et.al. V.M.L. Calado, *Manual de Instalação de Sistemas Solares Térmico*, 2ª ed, Porto, Portugal: Publindústria, Edições Técnicas Lda. 2015.
- [11] Macolis, climatização e sistemas de conforto. (2024, Ago). *Energia Solar Térmica, Como Funcionam*. [Online]. Disponível em <https://www.macolis.pt/pt/detalhe-solucao/-8>.
- [12] P. Reis, Portal Energia (2024, Ago). Noticias sobre Energia Solar. Energia Solar. [Online]. Disponível em <https://www.portal-energia.com/preciso-painel-solar-termico-casa/>
- [13] Macolis, climatização e sistemas de conforto. (2024, Ago). *Esquentadores a Gás Natural*. [Online]. Disponível em <https://www.macolis.pt/pt/detalhe-solucao/-27>
- [14] Eco-ap, Manual de Eficiência Energética. (Ago 2024). *Águas Quentes Sanitárias*. [Online]. Disponível em https://ecoap.pt/wp-content/uploads/2019/01/Guia-5-AGUAS-QUENTES-E-SANITARIAS_MEE.pdf
- [15] Macolis, climatização e sistemas de conforto. (2024, Ago). *Termoacumuladores Eléctricos*. [Online]. Disponível em <https://www.macolis.pt/pt/detalhe-solucao/-9>

- [16] Macolis, climatização e sistemas de conforto. (2024, Ago). *Bombas de calor AQS*. [Online]. Disponível em <https://www.macolis.pt/pt/detalhe-solucao/-32>
- [17] Pgpac. (2024 Mar), *O Combate à Corrosão*. [Online]. Disponível em <https://www.pgpac.com.br/o-combate-a-corrosao/>
- [18] N. Hossain, M.A. Islam and M.A. Chowdhury, “Advances of Plant-Extracted Inhibitors in Metal Corrosion Reduction – Future Prospects and Challenges”, *Results in Chemistry*, Vol.5, Nº100883, pp. 2211-7156, Jan 2023.
- [19] Divisão Técnica de Corrosão e Proteção de Materiais. (2024, Mar). *Avaliação do Impacto da Corrosão na Economia Portuguesa*. [Online]. Disponível em https://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier_artigo/24042013_c_silva_552646811517f9a993b19c.pdf
- [20] Zetacorr, Empresa de Engenharia especializada em corrosão. (2024, Mar). *Custos da Corrosão*. [Online]. Disponível em <https://www.zetacorr.com/?p=677>
- [21] G. Koch et.al J. Varney et.al N. Thompson et.al O. Moghissi et.al M. Gould et.al J. Payer. (2024,Mar). “International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study”. Nace International. [Online]. Disponível em [Nace-International-Report.pdf](https://www.naceinternational.com/Portals/0/International-Report.pdf).
- [22] P. Wagener and Y. Ge. (2024, Mar). “Corrosion in Industrial Applications: How next generation anti-corrosion plating achieves higher fluid power product performance”. Parker. Parker Hannifin Corporation Tube Fittings Division. [Online]. Disponível em <https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/Tube-Fittings-Division/Parker-Whitepaper-How-Next-Generation-Plating-Achieves-Higher-Fluid-Power-Product-Performance.pdf>.
- [23] E. Bardal, *Corrosion and Protection*, London: Springer-Verlag London Limited 2004.
- [24] P.R. Roberge, *Corrosion Engineering Principles and Practice*, USA: Mc GrawHill, 2008.
- [25] Cathwell AS. (2024, Abr.). *What is corrosion?*. Articles. [Online]. Disponível em <https://cathwell.com/what-is-corrosion/>.
- [26] D.P.S. Kropf, “Estudo Experimental dos Efeitos da Corrosão no Comportamento à Flexão de Elementos Pré-tensionados Produzidos com Concreto”, Tese de doutoramento, PPGEC- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2021.
- [27] N. Alonso-Falleiros, *Corrosão e Proteção dos Materiais* (2024, Abr). *Diagramas de Pourbaix ou Diagramas E vs pH*, [Online]. Disponível em https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6343664/mod_resource/content/1/Aula_4_Pourbaix_2021.pdf
- [28] M.J. Correia, “Comportamento Eletroquímico de Aços Inoxidáveis em Meios Contaminados”, Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2004.

- [29] M.J. Correia, “Passivação do aço inoxidável no betão”, Dissertação de doutoramento, Universidade de Lisboa, Lisboa. 2009.
- [30] C.S.S. Tavares “Monitorização da Resistência à Corrosão Localizada do Aço Inoxidável no Betão”, Dissertação de mestrado, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [31] R. Fontinha. (2024, Mai). «Metals “Modernos” em Património Edificado: Desempenho em Ambiente Exterior», Cadernos do Arquivo Municipal [Online], 16, pp181-204., Disponível em <https://journals.openedition.org/arquivomunicipal/636>
- [32] Surescreen Scientifics. (2024, Jun.) Pitting Corrosion, Technical White Paper. [Online]. Disponível em <https://www.surescreenscientifics.com/wp-content/uploads/2020/09/Pitting-Corrosion-Whitepaper.pdf>
- [33] J.L. Silva, “Estudo Microestrutural e de Resistência a Corrosão por picadas dum Aço Inoxidável Duplex Vazado”, Relatório de Estágio Curricular, Universidade do Porto, Porto, 2003.
- [34] Curtin Corrosion Centre, (2024, Jun.). Corrosion Under Insulation [Online]. Disponível em <https://curtin-corrosion-centre.com/expertise/corrosion-under-insulation/>
- [35] Aspen Aerogels (2024, Jun.). A Primer on Corrosion Under Insulation (CUI), Asset Intelligence Report, Inspectioneering. [Online]. Disponível em <https://inspectioneering.com/airs/2022-09-22/10272/a-primer-on-corrosion-under-insulation-cui>.
- [36] M.G. Fontana, *Corrosion Engineering*, 3ª ed. Singapura: Mc GrawHill, 1987
- [37] J.Bartak and N.Camarcat (2024, Jun). Stress Corrosion Cracking on French NPPs – an overview, NucAdvisor [Online]. Disponível em <https://www.nucadvisor.com/post/stress-corrosion-cracking-on-french-npps-an-overview>
- [38] Puc Rio, (2024, Jun). 3.Corrosão. [Online]. pp 51- 81. Disponível em https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/32706/32706_4.PDF
- [39] Unified Alloys (2024, Jun). Mitigating the Risk Factors for Stress Corrosion Cracking. [Online]. Disponível em <https://www.unifiedalloys.com/blog/stress-corrosion-cracking-risks>
- [40] M.M. Galvão, “Efeito do Potencial de Proteção Catódica na Corrosão Microbiologicamente Induzida”, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Abril, 2008.
- [41] F. Khoshnaw and R, Gubner (2024, Jul) Corrosion Atlas Series. *Corrosion Atlas Case Studies. Part II: Corrosion Topics*. [Online]. ISBN 9780128187609, pp xliii-lxviii. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/microbiological-corrosion>
- [42] E.S. Lima, “Biocorrosão: Sinergismo Microbiano e Influência nas Características de Corrosão e Propriedades Mecânicas do Aço Carbono AISI 1010”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, Novembro, 2010.
- [43] E.D.D. Durning, *Corrosion Atlas (Part II)* 3rd ed. USA: Elsevier, 2018.
- [44] P.R. Roberge, *Handbook of Corrosion Engineering*, USA: McGraw-Hill, 2000.

- [45] T. Kasa et.al A.L. Bassa et.al G.T. Negatu et.al Z.A. Sahile et.al D. Reddythota.)Heliyon. *Investigation of Wabe River water fitness for agricultural and industrial purposes*. [Online]. 12, pp 2405-8440. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11865>.
- [44] A. Al-Harabsheha et.al A. Al-Tarawnehb et.al A. Al-Ma'abrehc et.al S. Ramadeenb et.al T. El-Hasanb,d et.al M. M. Al-Alawie (2024, Mar.). *Assessing of Drinking Water Quality in Al-karak Province in Central Jordan; Based on Water Saturation Indices*. Heliyon. [Online] 8, pp 2405-8440. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18862>.
- [45] B.S. Shankar, "Determination of Scaling and Corrosion Tendencies of Water Through the Use of Langelier and Ryznar Indices", *Scholars J. Eng. Technol*, 2 (2A), pp.123-127. 2014.
- [46] Metcalf and Eddy, *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, 4thed. New York, USA: Mc GrawHill, 2003.
- [47] I. Zolin. (2024, Mar.). *Ensaio Mecânicos e Análises de Falhas*. e-Tec Brasil. [Online]. Disponível em https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/11/15_ensaios_mecanicos_analises_falhas.pdf.