



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Rodrigo Bernardo de Lopes Mendes

**EFEITO DE AMBIENTES HOSTIS NA  
RESISTÊNCIA AO IMPACTO DE AÇO AO  
CARBONO PRODUZIDO POR *WIRE-ARC ADDITIVE  
MANUFACTURING (WAAM)***

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, ramo de Energia e Ambiente orientada pela Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro e pelo Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2022



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **Efeito de ambientes hostis na resistência ao impacto de aço ao carbono produzido por Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM)**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

## **Effect of hostile environments on the impact strength of carbon steel produced by Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM)**

Autor

**Rodrigo Bernardo de Lopes Mendes**

Orientadores

**Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro**

**Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco**

Júri

**Presidente** Professor Doutor Maria Augusta Neto  
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Orientador** Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro  
Professora Auxiliar com Agregação da Universidade de Coimbra

**Vogais** Professor Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Professora Doutora Trayana Stoykova Tankova  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Coimbra, Setembro, 2022**



“A persistência é o caminho do êxito”

Aos meus pais.



## Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores, Professora Doutora Ana Paula Betencourt Martins Amaro e Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco, por todo o apoio e dedicação prestados ao longo do trabalho. Para além disso, agradecer por toda a disponibilidade e por terem sido incansáveis, ao longo deste semestre.

À Professora Doutora Trayana Tankova, pela impressão das placas usadas neste trabalho e ao estudante de Doutoramento Carlos Zhu pela ajuda na compreensão de alguns pontos, sobre o fabrico das placas.

Ao Sr. Fernando Bernardes das oficinas, por toda a ajuda prestada na preparação dos provetes para ensaios.

Ao NEEMAAC, por ter tido um papel muito importante no meu percurso académico, onde desenvolvi amizades e competências únicas.

A todas os meus amigos e pessoas, que se cruzaram comigo e que fizeram da minha jornada um trajeto melhor.

Ao DEM, por ser um local que posso chamar de Casa e por ter a mística e o espírito que todos os estudantes universitários deviam experienciar.

Por último, um especial e enorme obrigado aos meus pais pelo apoio, dedicação e por me terem proporcionado condições para atingir os meus objetivos.



## Resumo

A presente Dissertação de Mestrado tem como principal propósito analisar a influência de ambientes hostis na resistência ao impacto de aço carbono fabricado por *Wire-Arc Additive Manufacturing* (WAAM). Este estudo tem como base a bibliografia já existente na temática da degradação e do WAAM, destacando-se da mesma, na medida em que são analisadas novas condições de degradação do material cujos efeitos no comportamento mecânico, não são, até aqui, ainda, bem conhecidos.

Desta forma, estudou-se o efeito de ambientes hostis na resistência ao impacto, segundo a influência das soluções de degradação Cloreto de Sódio (NaCl) e Ácido Clorídrico (HCl), do tempo de imersão (0 dias, 15 dias e 30 dias), da aplicação ou não de tensão elétrica nas mesmas, das condições de deposição das placas (diferença de espessura) e da orientação do seccionamento dos provetes (vertical e horizontal). O parâmetro da energia absorvida, que se traduz na resistência ao impacto, foi medido através da fratura total dos provetes por intermédio de Ensaio *Charpy*, sendo que, posteriormente, foi analisada a superfície de fratura, por microscopia eletrónica de varrimento (SEM), de forma a avaliar a influência das condições descritas nos mecanismos de rotura dos provetes.

Após os resultados foi possível concluir que o aumento do tempo de degradação tem uma influência acentuada na resistência ao impacto, uma vez que, analisando a mesma condição de degradação, foi possível visualizar um dano mais elevado nas amostras que foram degradadas durante mais tempo. No que diz respeito à aplicação de tensão elétrica, também foi possível concluir que provoca um dano mais acentuado nos provetes a ela sujeitos. Em termos da solução de degradação utilizada, verificou-se que o HCl ataca o provete de uma forma mais agressiva que o NaCl, provocando, inclusive, com maior facilidade a formação de óxidos. Por fim, e em relação às condições de fabrico e à orientação do seccionamento, não foi possível tirar uma conclusão objetiva devido à existência provável de variabilidades inerentes ao procedimento experimental.

**Palavras-chave:** *Wire-Arc Additive Manufacturing*, Condições de Degradação, Ensaio Charpy, Energia absorvida, Aço Carbono.



## Abstract

The main purpose of this Master's Dissertation is to analyze the influence of hostile environments on impact resistance of carbon steel manufactured by Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM). This study is based on the existing bibliography on the subject of degradation and WAAM, standing out from the same, insofar as new solutions and degradation conditions are used in a material that, until now, the behavior, when subjected to these environments, was not known.

In this way, the effect of hostile environments on impact resistance was studied, according to the influence of the degradation solution (NaCl and HCl), the immersion time (0 days, 15 days, and 30 days), the application or not of an electrical voltage in the solutions, the manufacturing conditions of the plates (difference thickness) and the orientation of the sectioning of the specimens (vertical and horizontal). The parameter of absorbed energy, which translates into impact resistance, was measured through the fracture of the specimens through the Charpy Test, and, later, the fracture surface was analyzed by scanning electron microscopy, in order to evaluate the influence of the described conditions, in the failure mechanisms of the specimens.

As a result, it was possible to conclude that the increase in the degradation time has a strong influence on the impact resistance, since, analyzing the same degradation condition, it was possible to visualize a higher damage in the samples that were degraded for a longer time. Regarding the application of an electrical voltage, it was also possible to conclude that it causes more damage to the specimens subjected to it. In terms of the used degradation solution, it was concluded that HCl attacks the specimens in a more effective way than NaCl, causing more easily the formation of oxides. Finally, regarding the manufacturing conditions and the orientation of the sectioning, a general objective conclusion was not taken due to the existence of variability inherent to the experimental procedure. In the case of the orientation of the sectioning, it is believed that the difficulty in obtaining general conclusions is due to the fact that the porosity of the material was not homogeneously distributed.

**Keywords:** *Wire-Arc Additive Manufacturing, Degradation Conditions, Charpy Test, Absorbed Energy, Carbon Steel*



# Índice

|  |      |
|--|------|
| ÍNDICE DE FIGURAS .....  | ix   |
| ÍNDICE DE TABELAS .....  | xi   |
| SIGLAS E ACRÓNIMOS.....  | xiii |
| Siglas .....   | xiii |
| 1. INTRODUÇÃO.....   | 1    |
| 2. ESTADO DA ARTE .....  | 3    |
| 2.1. Impressão 3D .....  | 3    |
| 2.1.1. Tecnologias de Fabrico Aditivo .....                                  | 3    |
| 2.1.2. Materiais usados na impressão 3D .....                                | 3    |
| 2.1.3. WAAM.....   | 4    |
| 2.2. Ensaio Charpy.....  | 9    |
| 2.3. Fratura .....   | 9    |
| 2.3.1. Propagação de fendas em aços de baixo carbono fabricados por WAAM.... | 10   |
| 2.4. Corrosão atmosférica em aços .....                                      | 11   |
| 2.5. Degradação em orlas costeiras.....                                      | 13   |
| 2.6. SEM .....   | 13   |
| 3. METODOLOGIA.....  | 15   |
| 3.1. Provetes.....   | 15   |
| 3.1.1. Fabrico das placas de aço ao carbono.....                             | 15   |
| 3.1.2. Preparação e geometria dos provetes.....                              | 16   |
| 3.1.3. Ensaio Charpy .....   | 18   |
| 3.2. Degradação dos provetes .....   | 19   |
| 3.3. Lupa .....  | 20   |
| 3.4. SEM .....   | 22   |
| 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....                                   | 23   |
| 4.1. Massa .....   | 23   |
| 4.2. Amostras de Controlo .....  | 24   |
| 4.2.1. Efeito da orientação do seccionamento .....                           | 25   |
| 4.2.2. Efeito das condições de fabrico das placas.....                       | 26   |
| 4.2.3. SEM.....  | 26   |
| 4.3. Efeito de ambientes hostis .....  | 28   |
| 4.3.1. Cloreto de Sódio (NaCl).....  | 28   |
| 4.3.2. Cloreto de Sódio (NaCl) com Tensão.....                               | 29   |
| 4.3.3. Ácido Clorídrico (HCl).....   | 32   |
| 4.3.4. Ácido Clorídrico (HCl) com Tensão .....                               | 33   |
| 4.4. Análise Comparativa.....  | 36   |
| 4.4.1. Análise dos resultados .....  | 37   |
| 4.4.2. Análise SEM.....  | 38   |
| 4.4.3. Análise EDS .....   | 41   |
| 5. CONCLUSÕES.....   | 43   |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... | 45 |
| APÊNDICE A .....                 | 47 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 2.1.</b> Tipos de fratura (US DOE. (2016)) .....   | 10 |
| <b>Figura 2.2.</b> Gráfico Tensão-Deformação de materiais frágeis e dúcteis .....  | 10 |
| <b>Figura 3.1.</b> Exemplo de uma placa fabricada para este trabalho. ....   | 16 |
| <b>Figura 3.2.</b> Serrote elétrico e fresa.....   | 18 |
| <b>Figura 3.3.</b> Provete utilizado nos ensaios experimentais.....  | 18 |
| <b>Figura 3.4.</b> Equipamento para Ensaio Charpy.....   | 19 |
| <b>Figura 3.5.</b> Zona de impacto do martelo.....   | 19 |
| <b>Figura 3.6.</b> Suporte de colocação dos provetes. ....   | 19 |
| <b>Figura 3.7.</b> Câmara de degradação. ....  | 20 |
| <b>Figura 3.8.</b> Lupa. ....  | 20 |
| <b>Figura 3.9.</b> Imagens ilustrativas de quatro fotografias tiradas ao provete H2-CS.....  | 21 |
| <b>Figura 3.10.</b> Imagens ilustrativas com cinco ampliações diferentes tiradas ao provete V1-CS.....   | 22 |
| <b>Figura 4.1.</b> Gráfico comparativo dos valores da massa antes e depois da degradação as amostras V1.....   | 24 |
| <b>Figura 4.2.</b> Gráfico comparativo dos valores da energia absorvida das amostras de controlo.....  | 25 |
| <b>Figura 4.3.</b> Gráfico comparativo dos valores da resiliência das amostras de controlo. ....   | 25 |
| <b>Figura 4.4.</b> Visualização da superfície de fratura das quatro amostras de controlo: a) H1, b) H2, c) V1 e d) V2. Ampliação 3000×.....                                      | 27 |
| <b>Figura 4.5.</b> Gráfico comparativo dos valores da energia absorvida das amostras degradadas em NaCl.....   | 28 |
| <b>Figura 4.6.</b> Gráfico comparativo dos valores da energia absorvida das amostras degradadas em NaCl com tensão.....  | 30 |
| <b>Figura 4.7.</b> Visualização da superfície de fratura das quatro amostras: a) V2-CS, b) V2-NaCl-15 dias, c) V2-NaCl-30 dias, d) V2-NaCl-T-15 dias e e) V2-NaCl-T-30 dias..... | 31 |
| <b>Figura 4.8.</b> Gráfico comparativo dos valores da energia absorvida das amostras degradadas em HCl. ....   | 33 |
| <b>Figura 4.9.</b> Gráfico comparativo dos valores da energia absorvida das amostras degradadas em HCl com tensão. ....  | 34 |
| <b>Figura 4.10.</b> Provete degradados em HCl com tensão, ao fim de 10 dias de degradação. ....  | 35 |
| <b>Figura 4.11.</b> Visualização da superfície de fratura das quatro amostras: a) V2-CS, b) V2-HCl-15 dias, c) V2-HCl-30 dias e d) V2-HCl-T-10 dias. ....                        | 35 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 4.12.</b> Visualização das várias superfícies de fratura.....  | 38 |
| <b>Figura 4.13.</b> Visualização das imagens EDS dos quatro provetes H2 degradados: a) H2-NaCl, b) H2-NaCl-T, c) H2-HCl e d) H2-HCl-T..... | 41 |
| <b>Figura 4.14.</b> Exemplo de gráfico EDS – provete H2-HCl-T.....   | 42 |
| <b>Figura A.1.</b> Gráfico comparativo dos valores da massa antes e depois da degradação as amostras V2.....                               | 47 |
| <b>Figura A.2.</b> Gráfico comparativo dos valores da massa antes e depois da degradação as amostras H1.....                               | 47 |
| <b>Figura A.3.</b> Gráfico comparativo dos valores da massa antes e depois da degradação as amostras H2.....                               | 48 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 3.1.</b> Contabilização dos provetes utilizados.....                             | 17 |
| <b>Tabela 4.1.</b> Influência de orientação do seccionamento. ....                         | 37 |
| <b>Tabela 4.2.</b> Influência das condições de manufatura. ....                            | 37 |
| <b>Tabela 4.3.</b> Perda de massa segundo duas degradações diferentes (Zuchry, 2019). .... | 40 |



## SIGLAS E ACRÓNIMOS

### Siglas

CMTAW – *Cold Metal Transferred Arc Welding*

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

EDS – Espectroscopia de Raios X por Energia Dispersiva

GMAW – *Gas Metal Arc Welding*

HCl – Ácido Clorídrico

MAG – *Metal Active Gas*

MIG – *Metal Inert Gas*

NaCl – Cloreto de Sódio

SEM – *Scanning Electron Microscope*

SCC – Corrosão Sob Tensão

WAAM – *Wire Arc Additive Manufacturing*



## 1. INTRODUÇÃO

Com a evolução contínua da engenharia e da tecnologia, temos assistido a um desenvolvimento muito acentuado de novos materiais, com o intuito de serem mais leves, mais resistentes e com maiores aplicabilidades.

O aço ao carbono é um dos materiais mais usados no mundo e, dependendo da aplicação pode estar sujeito a ambientes hostis agressivos e condições de serviço severas, que se podem traduzir em dano acrescido, o que pode, em último caso, causar rotura.

A impressão 3D por *Wire-Arc Additive Manufacturing* (WAAM) tem, também, contribuído para o desenvolvimento de novos materiais e novas formas de produção dos existentes, sendo que no caso do aço carbono ainda não existe um conhecimento suficientemente aprofundado sobre o comportamento do mesmo, quando fabricado por WAAM, no que diz respeito à resistência ao impacto e quando sujeito a ambientes hostis. Tendo isto em conta, e com base nestas questões, tem-se começado a estudar esta temática, de forma a compreender a origem e o tipo de dano. O aço ao carbono fabricado por WAAM é muito utilizado nas estruturas em orlas costeiras, estando, por isso, sujeitos à influência do mar (ambientes salinos), sendo esta a razão pela qual se efetuou a degradação das amostras em soluções de cloreto de sódio (NaCl) e ácido clorídrico (HCl). Também começa a ser muito utilizado em estruturas petroquímicas, ficando sob a ação de ambientes corrosivos, tais como as soluções ácidas.

Este trabalho tem como objetivo estudar a resistência ao impacto do aço ao carbono fabricado por WAAM, através de ensaio Charpy, de forma a perceber a influência das condições de impressão (espessura do material), da orientação do seccionamento das placas e das condições de degradação (tempo de imersão e existência de tensão elétrica). Para se compreender melhor estes efeitos, faz-se também a caracterização dos mecanismos de dano das superfícies de fratura por microscopia eletrónica de varrimento para os diferentes casos estudados.

De uma forma geral, esta Dissertação de Mestrado está organizada em cinco capítulos, sendo esta Introdução o primeiro. No segundo capítulo introduz-se o assunto que vai ser objeto de estudo, através da análise do estado da arte existente, bem como os conteúdos que gravitam à volta deste tema. O terceiro capítulo aborda detalhadamente os materiais e a

metodologia experimental utilizada ao longo do trabalho, designadamente a impressão 3D das placas por WAAM, a preparação dos provetes usados nos ensaios Charpy, os diferentes tipos de degradação considerados, e a análise das superfícies de fratura por SEM.

No capítulo quatro, são apresentados todos os resultados, e é realizada toda a discussão dos mesmos, tentando procurar suporte na literatura já existente. Por fim, no último capítulo são apresentadas as conclusões, que derivaram dos resultados dos ensaios e são propostas algumas sugestões para trabalhos futuros.

## 2. ESTADO DA ARTE

Para realização deste estudo, é importante perceber em que ponto está a ciência, relativamente a este tema, bem como a outros assuntos que se relacionam com esta matéria. Deste modo, nos pontos seguintes faz-se uma revisão do estado da arte.

### 2.1. Impressão 3D

Nos dias que correm e com a crescente procura por materiais que mantenham boas propriedades mecânicas, mas que sejam mais leves e económicos, a impressão 3D, também designada por fabrico aditivo tem vindo a ganhar especial relevância no mercado. De um modo geral, a impressão 3D consiste na criação de objetos físicos, a partir de um projeto auxiliado por computador (CAD), por deposição sucessiva de camadas de material, ou materiais, sendo que é usada em vários setores, tais como o automóvel, aeronáutico, construção civil e saúde, entre outros. Shahrubudin *et al.*, 2019.

#### 2.1.1. Tecnologias de Fabrico Aditivo

De acordo com a norma ASTM Padrão F2792, a ASTM catalogou as tecnologias de impressão 3D em sete grupos: incluindo o jateamento de ligante, deposição de energia direcionada, extrusão de material, jato de material, fusão em leito de pó, laminação de chapas e cuba de fotopolimerização. A tecnologia WAAM, que serve de base a este trabalho, e que será abordada em detalhe mais à frente, enquadra-se no grupo deposição de energia direcionada.

#### 2.1.2. Materiais usados na impressão 3D

O grupo de tecnologias descritas atrás, é capaz de fabricar objetos nas mais variadas classes de materiais, como por exemplo: metais, polímeros, cerâmicos, compósitos e *smart materials*.

Devido ao facto desta dissertação ter como alvo o estudo de aços ao carbono, irá proceder-se à particularização da impressão 3D em metais.

De uma forma geral, os metais fabricados por fabrico aditivo ganham especial importância na indústria aeroespacial, automóvel, médica e transformadora, devido às vantagens existentes deste processo. As excelentes propriedades físicas e mecânicas desta classe de materiais permitem o fabrico de peças complexas, desde a impressão de órgãos humanos até componentes aeroespaciais. Os exemplos desses materiais são ligas de aço de alta resistência, ligas de aço inoxidável, ligas à base de cobalto, ligas à base de níquel, aços inoxidáveis e ligas de titânio. A liga à base de cobalto é bastante utilizada em aplicação odontológica, devido à sua alta rigidez específica, resiliência, alta capacidade de recuperação e alongamento. Para além disso, a tecnologia de impressão 3D tem capacidade para produzir peças para a indústria aeroespacial usando ligas à base de níquel, sendo que também são usadas em ambientes hostis, devido à sua elevada resistência à corrosão e resistência à temperatura.,Shahrubudin *et al.*, 2019.

### 2.1.3. WAAM

Particularizando o processo que vai ser objeto de estudo nesta Dissertação – o *Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)* – Treutler & Wesling, 2021, os principais fatores que estão na origem da escolha do processo de fabrico aditivo são, por um lado, a complexidade e resolução que podem ser alcançadas e, por outro lado, a taxa de deposição e o tamanho do componente. É de notar que o WAAM é mais adequado quando se pretende obter elevadas taxas de deposição, e/ou quando a dimensão do componente é considerável. Relativamente ao processo WAAM propriamente dito, este consiste num processo de fabrico aditivo por fusão, no qual os elétrodos estão num braço robô e são fundidos, através da energia térmica de um arco elétrico, originando a deposição de camadas de material, de maneira a formar o componente pretendido. Uma das grandes vantagens do WAAM, quando comparado com outros processos de fabrico aditivo para metais, é o facto das taxas de arrefecimento serem menores e haver uma maior transferência de calor para o eléctrodo.

No que diz respeito aos tipos de processos que são utilizados no WAAM, pode-se destacar, por exemplo, os seguintes: *Tungsten Inert Gas Welding (TIG Welding)*, *Plasma Arc Welding* e *Gas Metal Arc Welding (GMAW)*.

Relativamente ao processo TIG, este é dos processos que mais regularmente é utilizado no WAAM, sendo que uma das suas maiores vantagens é o facto de existir a possibilidade

de se usar mais de um fio durante o mesmo processo de impressão. O ponto negativo que deriva da alimentação de arame ser separada prende-se com o facto de ser difícil mudar as direções de soldadura, porque o alimentador de arame tem de mudar a posição de trabalho. Para além disso, a poça de fusão pode ser influenciada devido a diferentes parâmetros do processo e ao uso de soldadura pulsada.

No que concerne ao *Plasma Arc Welding*, este também pode ser usado no fabrico aditivo com pó ou arame como enchimento, sendo que é aplicado numa das abordagens mais simples do fabrico aditivo – revestimento multicamadas. Para além disto, este processo tem, também, como uma das principais virtudes, a capacidade de separar o *input* de energia e o fluxo de material do enchimento.

Por fim, e no que diz respeito ao *Gas Metal Arc Welding*, este é um dos processos mais utilizados no WAAM. Consiste num processo de soldadura no qual se forma um arco elétrico entre o elétrodo consumível de arame e o metal da peça, fazendo com que haja um aquecimento do metal, originando a fusão e união de ambos. Paralelamente, e de forma a proteger o processo, é adicionado um gás de proteção que pode ou não ser inerte, como é o caso da soldadura *Metal Inert Gas* (MIG) e *Metal Active Gas* (MAG) respetivamente. Relativamente aos modos de transferência, salientam-se o globular, o curto-circuito, o *spray* e o *spray* pulsado, cada um com as suas propriedades, vantagens e limitações correspondentes, sendo que, geralmente, a fonte de alimentação é de corrente contínua e tensão constante. As principais vantagens deste processo são a versatilidade, a velocidade e a adaptação do mesmo à automação robótica.

O fabrico aditivo tem um grande impacto nas propriedades do componente que se fabrica, sendo que a principal razão para tal facto se deve aos ciclos térmicos sucessivos que o componente fabricado aditivamente é sujeito, o que pode levar a que tanto a microestrutura como as propriedades mecânicas do material difiram significativamente daquelas dos produtos fabricados convencionalmente. Os processos WAAM podem ser aplicados a diversos materiais, dos quais se destacam o aço, alumínio, cobre, titânio, magnésio, níquel, tântalo e o tungsténio. Nesta dissertação, estudar-se-á o WAAM em aço ao carbono, pelo que será este material o foco da análise seguinte. É, também, de especial relevância, perceber que fatores é que são necessários definir, de forma a conseguir completar o processo de fabrico de uma peça, recorrendo ao WAAM.

### **2.1.3.1. Fatores do processo WAAM**

Depois de realizada a análise dos processos de soldadura que são usados na técnica WAAM, é, também, de especial relevância, perceber que fatores é que são necessários definir, de forma a conseguir completar o processo de fabrico de uma peça, recorrendo a este método de produção. A revisão destes fatores é realizada em Singh & Khanna *et al.* 2021

#### **2.1.3.1.1. Taxa de alimentação do fio**

A taxa de alimentação do fio e a altura do cordão são variáveis, aproximadamente, lineares, o que resulta, portanto, num cordão alto e estreito, resultante de uma elevada taxa de alimentação. Além do mais, a rugosidade e o derretimento através da profundidade revelaram-se independentes da mesma.

#### **2.1.3.1.2. Velocidade de deslocamento**

Ao aumentar a velocidade de deslocamento, a largura do cordão, o ângulo de molhagem e o derretimento através da profundidade diminui, enquanto que nenhuma mudança significativa é observada na altura do cordão. Pensa-se que o derretimento através da profundidade diminui, devido ao aumento da velocidade de deslocamento que leva a um efeito diminuto do *input* de calor. Simultaneamente, verifica-se um ligeiro aumento na rugosidade do cordão com o aumento da velocidade de deslocamento.

#### **2.1.3.1.3. Corrente do arco**

O efeito mais significativo do aumento da corrente está na rugosidade do cordão, já que diminui com o aumento do valor da corrente. No que diz respeito a outros fatores como largura do cordão, ângulo de contacto e derretimento através da profundidade aumentam à medida que a corrente do arco amplexa, sendo que não há qualquer relação entre a altura do cordão e a intensidade da corrente.

#### **2.1.3.1.4. Fluxo de argon**

Este parâmetro não é considerado um dos parâmetros críticos, já que não afeta nenhuma das características descritas nas secções anteriores. Apesar disso, é necessário manter o fluxo de argon para controlar a oxidação da superfície depositada.

#### **2.1.3.1.5. Estratégia de impressão**

Ao investigar as duas formas de impressão, depositando as camadas na mesma direção ou em direções alternadas foi observado que quando todas as camadas são depositadas na mesma direção, são formados um ponto baixo e um ponto mais alto, no início e no final do cordão de soldadura.

Este efeito é reduzido adotando a estratégia de deposição das camadas em orientações alternadas.

#### **2.1.3.1.6. Energia fornecida ao eletrodo**

Como é sabido, a quantidade excessiva de energia sob a forma de calor durante a deposição leva à fusão de camadas previamente depositadas, o que pode resultar numa deterioração da microestrutura e da geometria do cordão e, adicionalmente, numa alteração das propriedades mecânicas. Dito isto, é vantajoso diminuir a quantidade de calor à medida que depositamos as camadas umas sobre as outras, de forma a evitar excesso de calor. Por outro lado, uma quantidade de calor abaixo do recomendado resulta numa deposição irregular, mais respingos e em camadas não fundidas, enquanto que um *input* acima do desejado origina a queima do material e, em casos mais extremos, a penetração do substrato. Deste modo e de forma a proceder-se a uma impressão correta, é recomendado haver uma redução consecutiva do *input* de calor de 5%, 10% ou 20% entre cada camada, sendo que este procedimento pode ser obtido mantendo a corrente constante e aumentando a velocidade de deslocamento em cada camada depositada.

#### **2.1.3.1.7. Pré-aquecimento**

Na interface cordão-substrato, forma-se um grande gradiente de temperatura, que resulta numa estrutura de grão colunar no cordão de soldadura, sendo que este fenómeno ocorre quando o substrato não é pré-aquecido, já que a diferença de temperatura na interface arrefece o metal fundido antes da distribuição uniforme de carbonetos ocorrer. Concluindo, o pré-aquecimento do substrato garante uma diminuição significativa do gradiente de temperatura e a formação de grãos finos, o que resulta em melhores propriedades mecânicas.

### **2.1.3.2. WAAM em aço ao carbono**

Nagasai *et al.*, 2021 estudaram um componente cilíndrico de aço de baixo teor de carbono (ER70S-6) que foi previamente fabricado por WAAM, usando o método GMAW.

Neste trabalho, as propriedades mecânicas estudadas foram a resistência à tração, resistência ao impacto e dureza, sendo que a maior descoberta foi o facto de o material apresentar características anisotrópicas.

Relativamente ao ensaio que é, também, objeto de estudo nesta dissertação – resistência ao impacto - foi possível verificar que os valores decrescem dos provetes da região inferior para os da região superior, sendo que a principal razão para este acontecimento se prende com o facto da ductilidade ser diferente nas duas regiões, devido à diferença de microestruturas.

### **2.1.3.3. Efeito do processo de soldadura nas propriedades mecânicas**

Nagasai *et al.*, 2022 comparam o efeito do *input* de calor nas propriedades mecânicas de componentes cilíndricos de aço carbono fabricados pelos processos Gas Metal Arc Welding (GMAW) e Cold Metal Transferred Arc Welding (CMTAW). Os parâmetros em que foi testado o efeito do *input* de calor foi no tamanho de grão, nas propriedades de tração, na resistência ao impacto e na dureza dos componentes cilíndricos. O componente cilíndrico feito pelo processo CMTAW apresentou propriedades de tração superiores e maior tenacidade ao impacto do que o componente GMAW. Da mesma forma, o componente CMTAW apresentou maior dureza do que o componente cilíndrico GMAW. As alterações nas propriedades mecânicas deveram-se principalmente às variações nas características microestruturais e diferentes tamanhos de grãos.

Mais uma vez, e relativamente aos ensaios de impacto, estes autores concluíram que as amostras retiradas da região inferior do componente fabricado por GMAW apresentaram maior resistência ao impacto do que as retiradas da região superior, o que não se verificou no componente produzido por CMTAW, no qual se observou o contrário. Já numa ótica de comparação entre processos, verificaram que o componente fabricado por CMTAW apresentou uma resistência ao impacto mais elevada, quando comparada com o componente GMAW, independente das regiões (inferior e superior) analisadas.

## 2.2. Ensaio Charpy

Na base do procedimento experimental desta dissertação está o Ensaio Charpy, sendo, por isso, de especial relevância perceber em que consiste este ensaio. De uma forma geral, segundo Saba *et al.*, 2019 este procedimento consiste num teste de impacto, com vista a determinar a resiliência de um material de forma rápida e económica. Na prática, mede-se a energia absorvida por uma amostra entalhada, sendo, geralmente, o entalhe em V de um dos lados, durante a fratura por meio da ação de um martelo de impacto do lado contrário ao do entalhe.

Em termos de aplicações práticas do Ensaio Charpy, este é bastante utilizado como teste de controlo de qualidade, para determinar a sensibilidade ao entalhe e a resistência ao impacto dos materiais de engenharia como metais, compósitos, cerâmicos e polímeros. Por fim e em relação à resiliência, esta é afetada por vários fatores, tais como a temperatura, a taxa de deformação (por impacto ou pressurização) e fatores de concentração de tensão, como entalhes e fendas.

## 2.3. Fratura

No âmbito da realização deste trabalho, em que é estudada a resistência ao impacto, torna-se premente tecer algumas considerações sobre este modo de falha.

Relativamente à fratura, existem dois sub modos de falha, que consistem em fratura frágil e fratura dúctil.

No que concerne à fratura frágil, esta é própria de metais que apresentam uma quantidade relativamente pequena de deformação plástica, em que as fendas se propagam rapidamente. Este tipo de fratura resulta da clivagem (divisão ao longo de planos definidos), e é caracterizada por ocorrer em pouco tempo e pode ocorrer (com falhas) em níveis de tensão mais baixos do que uma fratura dúctil.

Por outro lado, metais que suportam uma grande deformação apresentam fratura dúctil, que ocorre ao longo de um período de tempo mais longo que a fratura frágil, o que acaba por ser uma vantagem da primeira relativamente à segunda.

É importante referir que um metal não se enquadra num dos dois tipos de fratura e permanece no mesmo, independentemente das condições. Muitos metais que são dúcteis sob algumas condições tornam-se frágeis, se as condições forem alteradas. Um dos maiores

exemplos de uma alteração de condições com influência no modo de fratura é a variação de temperatura, já que muitos aços apresentam fratura dúctil a temperaturas elevadas e fratura frágil a baixas temperaturas. De uma forma teórica, a temperatura acima da qual um material é dúctil e abaixo da qual é frágil é conhecida como temperatura de Transição Nil-Ductilidade (NDT). Esta temperatura não é precisa, mas varia de acordo com o tratamento mecânico e térmico prévio, bem como a natureza e quantidade de elementos de impureza.

Na Figura 2.1 e 2.2 são apresentados os dois tipos de fratura existentes e um gráfico tipo de tensão-deformação correspondente a cada tipo de fratura, respetivamente.

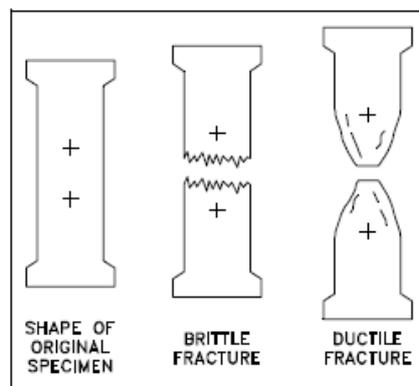


Figura 2.1. Tipos de fratura (US DOE. (2016))

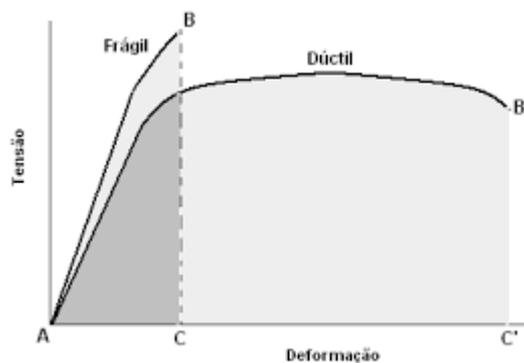


Figura 2.2. Gráfico Tensão-Deformação de materiais frágeis e dúcteis (Fredel *et al.* (2013)).

### 2.3.1. Propagação de fendas em aços de baixo carbono fabricados por WAAM

Tal como já foi referido em secções anteriores, a técnica WAAM tem a capacidade de melhorar o *design* e a eficiência do material para componentes estruturais. Devido ao derretimento repetido e periódico, e à solidificação e reaquecimento das camadas, o WAAM

---

origina deformações elásticas, plásticas ou viscosas, que podem afetar a degradação do material e o comportamento de propagação de fendas em componentes fabricados. Assim, é fundamental caracterizar o comportamento de fissuração de materiais fabricados por WAAM. Ermakova *et al.*, 2021, realizaram um conjunto de ensaios de propagação de fendas por fadiga em amostras de componentes fabricados em aço ao carbono ER70S-6 por WAAM.

Como conclusões mais relevantes, destacaram:

- O local de extração da amostra em relação à placa WAAM não tem nenhum efeito importante sobre o comportamento das amostras, no que diz respeito ao crescimento de fendas por fadiga;
- Dependendo do nível de carga aplicado, a orientação do seccionamento das amostras pode ter influência nos resultados do teste;
- A menor taxa de crescimento de fendas por fadiga foi observada em amostras horizontais testadas com o menor carregamento, enquanto a mais alta registou-se em amostras horizontais com carregamento mais elevado;
- Comparando os dados do crescimento de fendas por fadiga no aço ER70S-6 fabricado por WAAM, com os do aço HAZ S355, foi possível observar que a taxa de crescimento de fendas é maior no aço produzido por WAAM;
- A análise das superfícies de fratura mostrou que o mecanismo de deformação microestrutural depende significativamente da orientação da amostra, e foi possível concluir que ocorre fratura frágil nas amostras verticais e dúctil nas horizontais;
- As amostras verticais são mais sensíveis à falta de homogeneidade do material e também aos efeitos de plasticidade em níveis de carga mais altos, o que pode causar regiões de fratura dúctil onduladas, e tendências reduzidas para existência de crescimento de fendas por fadiga.

## 2.4. Corrosão atmosférica em aços

A corrosão atmosférica pode afetar seriamente o desempenho de estruturas de aço, ao longo do tempo. Desta forma, é importante estudar os mecanismos de corrosão existentes, bem como comparar a eficácia das classes de corrosividade baixa (nível C2), média (nível C3) e alta (nível C4) de acordo com a norma ISO 12944-2. Além disso, o estudo da influência

da perda por corrosão, durante a vida útil de uma estrutura, torna-se, também, bastante relevante. di Sarno *et al.*, 2021, mostraram que a corrosão pode afetar consideravelmente as características dinâmicas da estrutura. Por exemplo, e debruçando sobre o meio de corrosão mais agressivo, o período de vibração aumentou 15% para a classe C4 e vida útil cerca de 100 anos.

Também Sunil Kumar *et al.*, 2018, referem, dentro deste tema, que a concentração de cloreto, mais frequente em ambiente marinho, é uma das principais causas da deterioração de materiais estruturais como o aço, sendo que o efeito da corrosão em materiais estruturais, durante a sua vida útil, pode levar à falha mecânica.

A corrosão superficial tem, por isso, uma grande influência no envelhecimento de materiais de alta resistência que leva à degradação das propriedades mecânicas.

Neste artigo foi feita a identificação de alguns métodos convencionais e de outros mais recentes, de forma a estudar a corrosão e os seus efeitos. Como conclusões mais relevantes destacam-se:

- Os fatores que influenciam a corrosão são temperatura, pH, tempo, chuva, nevoeiro, nutrientes microbiológicos como nitrogénio inorgânico dissolvido, salinidade e humidade;
- Os cloretos na região do litoral aumentam a condutividade do filme eletrolítico sobre os metais, que é causa do aumento da taxa de corrosão que leva à corrosão induzida por cloreto, uma das principais causas da deterioração de materiais estruturais como o aço;
- Relativamente ao teste de névoa salina, provou-se que a corrosão afeta fortemente as propriedades dos materiais estruturais, já que há uma tendência crescente de diminuição da massa, tensão limite de escoamento, tensão de rotura e alongamento na rotura, com aumento do tempo de exposição. Para além disto, há, também, uma redução gradual na capacidade de carga e na ductilidade do material;
- No que diz respeito à corrosão sob tensão (SCC), comprovou-se que os aços estruturais têm alta suscetibilidade para SCC em ambiente marinho e os materiais apresentaram fratura frágil, quando sujeitos ao crescimento prematuro de fendas. Além disso, a resistência à fratura dos corpos de prova corroídos diminui drasticamente, devido ao *pitting*, que é um fator chave para o crescimento precoce de fendas.

---

## 2.5. Degradação em orlas costeiras

Como será explicado mais à frente nesta dissertação, o procedimento experimental será realizado, de forma a simular uma situação de corrosão de um material de construção numa orla costeira. Desta forma, torna-se importante perceber o que já foi investigado sobre este tema.

Natesan *et al.*, 2008, estudaram a corrosão atmosférica de maneira a avaliar os efeitos degradantes dos poluentes atmosféricos em alguns dos materiais mais utilizados em engenharia, como é o caso dos metais e ligas ferrosas e ligas não ferrosas. Alguns dos materiais estudados foram materiais de engenharia comuns, tais como aço macio, ferro galvanizado, nomeadamente ligas de Zn, Al, Cu e Cu-Zn (Cu-27Zn, Cu-30Zn e Cu-37Zn), sendo que o método utilizado para determinar a corrosão foi a quantificação da perda de massa. A mesma mostrou forte corrosão do aço-carbono, ferro galvanizado, Cu e Zn e menor efeito nas ligas de Al e Cu-Zn. Ao nível do procedimento experimental, realizaram a exposição atmosférica a 45° voltada para o litoral das amostras polidas, desengorduradas e feita a avaliação da massa antes da exposição com dimensões de  $100 \times 150 \text{ mm}^2$ , tendo sido feita uma análise a 1, 3, 6, 9 e 12 meses. De seguida, foram limpos, secos e a massa avaliada novamente. Como já foi referido, a perda por corrosão foi calculada através da perda de massa das amostras, tendo o valor final de corrosão correspondido à média das três amostras, para cada período de exposição.

As conclusões mais importantes que foram retiradas neste artigo foram o facto do aço macio, o ferro galvanizado e as ligas de alumínio e Cu-Zn, após exposições de 1, 3, 6, 9 e 12 meses mostrarem uma dependência linear de perda de massa, enquanto as ligas Cu e Zn exibiram uma dependência parabólica de perda de massa com o tempo de exposição.

## 2.6. SEM

Tendo em conta que um dos objetivos desta dissertação passa por estudar, analisar e comparar as superfícies de fratura das amostras por microscopia eletrónica de varrimento, designada na nomenclatura anglo-saxónica por *scanning electron microscopy* (SEM), torna-se premente fazer uma contextualização dos seus princípios e modos de funcionamento.

Segundo (Smith & Oatley, 1955), e de uma forma geral, este equipamento funciona através da criação de um feixe de eletrões, focado num ponto muito pequeno da amostra,

que é passível de se mover ao longo da mesma. A corrente de elétrons é amplificada quando deixa a amostra, e é usada para ajustar o brilho de um tubo de raios catódicos cujo ponto se move sobre o ecrã, de acordo com o movimento do feixe de elétrons sobre a amostra.

No que diz respeito à formação do contraste, e conseqüente formação da imagem, este pode ser feito para depender da variação da emissão secundária sobre a superfície da amostra ou da topografia da mesma.

Neste tipo de análise, as ampliações da amostra podem ir de 20× a 30000×.

Adicionalmente e relativamente às funções de alguns componentes do equipamento, destacam-se os seguintes:

- A fonte de elétrons gera os mesmos no topo da coluna do microscópio;
- A placa do ânodo tem uma carga positiva, que atrai os elétrons para formar um feixe;
- A lente condensadora controla o tamanho do feixe e determina o número de elétrons no mesmo, sendo que o tamanho definirá a resolução da imagem. Adicionalmente, as aberturas também podem ser usadas para controlar o tamanho do feixe;
- As bobines desviam o feixe ao longo dos eixos  $x$  e  $y$ , para garantir que há um varrimento total da superfície da amostra;
- A lente objetiva é a última lente na sequência de lentes que criam o feixe de elétrons. Como é natural, quanto mais próxima a lente está da amostra, mais pequena é a área em que ela foca.

Simultaneamente, os elétrons não podem passar pelo vidro, o que faz com que as lentes SEM sejam eletromagnéticas, sendo que são compostas por uma bobina de fios dentro de pólos de metal. Ora, quando uma corrente passa por essas bobinas, elas geram um campo magnético, aos quais os elétrons são bastante sensíveis, o que permite que as lentes do microscópio os controlem.

### 3. METODOLOGIA

Finalizada a análise do estado de arte, nesta secção descreve-se o material utilizado, as condições de fabrico do mesmo e o procedimento experimental adotados neste estudo. Além disso, explica-se como é que os provetes foram seccionados, preparados e testados, e como se realizou a análise dos resultados. Como já foi mencionado anteriormente, o principal objetivo desta dissertação é estudar o efeito de ambientes hostis na resistência ao impacto de aço ao carbono produzido por WAAM.

#### 3.1. Provetes

Nesta subsecção será abordado o procedimento que levou à obtenção dos provetes que, posteriormente, serviram de amostra para realização dos ensaios.

##### 3.1.1. Fabrico das placas de aço ao carbono

No âmbito deste estudo, o material testado foi um aço ao carbono produzido por WAAM. As placas usadas foram produzidas aos pares com os mesmos parâmetros do processo mas, para cada par produzido, uma foi seccionada segundo a orientação vertical e outra segundo a direção horizontal.

As placas foram fabricadas usando um sistema de soldadura Fronius TPS400i e um robô IRB 4600 da ABB, sendo que o processo de deposição seguiu um padrão alternado onde o robô solda numa única linha reta, mantendo a tocha de soldagem num ângulo de 90 graus em relação ao substrato, deslocando-se do ponto A ao ponto B, sendo que na camada seguinte solda do ponto B ao ponto A, existindo uma paragem de 15 segundos entre camadas, para assegurar um tempo de arrefecimento adicional. Esta sequência foi repetida até à altura pretendida ser atingida.

O arame utilizado foi um AWS A5.18 ER 70S-6 de aço revestido por cobre macio com 1 mm de diâmetro, soldado com gás de proteção 98% Argon e 2% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

A soldadura foi realizada pelo método CMT (*Cold Metal Transfer*), com corrente de 113 A, tensão de 14,3 V e uma velocidade de alimentação de 4 m/min. Para obter placas com diferentes espessuras, a energia de soldadura foi ajustada através da velocidade de

deslocamento do robô, configurando 5 mm/s para a placa mais grossa (7 mm) e 20 mm/s para a placa mais fina (5 mm).

Dependendo da velocidade do robô, o incremento em altura de cada camada foi ajustado, para que a distância do *stickout* (espaço definido entre o final do bico de contato e a peça), não tivesse grande influência.

Na Figura 3.1 é apresentada uma fotografia da placa produzida por WAAM com as dimensões de 150 mm de comprimento e 70 mm de largura.



**Figura 3.1.** Exemplo de uma placa fabricada para este trabalho.

### **3.1.2. Preparação e geometria dos provetes**

De forma a realizar os ensaios pretendidos, foi necessário seccionar as placas, de modo a obter os provetes, de acordo com a norma ISO 148-1, sendo que nos subcapítulos seguintes é apresentado todo o processo de obtenção dos mesmos.

#### **3.1.2.1. Contabilização dos provetes**

Numa primeira fase, foi realizada uma contabilização do número de provetes necessários, para os vários ensaios a realizar. A Tabela 3.1 resume toda a contabilização efetuada, sendo que os casos estudados foram os seguintes:

- série de amostras de controlo, no estado “como imprimido”, designadas por “CS”;
- série de amostras imersas 30 dias em solução de NaCl ( $50\text{g/m}^3$ ) sem tensão, designada por “Solução NaCl - 30 Dias”;
- série de amostras imersas 30 dias em solução de NaCl ( $50\text{g/m}^3$ ) com tensão elétrica de 1.5 V, designada por “Solução NaCl-T - 30 Dias”;

- série de amostras imersas 30 dias em solução de HCl ( $50\text{g/m}^3$ ) sem tensão, designada por “Solução HCl - 30 Dias”;
- série de amostras imersas 30 dias em solução de HCl ( $50\text{g/m}^3$ ) com tensão elétrica de 1.5 V, designada por “Solução HCl-T - 30 Dias”.

A nomenclatura 1 e 2 corresponde às amostras provenientes das placas de maior (7 mm de espessura) e menor espessura (5 mm de espessura), respetivamente. Para além disto, foi retirado um provete de cada série, ao fim de 15 dias, para se

| <b>Tabela 3.1.</b> Contabilização dos provetes utilizados. |            |              |            |              |       |
|--|------------|--------------|------------|--------------|-------|
| Provetes   | Vertical 1 | Horizontal 1 | Vertical 2 | Horizontal 2 | Total |
| Amostra de Controlo - CS                                   | 5          | 4            | 4          | 4            | 17    |
| Solução NaCl - 30 Dias                                     | 4          | 4            | 4          | 4            | 16    |
| Solução NaCl-T - 30 Dias                                   | 4          | 4            | 4          | 4            | 16    |
| Solução HCl - 30 Dias                                      | 4          | 4            | 3          | 4            | 15    |
| Solução HCl-T - 30 Dias                                    | 4          | 4            | 4          | 4            | 16    |
| Total  | 21         | 20           | 19         | 20           | 80    |

### 3.1.2.2. Seccionamento das placas

De forma obter os provetes para a realização dos ensaios, foi necessário seccionar as placas, através de um serrote elétrico, apresentado na Figura 3.2, sendo que o entalhe em V foi realizado segundo a norma ISO 148-1, tendo este 2 mm de profundidade e  $45^\circ$ , através de uma fresadora, exposta na Figura 3.2. Por fim, a Figura 3.3 mostra o provete com as suas dimensões finais de  $55\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  (ainda sem o entalhe).



**Figura 3.2.** Serrote elétrico e fresa.



**Figura 3.3.** Provete utilizado nos ensaios experimentais.

### **3.1.3. Ensaio Charpy**

O ensaio de impacto Charpy em metais, com entalhe em forma de U e entalhe em forma de V, é descrito na norma ISO 148-1. Neste caso e como já foi referido noutra secção, o entalhe é em forma de V. É sabido que o tipo de martelo influencia, logicamente, os resultados finais, sendo que, para este estudo, o martelo utilizado foi o de 150 J.

Na Figura 3.4, 3.5 e 3.6 estão representados o equipamento utilizado, a dimensão do martelo na zona de impacto, bem como o suporte para a colocação dos provetes, respetivamente.



**Figura 3.4.** Equipamento para Ensaio Charpy.



**Figura 3.5.** Zona de impacto do martelo.



**Figura 3.6.** Suporte de colocação dos provetes.

### 3.2. Degradação dos provetes

Dado o objetivo desta dissertação e de forma a estudar o efeito de ambientes hostis na resistência ao impacto de aços ao carbono, torna-se premente a realização de degradação dos provetes. Numa primeira fase, foram usadas duas condições diferentes de imersão dos provetes. A primeira solução utilizada consiste numa solução de cloreto de sódio  $50\text{g}/\text{m}^3$ , sendo que segunda é também uma solução de cloreto de sódio  $50\text{g}/\text{m}^3$ , mas sujeita a uma tensão elétrica de  $1.5\text{ V}$ , de forma a acelerar e originar outro tipo de corrosão.

As soluções foram sujeitas a temperaturas ambiente de  $50^\circ\text{C}$ , apenas com o intuito de acelerar a degradação dos provetes, e não com o intuito de se estudar o efeito da temperatura na resistência ao impacto. Ambas as soluções apresentam, naturalmente, a mesma densidade e o mesmo pH que foi de 6.5. Os provetes alocados a cada solução foram apresentados na Secção 3.1.2.1.

Por outro lado, optou-se por testar mais condições de degradação, de forma a conseguir realizar um estudo mais rico em termos comparativos e, como tal, procedeu-se à imersão de provetes em duas soluções de ácido clorídrico ( $50\text{g}/\text{m}^3$ ), sendo que, à semelhança do caso da solução de cloreto de sódio, uma das soluções foi sujeita a uma tensão elétrica de  $1.5\text{ V}$ .

Na Figura 3.7, apresenta-se a câmara onde os provetes foram degradados.



**Figura 3.7.** Câmara de degradação.

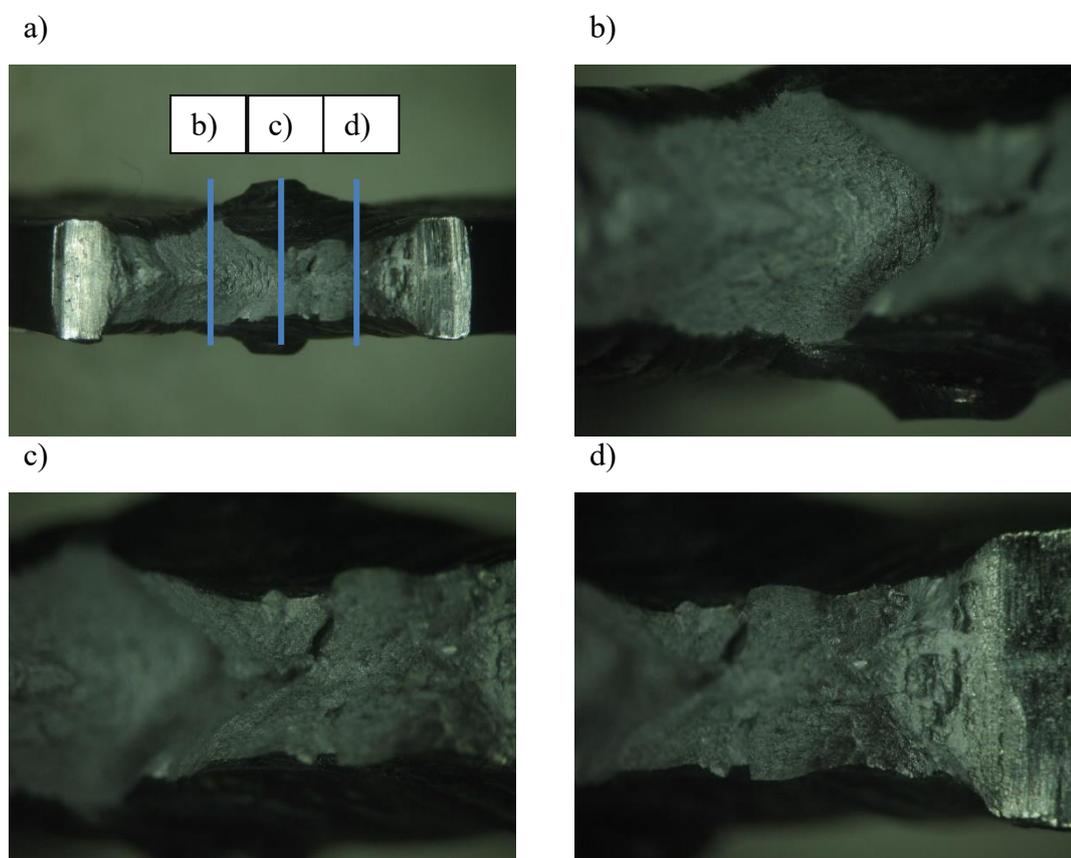
### 3.3. Lupa

Após a realização dos ensaios, e de maneira a poder estudar-se a forma como ocorre a rotura dos provetes, fez-se uma primeira avaliação visual da superfície, através do uso de um microscópio estereoscópio trinocular do fabricante Carl ZEISS, com o modelo Stemi 2000-C, sendo que este equipamento se encontra conectado a uma câmara fotográfica digital do fabricante CANON, com o modelo POWERSHOT G5, para a obtenção das imagens, e de um computador de secretária equipado com o programa do microscópio. Na Figura 3.7 é apresentada uma fotografia do equipamento utilizado para proceder à visualização da superfície de fratura.



**Figura 3.8.** Lupa.

Numa primeira fase da análise, procedeu-se ao registo fotográfico de quatro imagens por amostra, sendo que uma das fotografias mostra toda a superfície de fratura, a um nível macro, obtida com ampliação de  $6,5\times$ , ao passo que as outras três traduzem a zona de impacto do martelo no provete, com ampliações de  $16\times$ , mas divididas em três partes: lado esquerdo, centro e lado direito. A título de exemplo, a Figura 3.8 apresenta um conjunto de imagens ilustrativas das quatro fotografias tiradas a um provete – neste caso, o H2-CS, que, em conformidade com o referido neste capítulo 3, significa amostra de controlo, seccionada na horizontal de menor espessura. A Figura 3.9 (a) representa uma vista macro de toda a superfície de fratura, enquanto que as outras três imagens, Figura 3.9 (b), (c) e (d), representam um três partes diferentes do centro da superfície de fratura.



**Figura 3.9.** Imagens ilustrativas de quatro fotografias tiradas ao provete H2-CS.

### 3.4. SEM

De forma a tentar uniformizar o processo de análise das superfícies de fratura, observaram-se três zonas da mesma: zona do entalhe, zona intermédia e zona da pancada. Neste estudo, utilizou-se o SEM com uma voltagem de 10 kV e um spot de 50. Na Figura 3.10 estão representadas as diferentes ampliações usadas para analisar as superfícies de fratura (100×, 200×, 500×, 1000× e 3000×), na zona de transição do entalhe. Neste caso usou-se o provete V1-CS, que representa amostra de controlo, seccionada na vertical de maior espessura.

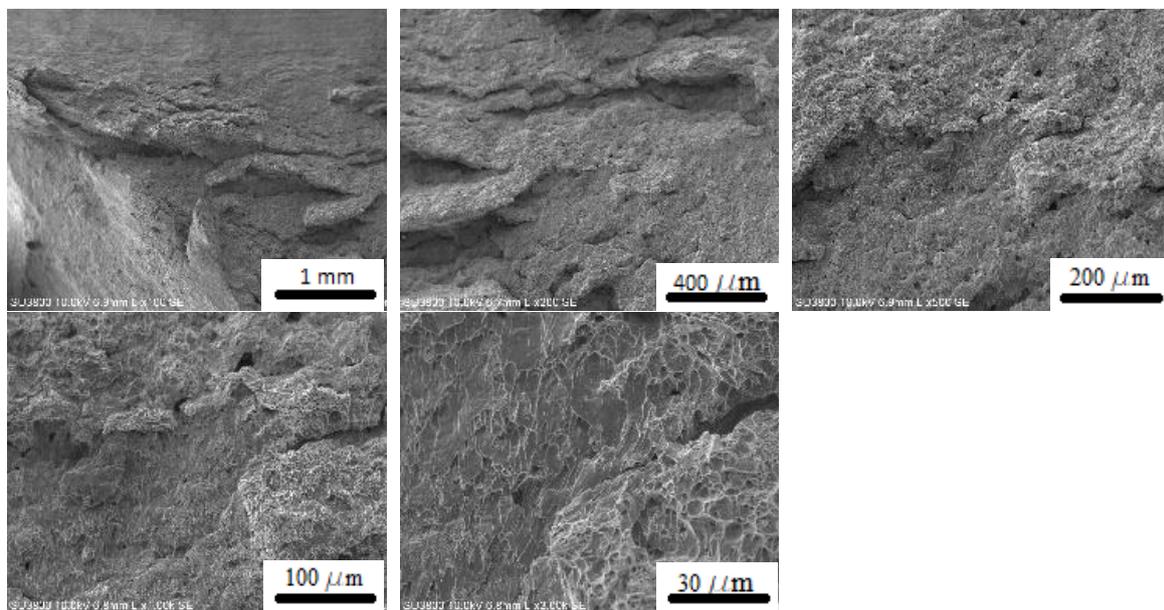


Figura 3.10. Imagens ilustrativas com cinco ampliações diferentes tiradas ao provete V1-CS.

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados, relativamente a todos os ensaios e análises de imagens previamente executados. Para tal, vão existir quatro subcapítulos, referentes às medições de massa, à energia absorvida, ao efeito dos ambientes hostis nos dois parâmetros anteriores e ainda uma análise comparativa de todas as condições e estudos efetuados.

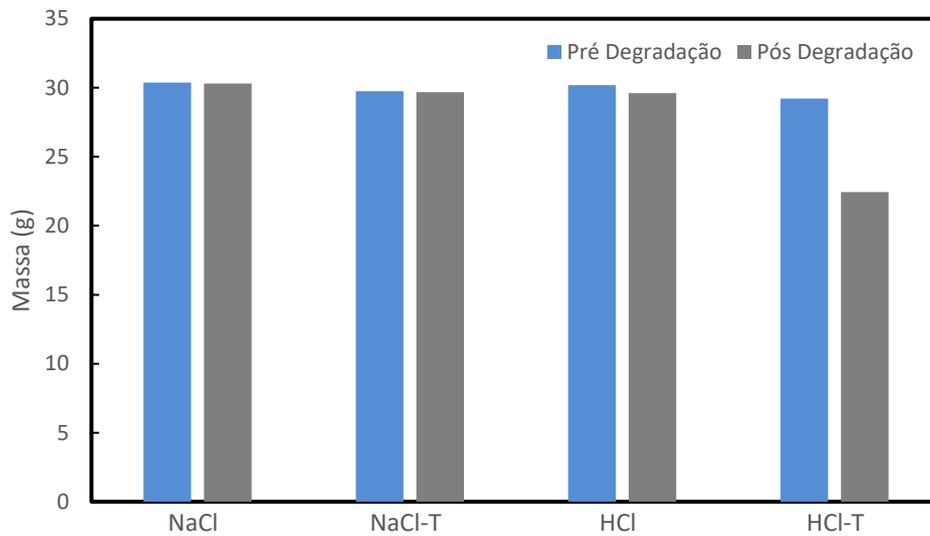
### 4.1. Massa

Neste subcapítulo realizar-se-á uma análise da influência das condições de degradação nos quatro tipos de amostras utilizadas nesta dissertação. Com este propósito, serão apresentados e discutidos quatro gráficos (um para cada tipo de amostra).

Através da observação da Figura 4.1 e analisando, numa primeira fase, a influência da solução de NaCl, nos provetes VI (seccionamento vertical em amostras de maior espessura), pode-se concluir que não existe uma grande alteração da massa da amostra. Paralelamente, e ainda no caso desta solução, é possível inferir que no caso da solução de degradação de NaCl com tensão, não se observa um efeito significativo no valor da massa, quando comparado com os provetes de controlo.

Por outro lado, quando as amostras foram expostas à solução de HCl, verificou-se uma diminuição da massa de 2% e de 23%, sem a consideração de tensão e com consideração de tensão, respetivamente, sendo que para a primeira situação de degradação não se pode considerar que tenha tido efeito, mas no caso da solução com tensão elétrica existe um decréscimo significativo.

Provavelmente, a razão para a diferença de efeito na diminuição entre as duas soluções prende-se com a diferença de pH entre ambas, dado que, se por um lado, a solução de NaCl apresenta um pH quase neutro de 6,5, a de HCl é bastante mais ácida, com um pH de 2. Sendo uma solução com um pH mais baixo, logo com maior acidez, era expectável que possa ser este o motivo para uma deterioração mais acentuada.



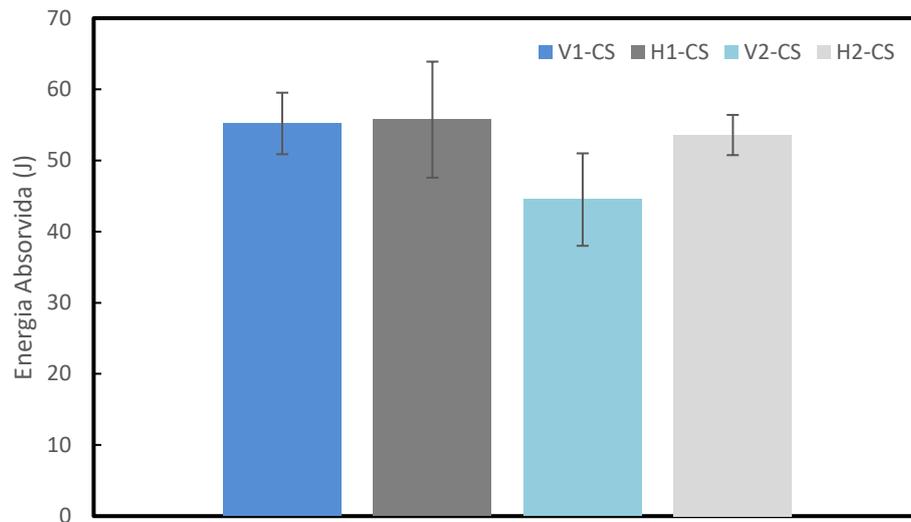
**Figura 4.1.** Gráfico comparativo dos valores da massa antes e depois da degradação das amostras V1.

De forma a evitar que a análise se torne demasiado repetitiva, e tendo em conta que as observações nos outros casos em análise são sensivelmente iguais, optou-se por apresentar os gráficos respetivos no Apêndice A.

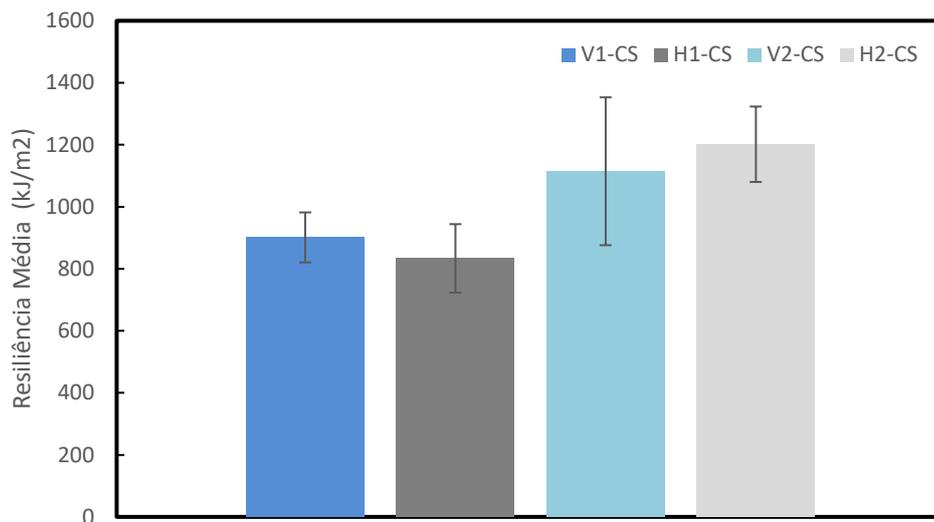
Nos restantes casos em análise verificou-se, à semelhança do caso da secção anterior, uma maior influência da solução de HCl na diminuição da massa, quando comparada com a solução de NaCl. Mais uma vez, a diminuição da massa foi mais acentuada quando a solução estava com uma tensão aplicada, o que comprova claramente que a existência de uma tensão resulta sempre numa maior degradação. Por fim, nas quatro situações em estudo, a maior diminuição verificou-se no caso da solução de HCl com tensão.

## 4.2. Amostras de Controlo

O primeiro caso a ser analisado, antes de qualquer outro, é o caso das amostras de controlo (CS), as quais não foram sujeitas a nenhuma degradação. Este caso tem especial importância, uma vez que servirá de termo de comparação para todos os outros casos estudados. Na Figura 4.2 e na Figura 4.3 são apresentados os resultados dos testes de impacto efetuados a cada tipo de amostra, sendo que o valor da resiliência, calculado através da divisão da energia absorvida pela área da secção, foi considerado a média dos resultados para cada condição.



**Figura 4.2.** Gráfico comparativo dos valores da energia absorvida das amostras de controlo.



**Figura 4.3.** Gráfico comparativo dos valores da resiliência das amostras de controlo.

#### 4.2.1. Efeito da orientação do seccionamento

Como é conhecido, a orientação do seccionamento de um provete tem alguma probabilidade de influenciar as propriedades mecânicas de um qualquer material. Sendo assim, torna-se bastante importante perceber como é que esta variável influencia a energia absorvida e a resistência ao impacto, nas condições de amostra de controlo e nas quatro condições de degradação previamente descritas. Primeiramente, e no âmbito desta secção, analisando o gráfico da Figura 4.2, podemos inferir que existe influência da orientação do

seccionamento nos provetes com menor espessura (2), já que existe uma diferença de 17% na energia absorvida.

Da análise da Figura 4.2. observa-se que no caso do seccionamento vertical, para os provetes de menor espessura (V2), a energia absorvida é inferior, quando comparada com as restantes três condições de teste. Também, para o caso dos provetes (2) se constata que a direção de seccionamento tem influência nos valores de energia absorvida, visto que os seccionados na horizontal apresentam maior energia absorvida, quando comparados com os verticais. Para os provetes de maior espessura não se registam diferenças assinaláveis.

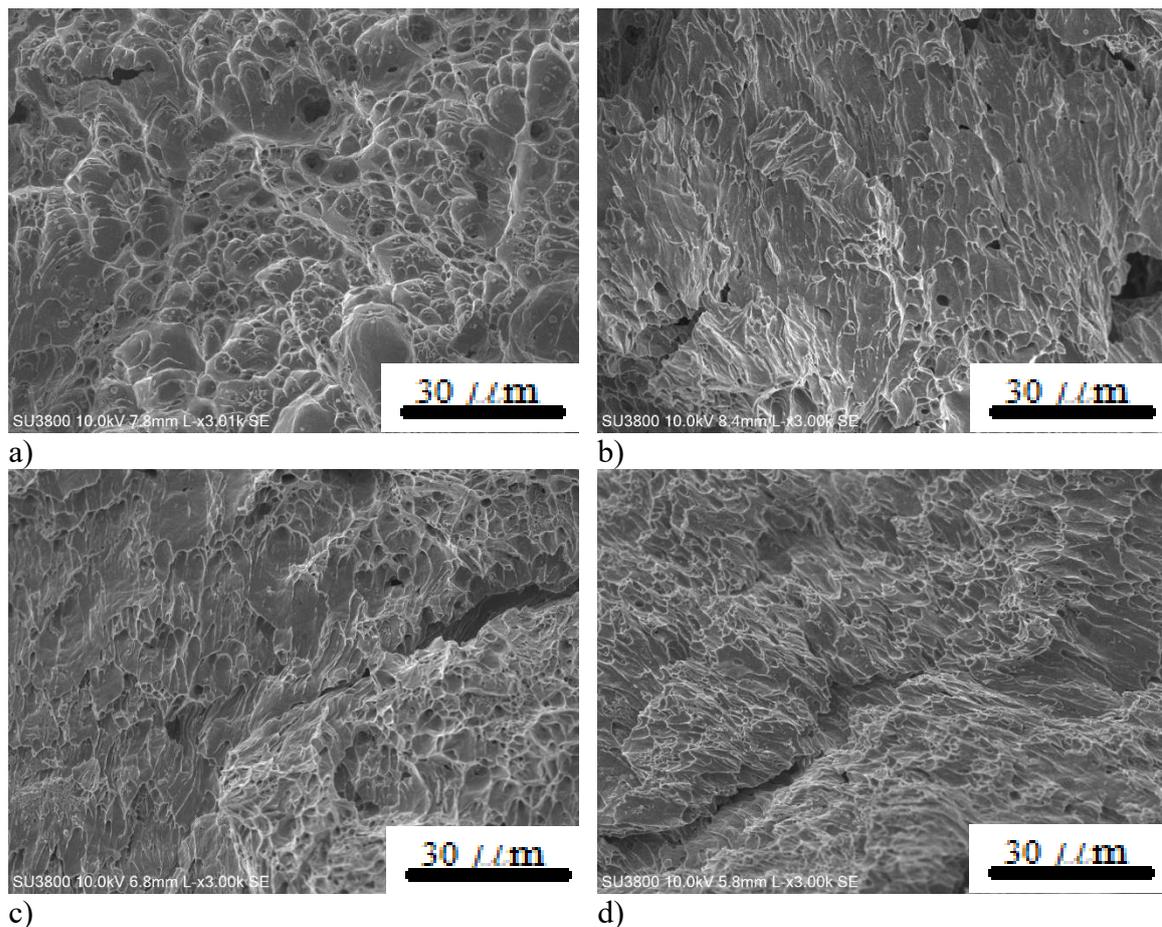
Por outro lado, quando analisado o gráfico da Figura 4.3, verifica-se que não existe uma influência direta na resiliência, uma vez que as diferenças entre os valores calculados são da ordem dos 7% e 8%, o que se insere dentro do desvio-padrão, nos casos dos provetes de maior (1) e menor (2) espessura, respetivamente.

#### **4.2.2. Efeito das condições de fabrico das placas**

No caso deste estudo, a diferença nas condições de fabrico prende-se com a espessura da placa, sendo que, como já foi referido na secção 3.1.1., as placas têm uma espessura de sensivelmente 7 e 5 mm, respetivamente. Pode-se observar nas Figuras 4.2 e 4.3 que os provetes de maior espessura absorvem mais energia do que os de menor espessura, sofrendo, portanto, um dano maior, sendo que isto só se verificou nos provetes verticais, com uma diferença de 24%. Relativamente à influência das condições de fabrico na resiliência, estas não possuem especial relevância para serem analisadas, uma vez que a espessura já é tida em conta no cálculo da resiliência.

#### **4.2.3. SEM**

Na Figura 4.4, estão representadas quatro imagens, uma de cada tipo de provete de controlo. Para o caso das amostras de controlo e de forma a poder comparar todas as situações, foi escolhido um local intermédio, entre a zona do entalhe e a zona do impacto, com uma ampliação de 3000×, por serem as imagens que, neste caso, forneciam a melhor informação para a análise que se queria realizar. É de notar que, relativamente à relação entre energia absorvida pelo provete e o dano resultante, uma maior energia absorvida traduzir-se-á num dano mais acentuado.



**Figura 4.4.** Visualização da superfície de fratura das quatro amostras de controlo: a) H1, b) H2, c) V1 e d) V2. Ampliação 3000×.

Numa primeira fase, comparando a amostra H1 com a H2, consegue-se visualizar que a primeira possui um dano maior, devido à existência de um maior número de crateras e de uma homogeneidade reduzida na superfície. Adicionalmente, apresenta, também, uma superfície mais rendilhada. Uma nota para o facto da amostra H2, apesar de apresentar menos cavidades, estas terem um tamanho maior. Tendo tudo isto em conta, e comparando com o resultado da energia absorvida, é possível afirmar que o dano observado está em conformidade com os valores de energia absorvida.

Confrontando, agora, os provetes de maior espessura, com orientações diferentes – H1 e V1 – é possível notar a existência de cavidades em ambas as imagens, sendo que as da superfície de H1 possuem um tamanho mais elevado. Por outro lado, ao nível da existência de fendas, o provete V1 apresenta um maior número de fendas secundárias. De uma forma geral, esta análise comparativa, comprova os resultados ao nível da energia absorvida, em que se obteve valores muito similares para ambas as amostras.

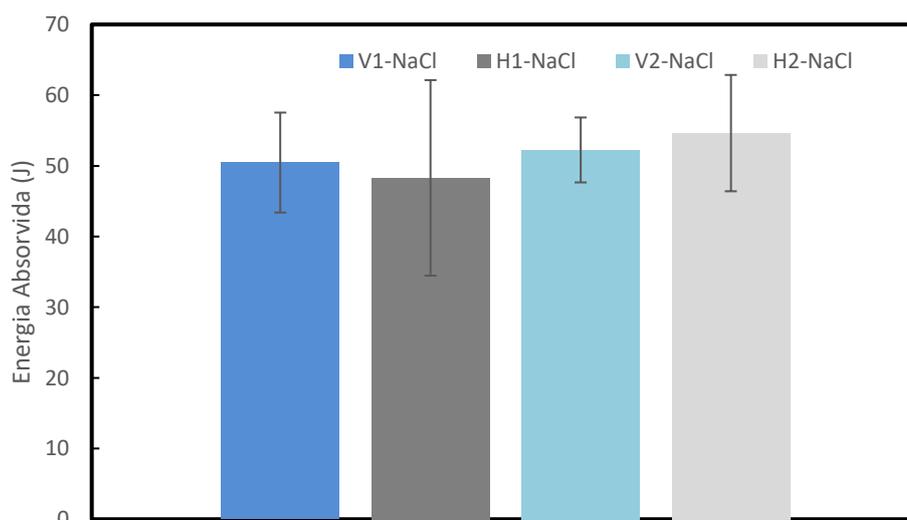
No que diz respeito às amostras seccionadas verticalmente, é visível um dano muito mais acentuado na amostra de maior espessura, o que é notório através da presença de fendas de dimensão considerável, de um grande número de cavidades e de uma pouca homogeneidade na superfície. Por outro lado, contrastando com a amostra já referida, V2 apresenta uma superfície bastante homogênea e sem cavidades. Relativamente à relação entre os valores de energia absorvida e as imagens obtidas, consegue-se afirmar que são concordantes.

Por fim, analisando as amostras com menor espessura – H2 e V2 – observa-se a presença de muitas cavidades em H2, contrariamente ao visualizado em V2, apresentando esta última uma superfície bastante mais homogênea, o que, naturalmente, se traduz num dano mais acentuado na amostra H2, tal como comprovam os resultados dos ensaios Charpy.

### 4.3. Efeito de ambientes hostis

#### 4.3.1. Cloreto de Sódio (NaCl)

O primeiro ambiente de degradação analisado foi o NaCl. Tal como já foi mencionado anteriormente nesta Dissertação, o objetivo deste estudo foi analisar o efeito das orlas costeiras na resistência ao impacto deste material. Na Figura 4.5 estão dispostos os resultados dos testes de impacto efetuados em cada tipo de provete, ao nível da energia absorvida.



**Figura 4.5.** Gráfico comparativo dos valores da energia absorvida das amostras degradadas em NaCl.

#### **4.3.1.1. Efeito da orientação do seccionamento**

Tal como referido na secção 4.1.1., a orientação do seccionamento de um provete pode traduzir-se numa alteração das propriedades mecânicas de um material. Dito isto, e analisando o gráfico da Figura 4.5, pode-se inferir que não existe influência prática da orientação do seccionamento nos provetes na energia absorvida, quer nos provetes com menor espessura, quer nos provetes de maior espessura, tendo em conta os valores médios de energia absorvida e os respetivos desvios-padrão, que não apresentam diferenças significativas.

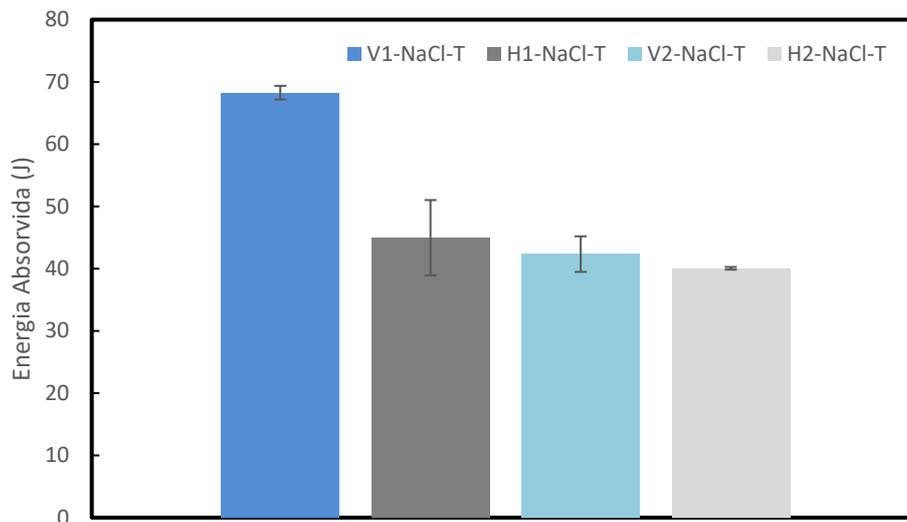
O elevado valor de desvio padrão pode ser justificado pelo facto de, após degradação, o entalhe feito antes dos provetes serem sujeitos aos ambientes hostis, ter ficado com dimensão diferente, ou seja, não apresentar a profundidade e a inclinação descrita na norma. Apesar de se ter visualizado nalguns provetes esta alteração a nível do entalhe, não seria conveniente retificá-lo, visto que estando os provetes degradados, a probabilidade de induzir fratura nos mesmos com a maquinagem era elevada.

#### **4.3.1.2. Efeito das condições de fabrico das placas**

No caso da degradação em NaCl, e ao nível da energia absorvida, não se verificou uma influência direta das condições de fabrico das placas neste parâmetro, como mostra a comparação dos resultados respeitantes aos provetes V1 e V2 e aos provetes H1 e H2. No entanto, em termos gerais, é possível aferir que os provetes de maior espessura apresentam um valor de energia absorvida inferior em relação aos de menor espessura, a que corresponderá um maior dano, como seria expectável. Quando comparados os provetes H1 com H2, observa-se um aumento no valor da energia absorvida de 13,1% para os provetes de menor espessura, a que corresponde um maior valor de dano para os H2. No caso dos provetes seccionados verticalmente esse aumento cifra-se nos 3,5%.

#### **4.3.2. Cloreto de Sódio (NaCl) com Tensão**

Nesta secção serão analisados os resultados da degradação dos provetes com NaCl com tensão, tendo a mesma sido usada para, à partida, acelerar a degradação do material, sendo que todos os valores obtidos estão evidenciados no gráfico da Figura 4.6.



**Figura 4.6.** Gráfico comparativo dos valores da energia absorvida das amostras degradadas em NaCl com tensão.

#### **4.3.2.1. Efeito da orientação do seccionamento**

Através da observação do gráfico da Figura 4.6, consegue-se deduzir que existe uma grande influência da tensão induzida na energia absorvida pelos provetes de maior espessura, uma vez que as amostras seccionadas verticalmente foram capazes de absorver mais 52% de energia, quando comparada com as amostras horizontais. Por outro lado, verifica-se, através dos valores médios e respetivos desvios-padrão, que não existe influência direta nos provetes de menor espessura. Não existe uma explicação lógica para este facto, pelo que se irá tentar perceber o porquê desta observação através dos resultados dos ensaios SEM.

#### **4.3.2.2. Efeito das condições de fabrico das placas**

Neste contexto, pode afirmar-se que há uma influência destas condições de degradação nos provetes verticais, dado que as amostras de maior espessura apresentam um valor médio de energia absorvida cerca de 60% superior às de menor espessura. No que concerne aos provetes horizontais, existe uma diferença de 10%, entre as amostras das duas espessuras, o que, quando conjugada com os desvios-padrão, resulta na não existência de influência direta.

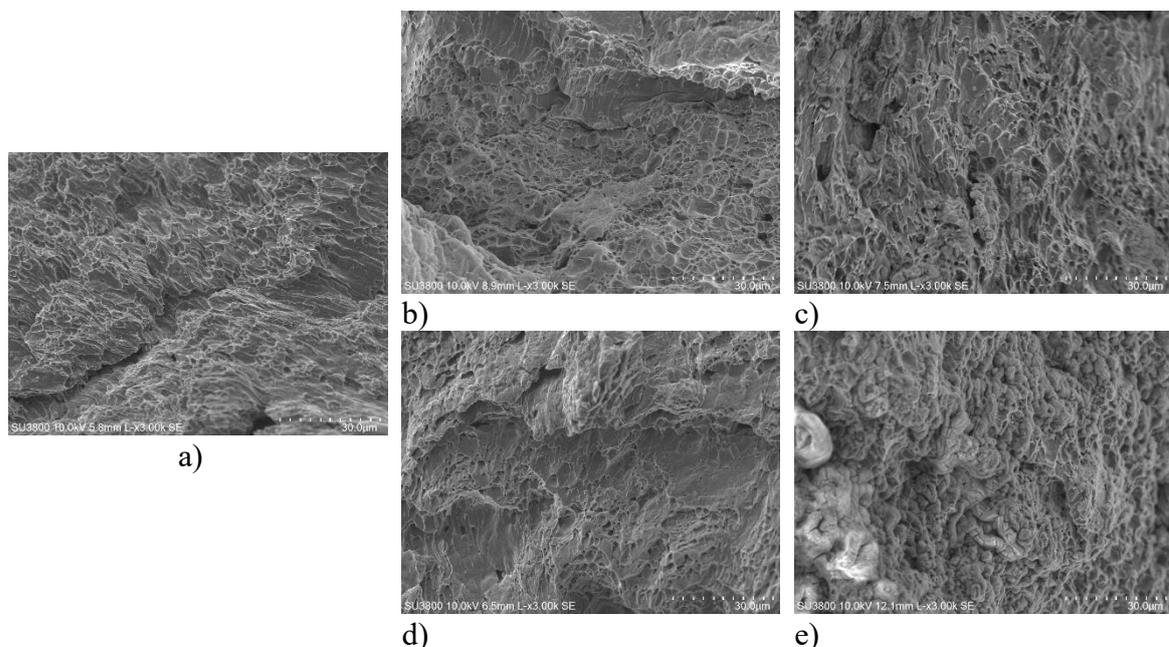
#### 4.3.2.1. SEM comparativo NaCl versus NaCl com tensão

Na figura 4.7, é realizada uma análise do efeito do NaCl nos mecanismos de fratura do material, através da comparação das imagens da superfície dos provetes V1, após uma degradação de 15 e 30 dias.

De referir que foram realizados ensaios de impacto para as 4 situações em análise após imersão em 15 dias. No entanto, como não se observou diferença em relação aos provetes de controlo, optou-se por não se apresentar os resultados para 15 dias. Mas, para se tentar perceber os resultados apresentados na figura 4.6 (degradação ao fim de 30 dias), tentou-se visualizar o que se passava ao fim de 15 dias, bem como a evolução do dano para as condições de teste em estudo.

Numa primeira fase, confrontando a imagem a) com a imagem b) da Figura 4.7, é possível denotar a existência de algumas cavidades dúcteis numa zona da superfície degradada com 15 dias de imersão sem tensão.

Torna-se, portanto, bastante interessante comparar a imagem b) com a d), ou seja, para aferir a influência da tensão numa degradação a 15 dias. Pela observação das figuras, chega-se à conclusão de que a presença de tensão no processo de degradação, resulta numa existência bastante acentuada de cavidades dúcteis, e numa heterogeneidade patente em grande parte da superfície de fratura.



**Figura 4.7.** Visualização da superfície de fratura das quatro amostras: a) V2-CS, b) V2-NaCl-15 dias, c) V2-NaCl-30 dias, d) V2-NaCl-T-15 dias e e) V2-NaCl-T-30 dias.

Naturalmente, a degradação a 15 dias sujeita a uma tensão de 1,5 V traduzir-se-á na existência, ainda mais acentuada, de cavidades e numa heterogeneidade patente em grande parte da superfície de fratura, quando comparada com a amostra de controlo.

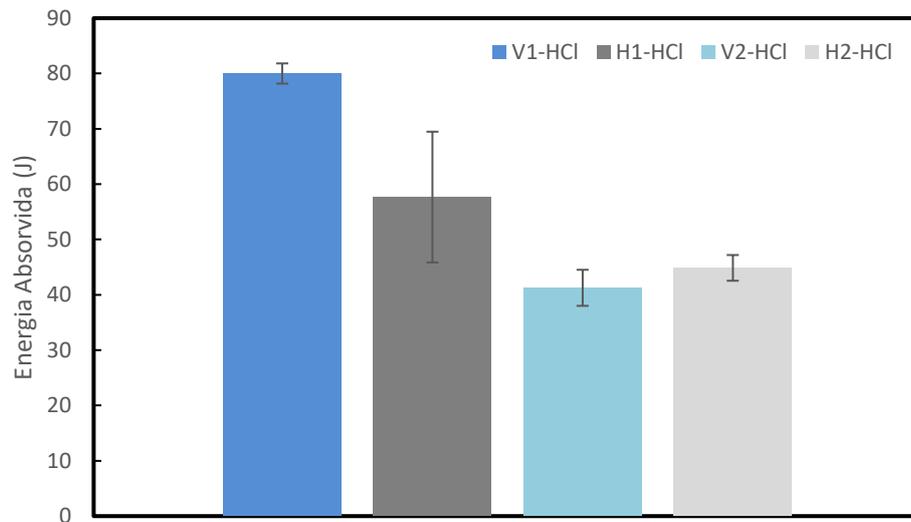
Quando analisado o caso da degradação temporal mais acentuada realizada nesta dissertação, comparando as imagens c) e e), percebe-se que, no caso da primeira (4.7 (c)), ocorre fratura dúctil, também com alguns planos de clivagem, resultando numa superfície algo rendilhada com bastantes cavidades, tal como é possível visualizar na imagem. No que diz respeito à segunda imagem, existe claramente uma superfície com um número bastante acentuado de cavidades e alteração clara da morfologia da superfície, bem como evidência de deformação plástica acentuada. Para além disto, existem inclusões, visíveis nas zonas mais brancas da imagem. Esta alteração da coloração na imagem, pode significar que houve alteração química dos elementos que constituem o material, deixando de, nessas zonas em concreto, ser aço ao carbono. Estas alterações podem ser justificadas pelas reações químicas que ocorrem entre o material e os ambientes hostis.

Por fim, e comparando a sequência de imagens a), b) e c) e a), d) e e), correspondentes a diferentes tempos de degradação, prova-se o que já era expectável e que se traduz numa maior deformação e num estado de superfície mais deteriorado com o aumento do tempo de degradação em ambos os casos.

Como forma de justificação de resultados, Dwi Rachmawati *et al.*, 2020 relatam que existe um aumento de degradação da amostra de aço carbono com o aumento da corrente. Desta forma, consegue-se relacionar o estudo mencionado com o que se observou nesta dissertação, na medida em que foi possível observar uma degradação mais acentuada quando foi utilizada corrente elétrica na solução.

### **4.3.3. Ácido Clorídrico (HCl)**

Na presente secção, serão abordados os resultados da segunda solução utilizada para degradar as amostras – HCl. Esta solução foi escolhida, em virtude de, à semelhança da solução de NaCl, se poder traduzir os efeitos das orlas marítimas nestes materiais, através da análise dos seus resultados, sendo que os mesmos estão dispostos na Figura 4.8.



**Figura 4.8.** Gráfico comparativo dos valores da energia absorvida das amostras degradadas em HCl.

#### 4.3.3.1. Efeito da orientação do seccionamento

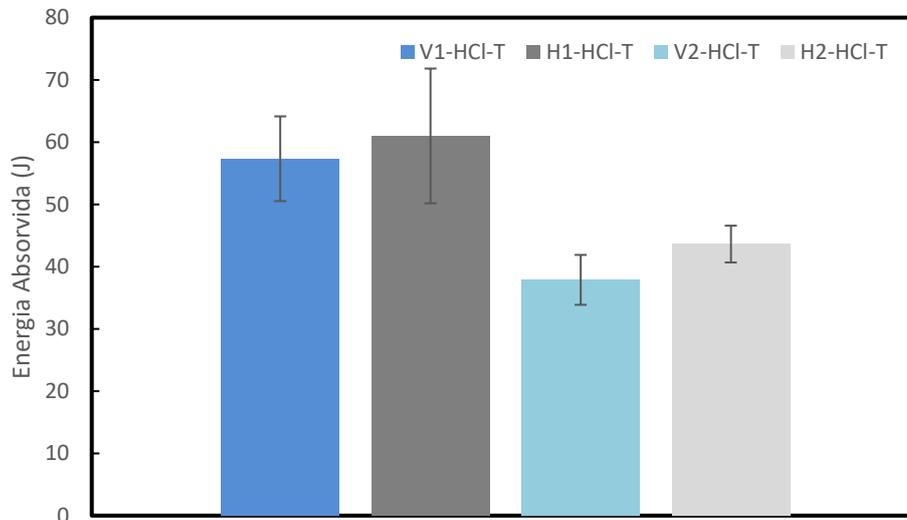
Analisando a Figura 4.8, identifica-se uma influência acentuada deste parâmetro nos provetes de maior espessura (1), na medida em que as amostras verticais apresentaram um valor médio de energia absorvida cerca de 40% superior às amostras horizontais. No caso dos provetes de menor espessura (2) não há uma influência efetiva, tendo em conta apenas os 8% de diferença na energia absorvida e os desvios-padrão de ambas orientações.

#### 4.3.3.2. Efeito das condições de fabrico das placas

Neste contexto, consegue-se referenciar a existência da maior influência verificada até aqui, tendo em conta que o valor da energia absorvida das amostras verticais de maior espessura é quase o dobro (94%) das de menor espessura com a mesma orientação, enquanto nas amostras horizontais, a influência é bastante menos acentuada, sendo na ordem dos 20%, com o maior valor a pertencer aos provetes de maior espessura. Esta diferença de 20% poderá não ser tão significativa, uma vez que o desvio-padrão das amostras H1 é bastante acentuado.

#### 4.3.4. Ácido Clorídrico (HCl) com Tensão

Mais uma vez e à semelhança do que foi descrito na secção 4.2.2, serão analisados os resultados da influência da indução de uma tensão na solução de HCl, com o objetivo de perceber se há alguma influência direta do uso da mesma no parâmetro da energia absorvida. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 4.9



**Figura 4.9.** Gráfico comparativo dos valores da energia absorvida das amostras degradadas em HCl com tensão.

#### **4.3.4.1. Efeito da orientação do seccionamento**

Observando o gráfico da Figura 4.9, é possível afirmar que não existe uma influência significativa da orientação dos provetes na energia absorvida no que diz respeito às amostras de maior espessura, tendo em conta os valores médios de energia absorvida e os respetivos desvios-padrão. É de notar, também, que foi o único caso em que, embora possa não ser totalmente significativo, o valor médio da energia absorvida das amostras horizontais com maior espessura foi maior que o das verticais. Quanto aos provetes de menor espessura, parece existir alguma influência, tendo em conta a diferença de 15%, com o maior valor a corresponder aos provetes horizontais.

#### **4.3.4.2. Efeito das condições de fabrico das placas**

No caso desta degradação, verificou-se uma grande influência das condições de manufatura das placas, já que se apurou uma diferença de cerca de 50% quer nas amostras verticais, quer nas horizontais, sempre com o maior valor a dizer respeito ao provete de maior espessura.

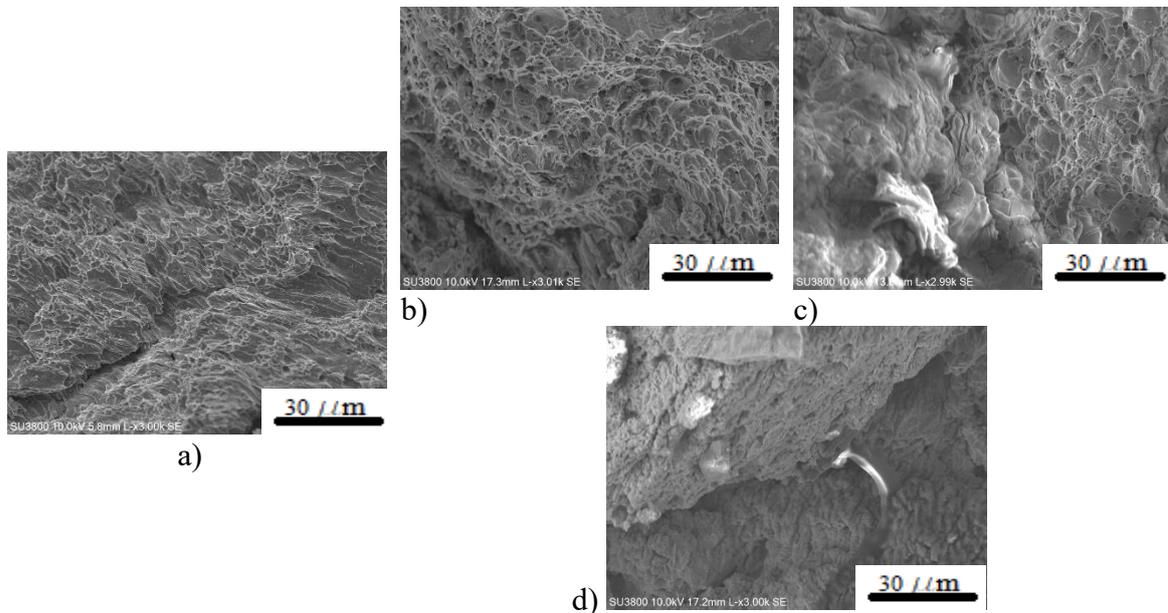
#### **4.3.4.3. SEM comparativo HCl versus HCl com Tensão**

Neste subcapítulo é realizada uma análise do efeito do HCl nos mecanismos de fratura do material, através da comparação das imagens, apresentadas na Figura 4.11, da superfície

de fratura dos provetes V2 após uma degradação de 15 e 30 dias, no caso da solução sem aplicação de uma tensão e de 10 dias no caso da solução com tensão. É de notar que a série de provetes HCl-T só esteve imersa durante 10 dias, devido ao facto de ter existido uma degradação muito acentuada, tal como é possível verificar na Figura 4.10.



**Figura 4.10.** Provetes degradados em HCl com tensão, ao fim de 10 dias de degradação.



**Figura 4.11.** Visualização da superfície de fratura das quatro amostras: a) V2-CS, b) V2-HCl-15 dias, c) V2-HCl-30 dias e d) V2-HCl-T-10 dias.

Primeiramente e comparando a imagem da figura 4.11 a) com a imagem b), observa-se o efeito acentuado da degradação em HCl na superfície de fratura, devido ao facto da mesma ser bastante rendilhada e existir cavidades de grandes dimensões. Para além disto, há também mecanismos de fratura frágil, visíveis nos planos de clivagem existentes. Sendo que o aço apresenta mecanismos de dano dúcteis, a presença de fratura frágil pode significar, tal como referido anteriormente, que houve reação química entre o aço e as soluções de degradação, deixando de, nessas secções da amostra ser aço.

Confrontando a imagem da figura 4.11 b) com a c), que variam no tempo de degradação, nota-se o efeito do mesmo, na medida em que a superfície da amostra da imagem c) apresenta um ataque químico bastante acentuado, traduzido por alteração morfológica evidente, com algumas cavidades, sendo que algumas possuem partículas no seu interior, o que denota um dano elevado.

Por fim, e comparando as imagens b) e c) com a d), da figura 4.11, de forma a estudar o efeito da aplicação de tensão elétrica, consegue-se verificar a influência da mesma, já que a amostra degradada com ácido e tensão apresenta uma alteração da morfologia, com uma superfície refinada e rendilhada com micro cavidades, sendo também visíveis áreas de cor branca, que mostram a existência de ataque químico e inclusões.

#### **4.4. Análise Comparativa**

Nesta secção pretende estudar-se, de uma forma sucinta, a influência conjunta da orientação do seccionamento, das condições de fabrico e da solução em que a amostra foi degradada através da análise das tabelas e das imagens das secções seguintes, sendo que apenas se referirão as observações que suscitem maior interesse e apresentem uma maior relevância.

#### 4.4.1. Análise dos resultados

Na Tabela 4.1 é apresentada a análise comparativa em relação à influência da orientação de seccionamento (vertical ou horizontal). Por outro lado, a tabela 4.2 resume a influência das condições de fabrico.

**Tabela 4.1.** Influência de orientação do seccionamento.

| Soluções                    | NaCl |   | NaCl-T |   | HCl |   | HCl-T |   |
|-----------------------------|------|---|--------|---|-----|---|-------|---|
|                             | 1    | 2 | 1      | 2 | 1   | 2 | 1     | 2 |
| Provetes                    |      |   |        |   |     |   |       |   |
| Orientação do seccionamento | ✗    | ✗ | ✓      | ✗ | ✓   | ✗ | ✗     | ✓ |

**Tabela 4.2.** Influência das condições de fabrico.

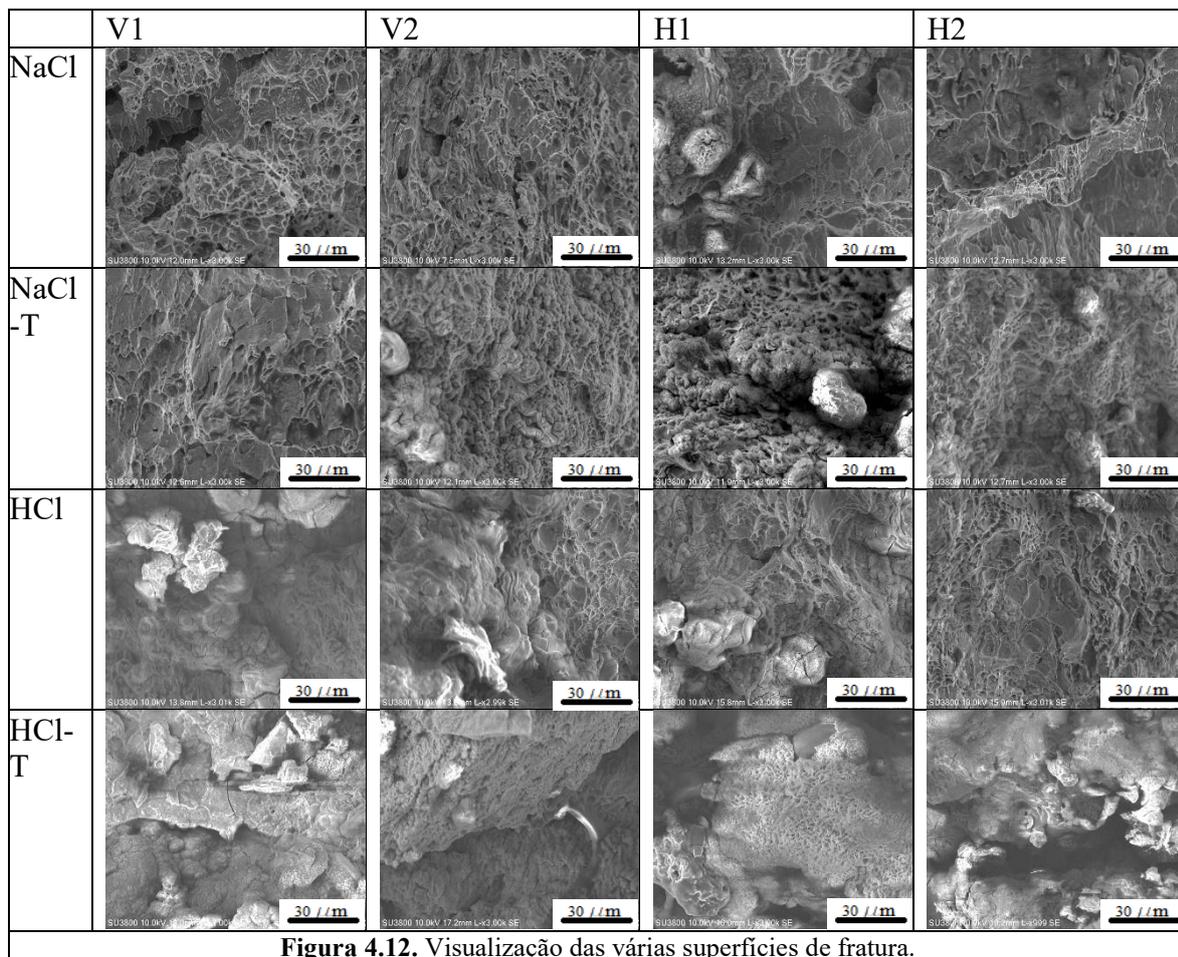
| Soluções             | NaCl |   | NaCl-T |   | HCl |   | HCl-T |   |
|----------------------|------|---|--------|---|-----|---|-------|---|
|                      | V    | H | V      | H | V   | H | V     | H |
| Provetes             |      |   |        |   |     |   |       |   |
| Condições de fabrico | ✗    | ✗ | ✓      | ✗ | ✓   | ✗ | ✓     | ✓ |

Em termos de resultados experimentais dos ensaios, e de acordo com os resultados patenteados nas Tabelas 4.1 e 4.2, verificou-se que:

- Não existiu nenhuma influência dos dois parâmetros em análise nos provetes degradados em NaCl;
- Existiu influência da orientação dos provetes de maior espessura imersos em NaCl com tensão e HCl, e nos de menor espessura imersos em HCl com tensão;
- Os provetes verticais sofreram influência das condições de fabrico, quando degradados em todas as soluções, à exceção de NaCl;
- Os provetes verticais apenas sofreram influência das condições de fabrico, quando degradados em HCl com tensão.

#### 4.4.2. Análise SEM

Tendo em conta estes resultados, que nem sempre corresponderam ao que seria expectável inicialmente, optou-se por fazer uma análise comparativa relativamente às imagens obtidas por SEM (Figura 4.12).



A primeira observação que pode ser feita e no que diz respeito à solução de degradação de NaCl e NaCl com tensão, é que a aplicação de tensão provoca maior degradação nas amostras. Pode-se observar a existência de inclusões (zonas mais brancas) que consistem na acumulação de eletrões, o que se traduz na falta de condutividade elétrica e que revela que a composição da amostra degradada já não é a mesma da amostra de controlo. De uma forma geral, as três amostras V2, H1 e H2 degradadas em NaCl-T da Figura 4.12 apresentam mais mecanismos de fratura dúcteis do que as amostras V2, H1 e H2 degradadas em NaCl. Especificando de uma forma mais detalhada e debruçando a análise, a título de exemplo, no provete H1-NaCl, nota-se, claramente, que há muitos mecanismos de fratura frágil,

visualizados através das superfícies lisas existentes próprias da clivagem do material. Para além disto, e de forma a corroborar o que foi dito anteriormente, há muito poucas cavidades dúcteis. Por outro lado, o provete H1-NaCl-T apresenta uma superfície com uma estrutura em rede muito bem definida, com inúmeras cavidades, o que é próprio de uma fratura mais dúctil.

No que concerne à orientação do provete, é clara a influência da mesma, tendo em conta que se nota um dano muito mais elevado nos provetes verticais da solução de NaCl, do que nos horizontais, visível na superfície mais irregular e nas cavidades dos primeiros, o que, tal como já foi referido em secções anteriores, se pode dever ao nível de porosidade ser diferente em ambas as amostras.

Debruçando agora a análise nas soluções de HCl, é notória a existência de ataque químico, como mostram as partes mais claras das imagens, e alteração da morfologia – aspeto que será explicado, em detalhe, na secção seguinte – sendo que a diferença principal entre soluções é que no caso da solução sem aplicação de tensão, o efeito do ataque químico é mais local, enquanto que na segunda solução, o mesmo é evidenciado de uma forma mais generalizada. Como seria de esperar, e à semelhança do que se verificou com a solução de NaCl, a aplicação de tensão elétrica resultou numa degradação mais acentuada, visível através da existência da alteração da morfologia, generalização do efeito do ataque químico, fendas secundárias e do aumento do número e tamanho das cavidades, sendo que as cavidades maiores resultaram da junção de um grande número de cavidades mais pequenas. Uma nota para os provetes H1-HCl-T que apresentaram cavidades com uma forma não circular, aproximando-se mais de uma configuração geométrica elíptica, o que não se observou nos restantes casos analisados.

Comparando todas as soluções, a primeira conclusão que se pode retirar é que existe uma diferença da tonalidade da cor das superfícies de fratura, que vai clareando à medida que se desce a observação das linhas da tabela, e também no número de manchas brancas concentradas. Este facto denota, claramente, que o HCl ataca quimicamente mais o material estudado do que o NaCl, o que seria expectável, visto ser uma solução de pH mais baixo, logo mais agressiva.

Por fim, e em termos de morfologia, há uma degradação bastante mais acentuada quando as amostras foram sujeitas ao contacto com as duas soluções de HCl, uma vez que

se pode facilmente observar um maior número de cavidades e uma maior alteração da superfície de fratura.

Como forma de justificação de resultados e embora o estudo seja referente a degradação em alumínio, Zuchry *et al.*, 2020, também chegaram à conclusão que, para o mesmo tempo de imersão, e para a mesma concentração da solução, existe uma degradação muito superior, visível através da perda de massa, quando se imergem as amostras na solução de HCl, quando comparada com a de NaCl, tal como é possível ver na Tabela 4.3. Desta forma, consegue-se relacionar a perda de massa com o nível de degradação e consequente com a energia absorvida.

**Tabela 4.3.** Perda de massa segundo duas degradações diferentes (Zuchry, 2019).

| Concentração HCl  | Perda de massa (g) |
|-------------------|--------------------|
|                   | 120 horas          |
| 0,10%             | 1131               |
| Concentração NaCl | Perda de massa (g) |
|                   | 120 horas          |
| 0,10%             | 173                |

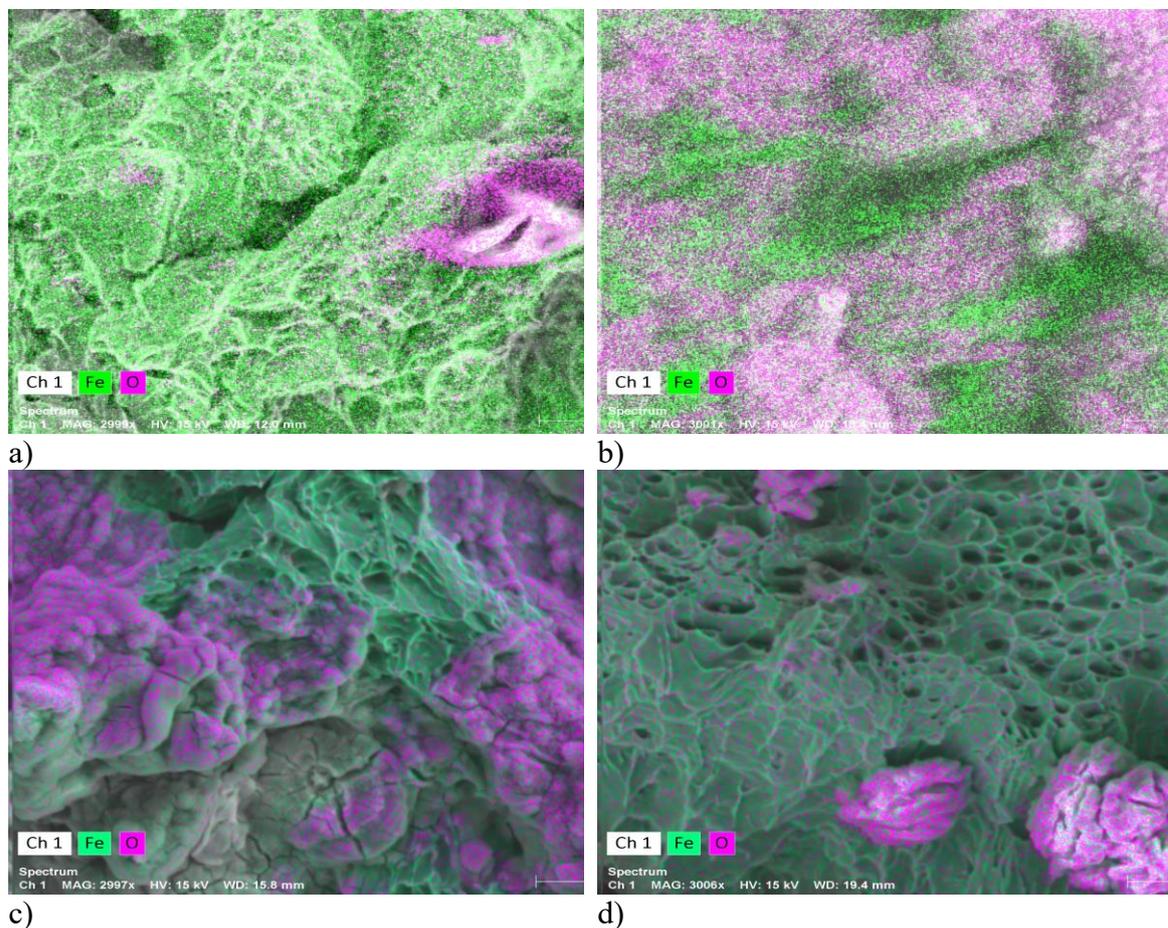
No que concerne à orientação da geometria, Zuñiga *et al.*, 2018, referem que existe uma influência deste parâmetro na resistência ao impacto, na medida em que os provetes que foram ensaiados na vertical apresentam valores superiores, quando comparados com os horizontais, o que se verifica neste estudo nos provetes de maior espessura. No entanto, nas amostras de menor espessura, verifica-se uma semelhança entre valores, não havendo, portanto, uma influência significativa da orientação do provete.

Na tentativa de justificar os resultados respeitantes à influência da espessura na resistência ao impacto, Graupner *et al.*, 2021, mencionaram o facto de, nos materiais mais frágeis, a resistência aumentar com o aumento da espessura da amostra, enquanto nos materiais mais dúcteis, não se verificar uma influência significativa da espessura. No entanto, de acordo com este estudo, e sendo o aço estudado um material dúctil, os resultados parecem indicar que existe uma influência do aumento da espessura no aumento da energia absorvida neste tipo de aço.

#### 4.4.3. Análise EDS

De forma a se ter uma noção exata do efeito das soluções químicas na microestrutura da superfície de fratura, optou-se por realizar uma análise por espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS) aos quatro tipos de provetes H2 degradados, sendo que os resultados estão dispostos na Figura 4.13.

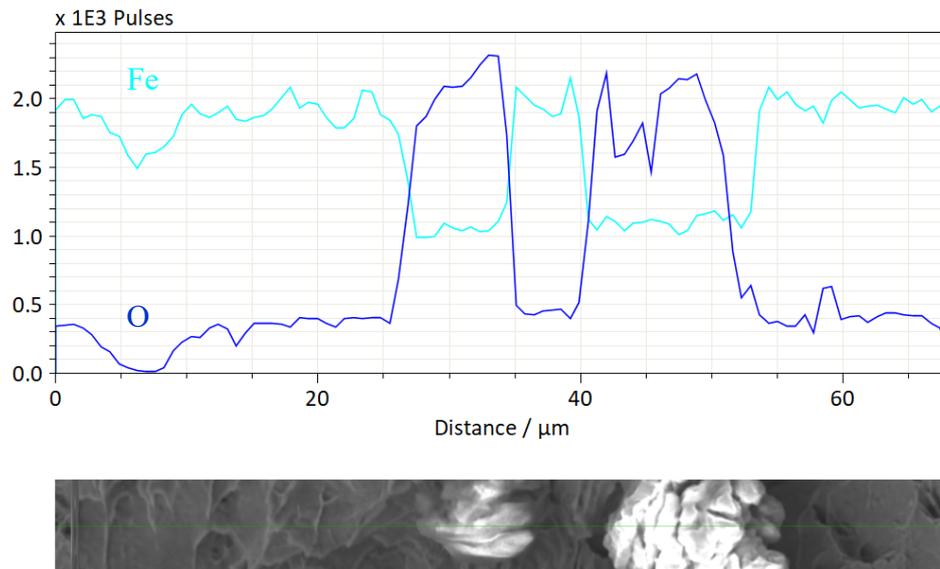
Através destas imagens, consegue-se inferir que existiu alteração da microestrutura, devido ao aparecimento de oxigénio na composição do material, provando, portanto, a formação de óxidos com a degradação. Dito isto, verifica-se, também, que as regiões mais claras, quase brancas, observadas atrás, são óxidos.



**Figura 4.13.** Visualização das imagens EDS dos quatro provetes H2 degradados: a) H2-NaCl, b) H2-NaCl-T, c) H2-HCl e d) H2-HCl-T.

Por fim, na Figura 4.14, apresenta-se uma análise de uma parte da superfície de fratura onde se avalia a quantidade de oxigénio, a azul-escuro, e que permite retirar conclusões idênticas às mencionadas atrás. Como se verifica, junto das zonas mais claras da

zona analisada, a presença de oxigénio aumenta de forma muito significativa, denotando a presença de óxidos.



**Figura 4.14.** Exemplo de gráfico EDS – provete H2-HCl-T

## 5. CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas todas as conclusões retiradas a partir da análise dos resultados. Para além disso, serão, também, apresentadas algumas propostas para futuros trabalhos, no âmbito desta dissertação.

Os provetes seccionados das placas de aço ao carbono, fabricadas por WAAM e sujeitos a ambientes hostis, através da imersão em soluções de NaCl e HCl, sujeitas, ou não a tensão elétrica, foram sujeitos a impacto, através de Ensaio Charpy, sendo os seus mecanismos de fratura analisados por SEM.

Com base no que foi acima referido, pode concluir-se:

- O HCl provoca uma degradação mais acentuada, através da perda de massa, do que o NaCl;
- O HCl provoca um dano mais acentuado que o NaCl;
- A aplicação de tensão elétrica, quer na solução de NaCl quer na solução de HCl, favorece a degradação do material, o que se traduz por um aumento na energia absorvida;
- O aumento do tempo de imersão na solução favorece o aumento da degradação;
- A solução de HCl promove, de uma forma mais acentuada, o aparecimento de inclusões e a alteração da microestrutura, através da formação de óxidos, quando comparada com a solução de NaCl.

De modo a dar seguimento ao estudo apresentado nesta dissertação, sugere-se algumas propostas para trabalhos futuros:

1. Realizar os mesmos ensaios em aço ao carbono fabricado de forma convencional;
2. Estudar tempos de degradação das amostras superiores e com outros níveis de concentração das soluções;
3. Realizar ensaios por queda de peso, de forma a reduzir a variabilidade de resultados associada aos ensaios Charpy;
4. Aumentar o número de repetições dos ensaios para cada condição de modo a aumentar a repetibilidade e reprodutibilidade dos resultados;
5. Maquinar os provetes, de forma a reduzir rugosidades.



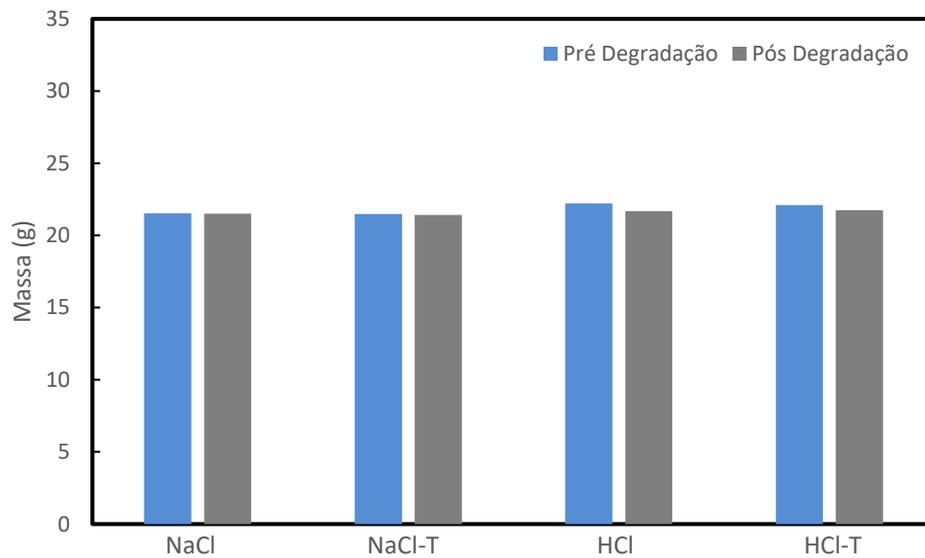
---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

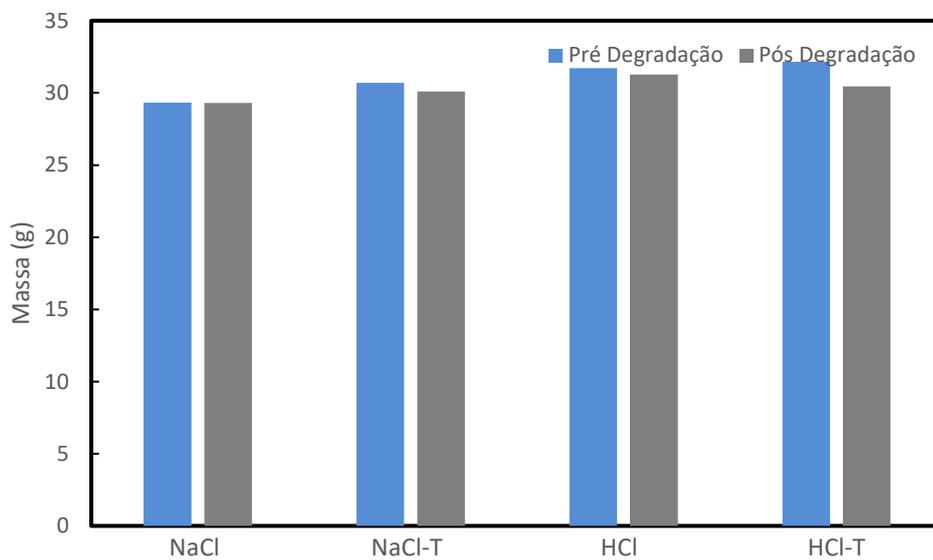
- di Sarno, L., Majidian, A., & Karagiannakis, G. (2021). The effect of atmospheric corrosion on steel structures: A state-of-the-art and case-study. In *Buildings* (Vol. 11, Issue 12). MDPI. <https://doi.org/10.3390/buildings11120571>
- Dwi Rachmawati, I., Nurdin, I., Widiatmoko, P., Devianto, H., Irmayanti, F., & Saptohadi, S. (2020). The Effect of Flow Rate and NaCl Concentration on the Corrosion Behavior of Carbon Steel in NaCl Solutions Containing H<sub>2</sub>S. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 778(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/778/1/012137>
- Ermakova, A., Mehmanparast, A., Ganguly, S., Razavi, J., & Berto, F. (2021). Fatigue crack growth behaviour of wire and arc additively manufactured ER70S-6 low carbon steel components. *International Journal of Fracture*. <https://doi.org/10.1007/s10704-021-00545-8>
- Fredel, Márcio C.; Ortega, Patrícia; Bastos, Edson. (2013). *Propriedades Mecânicas: Ensaio Fundamentais - Vol.1*. Santa Catarina: Cermat.
- Graupner, N., Kühn, N., & Müssig, J. (2021). Influence of sample thickness, curvature and notches on the Charpy impact strength - An approach to standardise the impact strength of curved test specimens and biological structures. *Polymer Testing*, 93. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106864>
- Müller, J., Hensel, J., & Dilger, K. (2022). Mechanical properties of wire and arc additively manufactured high-strength steel structures. *Welding in the World*, 66(3), 395–407. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01204-1>
- Nagasai, B. P., Malarvizhi, S., & Balasubramanian, V. (2021). Mechanical properties of wire arc additive manufactured carbon steel cylindrical component made by gas metal arc welding process. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 30(1), 188–198. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2021-0019>
- Nagasai, B. P., Malarvizhi, S., & Balasubramanian, V. (2022). Effect of welding processes on mechanical and metallurgical characteristics of carbon steel cylindrical components made by wire arc additive manufacturing (WAAM) technique. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 36, 100–116. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.11.005>
- Natesan, M., Selvaraj, S., Manickam, T., & Venkatachari, G. (2008). Corrosion behavior of metals and alloys in marine-industrial environment. *Science and Technology of Advanced Materials*, 9(4). <https://doi.org/10.1088/1468-6996/9/4/045002>
- Saba, N., Jawaid, M., & Sultan, M. T. H. (2019). An overview of mechanical and physical testing of composite materials. *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00001-1>
- Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia Manufacturing*, 35, 1286–1296. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>

- Singh, S. R., & Khanna, P. (2021). Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials. *Materials Today: Proceedings*, 44, 118–128. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.030>
- Smith, K. C. A., & Oatley, C. W. (n.d.). *The scanning electron microscope and its fields of application*.
- Sunil Kumar, S., Londe, N. v., Dilip Kumar, K., & Kittur, M. I. (2018). A Review on Deterioration of Mechanical Behaviour of High Strength Materials under Corrosive Environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 376(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/376/1/012106>
- Treutler, K., & Wesling, V. (2021). The current state of research of wire arc additive manufacturing (Waam): A review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 18). MDPI. <https://doi.org/10.3390/app11188619>
- US Department of Energy. (2016), “Fundamentals Handbook: Material Science”, US DOE
- Zuchry, M., Asmara, A., Naharuddin, N., & Yandi, Y. (2020). Study Comparative of Corrosion Rate Scrap Aluminium in Chloride Acid (HCl) and Natrium Chloride (NaCl) Solutions. *MATEC Web of Conferences*, 331, 05004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202033105004>

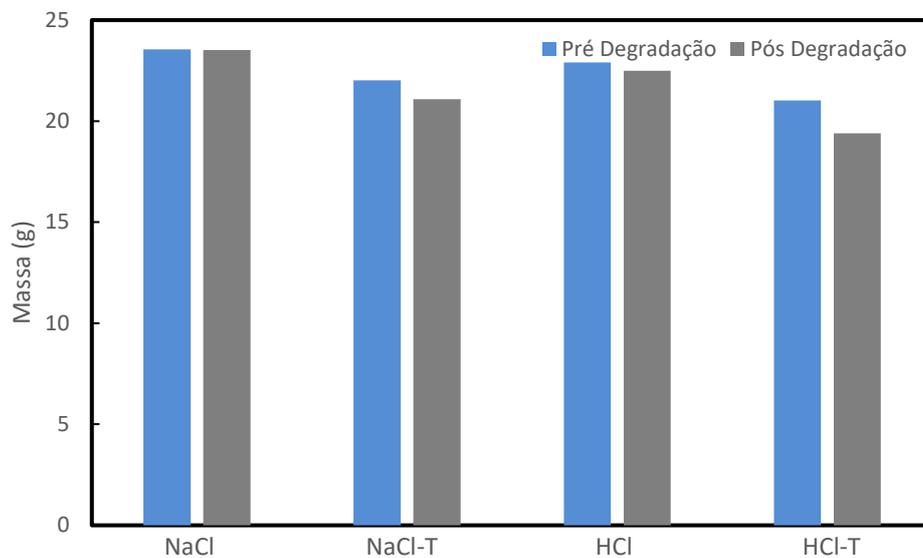
## APÊNDICE A



**Figura A.1.** Gráfico comparativo dos valores da massa antes e depois da degradação das amostras V2



**Figura A.2.** Gráfico comparativo dos valores da massa antes e depois da degradação das amostras H1



**Figura A.3.** Gráfico comparativo dos valores da massa antes e depois da degradação as amostras H2