

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

BRUNA GRAZIELLE OSELIERI LOPES

MONALISA GOULART SANTOS

ELABORAÇÃO E ANÁLISE DE MAPAS DE PROPRIEDADES ABORDANDO A
RESISTÊNCIA À CORROSÃO COMO CARACTERÍSTICA DESEJÁVEL NA
METODOLOGIA DE SELEÇÃO DE MATERIAIS

BELO HORIZONTE

2020

BRUNA GRAZIELLE OSELIERI LOPES

MONALISA GOULART SANTOS

ELABORAÇÃO E ANÁLISE DE MAPAS DE PROPRIEDADES ABORDANDO A
RESISTÊNCIA À CORROSÃO COMO CARACTERÍSTICA DESEJÁVEL NA
METODOLOGIA DE SELEÇÃO DE MATERIAIS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado no Curso de Graduação em
Engenharia de Materiais do Centro Federal
de Educação Tecnológica de Minas Gerais
como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de
Materiais

Orientador: Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont

BELO HORIZONTE

2020

BRUNA GRAZIELLE OSELIERI LOPES

MONALISA GOULART SANTOS

ELABORAÇÃO E ANÁLISE DE MAPAS DE PROPRIEDADES ABORDANDO A
RESISTÊNCIA À CORROSÃO COMO CARACTERÍSTICA DESEJÁVEL NA
METODOLOGIA DE SELEÇÃO DE MATERIAIS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado no Curso de Graduação em
Engenharia de Materiais do Centro Federal
de Educação Tecnológica de Minas Gerais
como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de
Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcello Dumont - Orientador

Prof. Dr. Carlos Eduardo dos Santos

Prof^ª. Dr^ª. Aline Silva Magalhães

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

(Albert Einstein)

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

(Madre Teresa de Calcutá)

AGRADECIMENTOS

A Deus e aos meus pais por terem me dado a vida, a qual me proporcionou a oportunidade de um aprendizado tão enriquecedor;

À minha família e amigos pelo incentivo durante os estudos, apoio nos momentos difíceis, paciência e compreensão nos momentos de ausência;

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcello Dumont, por ter me atendido sempre com atenção, carinho e respeito, e por ser um exemplo a ser seguido;

Aos professores que tive ao longo da vida, que exercem um trabalho duro, porém admirável;

Ao meu companheiro Heron Fonseca Pimenta, por todo o apoio técnico, conselhos e incentivo nos momentos mais difíceis;

À minha dupla Monalisa Goulart por todo o companheirismo, incentivo e comprometimento dados durante o trabalho.

Bruna Grazielle Oselieri Lopes

Aos meus pais pela paciência, incentivo e compreensão durante toda a realização do TCC e da minha vida acadêmica.

Aos amigos da vida e da faculdade que me incentivaram e deram apoio nos momentos os quais achei que não daria mais conta.

Ao meu orientador Marcello Dumont, por toda a parceria e cuidado que sempre teve comigo durante o curso, de modo especial quando me adotou como orientanda.

À melhor dupla que eu poderia ter tido, Bruna Oselieri, por acreditar que faríamos dar certo e por toda dedicação à conclusão deste trabalho.

A Deus, sempre presente, que abre todas as portas que preciso passar e coloca no meu caminho pessoas especiais.

Monalisa Goulart Santos

RESUMO

A seleção de materiais é um processo de tomada de decisão multicritério que envolve diversos fatores os quais influenciam nesta seleção. A escolha adequada do material é uma questão crítica para o sucesso do projeto que está sendo realizado, além de ser um processo demorado e com alto custo, onde vários materiais candidatos disponíveis no mercado são levados em consideração como alternativas provisórias. Embora haja diversas abordagens matemáticas disponíveis para a utilização nos processos de seleção de materiais como os mapas de propriedade de Ashby, estes não contemplam os aspectos de corrosão, apesar de abrangerem as propriedades térmicas, mecânicas e elétricas. Este estudo se alicerça na metodologia de análises bibliométricas sobre o tema e a criação de um banco de dados, feito através da coleta de informações em artigos e teses realizados na área de corrosão para a geração de gráficos de propriedade. Partindo deste pressuposto, neste trabalho foram criados e analisados mapas de propriedade, abordando a relação entre propriedades mecânicas e resistência à corrosão das ligas metálicas estudadas, com o objetivo de tornar mais robusto o processo de seleção de materiais em ambiente corrosivo. Os mapas de propriedade foram criados utilizando-se as relações entre potencial de corrosão, potencial de pite, densidade de corrente, limite de escoamento e densidade, que podem ser utilizados em projetos de seleção onde redução de massa, redução de espessura e resistência à corrosão são usadas como critérios mandatórios para escolha de um material. Além disso, foi realizado um processo de seleção a fim de validar a utilidade dos mapas criados. Por fim, pode-se observar a necessidade de criação desses mapas, bem como a utilidade que eles têm no processo de seleção de materiais.

Palavras-chave: Seleção de Materiais; Corrosão; Ligas metálicas; Gráficos de propriedade.

ABSTRACT

Material Selection is a multicriteria decision-making process that involves several factors which influence this selection. The proper choice of material is a critical issue for the success of the project being carried out, in addition to being a time-consuming and costly process, where various materials available on the market are taken into consideration as temporary alternatives. Although there are several mathematical approaches available for use in material selection processes, such as Ashby's property maps, these do not address corrosion aspects, despite covering thermal, mechanical and electrical properties. This study is based on the methodology of bibliometric analysis on the theme and creation of a database, made through the collection of information in articles and theses carried out in the area of corrosion for the generation of property graphics. Based on this assumption, in this work property maps were created and analyzed, addressing the relationship between mechanical properties and corrosion resistance of the studied alloys, with the objective of making the material selection process in a corrosive environment more robust. Property maps were created using the relationships between corrosion potential, pitch potential, current density, yield strength and density, which can be used in selection projects where mass reduction, thickness reduction and corrosion resistance are used as mandatory criteria for choosing a material. In addition, a selection process was created in order to validate the usefulness of the maps created. Finally, it is possible to observe the need to create these maps, as well as their usefulness in the material selection process.

Key-words: Materials Selection; Corrosion; Metal alloys; Property Graphics.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Estratégia para seleção de materiais. Os principais passos | 19 |
| Figura 2 - Diagrama de barras da família dos sólidos | 21 |
| Figura 3 - Diagramas de propriedade dos materiais | 21 |
| Figura 4 - Gráfico do Módulo de Young (E) em relação à Densidade (ρ) | 22 |
| Figura 5 - Representação esquemática da ligação metálica – Mar de elétrons | 24 |
| Figura 6 - Esquema de classificação para as ligas metálicas | 25 |
| Figura 7 - Esquema do ensaio em câmara de névoa salina em (a) e imagem da câmara em (b).. | 32 |
| Figura 8 - Representação esquemática de uma curva de polarização anódica genérica | 33 |
| Figura 9 - Representação gráfica do método de extrapolação das retas de Tafel | 34 |
| Figura 10 - Esquema de corrosão por pite | 35 |
| Figura 11 - Várias formas de pite, segundo a ASTM G46-94 | 35 |
| Figura 12 - Etapas de desenvolvimento do trabalho | 38 |
| Figura 13 - Mapa de rede da palavra-chave “Pitting” | 44 |
| Figura 14 - Mapa de rede da palavra-chave “Corrosion Potential” | 44 |
| Figura 15 - Mapa de rede das palavras-chave “Pitting” AND “Corrosion Potential” | 45 |
| Figura 16 - Limite de Escoamento x Potencial de Corrosão | 50 |
| Figura 17 - Limite de Escoamento x Potencial de Pite | 50 |
| Figura 18 - Lim. Escoamento/Densidade x Potencial de Corrosão | 51 |
| Figura 19 - Limite de Escoamento x Densidade de Corrente | 52 |
| Figura 20 - Limite de Escoamento/Densidade x Densidade de Corrente | 53 |
| Figura 21 - Potencial de Corrosão x Densidade de Corrente | 53 |
| Figura 22 - Potencial de Pite x Potencial de Corrosão | 54 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Íons predominantes na água do mar | 31 |
| Tabela 2 - Classificação da salinidade da água | 31 |
| Tabela 3 - Palavras-chave utilizadas para as pesquisas de criação do banco de dados | 40 |
| Tabela 4 - Relação entre as pesquisas realizadas em diferentes sites e resultados | 47 |
| Tabela 5 - Resultados encontrados após análise dos documentos coletados | 48 |
| Tabela 6 - Materiais com maiores valores para o índice de mérito 1 (IM 1) | 55 |
| Tabela 7 - Materiais com maiores valores para o índice de mérito 2 (IM 2) | 56 |
| Tabela 8 - Materiais com maiores valores para o índice de mérito 3 (IM 3) | 57 |
| Tabela 9 - Somatório dos índices de méritos dos materiais encontrados para os candidatos do projeto | 58 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|---|----|
| Equação 1 – Cálculo do Índice de Mérito 1 | 55 |
| Equação 2 – Cálculo do Índice de Mérito 2 | 56 |
| Equação 3 – Cálculo do Índice de Mérito 3 | 57 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Ampére
AA – *Aluminum Association*
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI - *American, Iron and Steel Institute*
Al – Alumínio
ASTM - *American Society for Testing and Materials*
B – Boro
Ca – Cálcio
Ca²⁺ – Íon Cálcio
Cl⁻ – Cloreto
cm – Centímetro
CR – Conforme Recebido
Cr – Cromo
Cu – Cobre
D - Densidade
DBD – Descarga por Barreira Dielétrica
E – Módulo de Young
E_{corr} – Potencial de Corrosão
E_p – Potencial de Pite
E_{pas} – Potencial de Passivação
E_{pp} – Potencial Primário Passivo
E_{tr} – Potencial de Transpassivação
Fe – Ferro
g – Grama
GPa – Giga Pascal
GW – Giga Watts
i – Densidade de Corrente
i_{cp} – Densidade de corrente crítica de passivação
IM – Índice de Mérito
i_p – Corrente de Passivação
ISO - *International Organization for Standardization*
K – Potássio
K⁺ – Íon Potássio
KCS – *Konjac glucomannan calcium hydroxide and sodium dodecyl benzene sulfonate*
KGM – *Konjac glucomannan*
log – Logaritmo
LE – Limite de Escoamento
LSP – *Laser Shock Peening*
m – Metro
Mg – Magnésio
Mg²⁺ – Íon de Magnésio

Mo – Molibdênio
Mpa – Mega Pascal
mV – Milivolt
N – Nitrogênio
Na⁻ – Íon Sódio
NAB – Liga de Níquel, Alumínio e Bronze
NaCl – Cloreto de Sódio
NBR – Normas Brasileiras
Ni – Níquel
NO – Óxido de Nitrogênio
NO₂ – Dióxido de Nitrogênio
°C – Graus Celsius
PAni – Polianilina
pH – Potencial Hidrogeniônico
PIB – Produto Interno Bruto
PVC – Policloreto de Vinila
S – *Siemens*
SAE - *Society of Automotive Engineers*
SAF – Sandvik Austenitic Ferritic
Si – Silício
SO₂ – Dióxido de Enxofre
SO₃ – Trióxido de Enxofre
SO₄²⁻ – Íon Sulfato
Ti – Titânio
TOL. – Tolerância
UNS – *Unified Numbering System*
Zr – Zircônio
ZrN – Nitreto de zircônio
ZrSiN – Nitreto de silício de zircônio
μ – Micro
ρ – Densidade

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 OBJETIVOS | 16 |
| 2.1 Objetivo Geral | 16 |
| 2.2 Objetivos específicos | 16 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 3.1 Seleção de Materiais | 17 |
| 3.2 Mapas de Propriedade | 20 |
| 3.3 Bibliometria | 23 |
| 3.4 Materiais Metálicos | 24 |
| 3.4.1 Ligas Metálicas | 24 |
| 3.4.2 Aços | 25 |
| 3.4.2.1 Aços inoxidáveis | 26 |
| 3.4.3 Ligas de alumínio | 27 |
| 3.4.4 Ligas de cobre | 27 |
| 3.5 Corrosão | 28 |
| 3.6 Formas de Corrosão | 28 |
| 3.7 Meios Corrosivos | 29 |
| 3.7.1 Meio Atmosférico | 29 |
| 3.7.2 Solução de NaCl | 30 |
| 3.8 Ensaio de Névoa Salina | 31 |
| 3.9 Potencial de Corrosão | 33 |
| 3.10 Corrosão por pite | 35 |
| 3.11 Ensaio eletroquímicos utilizados em corrosão por pite | 36 |
| Técnica de polarização | 36 |
| 4 METODOLOGIA | 38 |
| 4.1 Bibliometria | 38 |
| 4.1.1 Base de dados para a geração dos mapas de rede | 38 |
| 4.1.2 VosViewer..... | 39 |
| 4.2 Pesquisa bibliográfica | 40 |
| 4.3 Correlação de resultados | 40 |
| 4.4 Gráficos/Mapas de Propriedade | 41 |
| 4.5 Seleção de Materiais | 41 |

| | |
|--|----|
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 43 |
| 5.1 Bibliometria | 43 |
| 5.1.1 Base de dados para a geração dos mapas | 43 |
| 5.1.2 VosViewer | 43 |
| 5.2 Pesquisa bibliográfica | 46 |
| 5.3 Correlação dos Resultados | 48 |
| 5.4 Gráficos/Mapas de propriedades | 49 |
| 5.5 Seleção de Materiais | 55 |
| 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 59 |
| REFERÊNCIAS | 60 |

1 INTRODUÇÃO

A fim de manterem-se competitivos no mercado, *designers*, engenheiros e fabricantes estão sempre em busca de novos e melhores materiais para aprimoramento de desempenho e redução de custos de seus produtos. Estima-se que mais de 160.000 materiais foram inventados no mundo (MEHMOOD; HANEEF; UDREA, 2018).

Uma metodologia que vem se mostrando adequada a essas demandas é a abordagem de Ashby, que possui métodos de seleção de materiais mais difundidos para materiais de engenharia. Os diagramas de propriedades de Ashby têm se tornado o maior aliado desse processo devido à necessidade de análise das propriedades almejadas para escolha de um material ideal (ANTUNES; OLIVEIRA, 2014; ASHBY, 2012; JUNIOR, 2017; SHAH, 2014; SOUZA, 2015).

Uma das propriedades requeridas para materiais, relevante durante um processo de seleção de materiais é a resistência à corrosão. A corrosão de um material metálico é definida como a reação química ou eletroquímica entre um metal ou liga e o meio em que se encontra. Esse processo leva à deterioração do material e de suas propriedades, além de gerar grande impacto em todo o mundo, levando à perdas econômicas, desperdício de recursos, poluição ambiental, acidentes de segurança e problemas de desenvolvimento social (ZUO et al., 2019). Os custos de substituição de peças ou equipamentos, manutenção dos processos de proteção, paralisações acidentais, perda de eficiência e contaminação de produtos nos últimos anos foi cerca de US\$ 2 trilhões, o que representa mais de 3 % do PIB anual mundial (LEAL et al., 2018).

Sabe-se que as ligas de aços inoxidáveis, alumínio e cobre são amplamente utilizadas em situações as quais requer maior resistência à corrosão do que as ligas ferrosas em geral. A superfície dessas ligas é protegida por uma fina camada passiva, contudo, também sofrem corrosão quando estão em ambientes agressivos. O tipo de corrosão mais comum entre esses metais é a corrosão por pite que, segundo Loto (2019), é localizada, de difícil detecção precoce e, portanto, pode gerar trincas, danos e falhas irreversíveis no material.

Com o intuito de auxiliar o Engenheiro de Materiais a encontrar um material ideal para o seu projeto, justifica-se a criação deste trabalho, o qual tem o intuito de informar as condições de corrosão de materiais e ligas, colaborando para a melhor escolha possível do material, a fim

de reduzir o retrabalho, o desperdício e os custos adicionais de um projeto elaborado sem essas informações.

Atualmente na literatura, as curvas de Ashby são as mais utilizadas para seleção de materiais, as quais abordam propriedades térmicas, mecânicas e elétricas. No entanto, os diagramas de propriedades são dificilmente encontrados na literatura no que se refere a dados de corrosão de materiais metálicos.

Sendo assim, com o intuito de tornar o processo de seleção de materiais mais robusto, este trabalho propõe uma metodologia de análise bibliométrica para definição dos materiais mais utilizados no meio corrosivo e, com base nas informações coletadas, iniciar o processo de criação de gráficos de propriedade baseados na corrosão dos metais em meio aquoso salino.

2 OBJETIVOS

2.2 Objetivo Geral

Avaliar os dados disponíveis de comportamento corrosivo de ligas de aços inoxidáveis, alumínio e cobre em meios aquosos salinos para correlação com demais propriedades, permitindo utilizá-los em processos de seleção de materiais.

2.2 Objetivos específicos

- Analisar correlação entre as palavras-chave encontradas nos artigos científicos, a partir de pesquisa bibliométrica, e definir os principais materiais submetidos a meios corrosivos;
- Correlacionar as propriedades corrosivas (potencial de corrosão, potencial de pite e densidade de corrente) com propriedades mecânicas (limite de escoamento e densidade) dos materiais;
- Construir mapas e tabelas correlacionando as propriedades mencionadas desses materiais;
- Realizar processo de seleção de materiais hipotético com os mapas e tabelas construídos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Seleção de Materiais

Para atender às demandas de redução de peso e melhoria das propriedades mecânicas, muitos dos materiais estão sendo substituídos por versões avançadas. Considerando as ligas metálicas e não metálicas utilizadas atualmente na engenharia, acredita-se que exista mais de oitenta mil variedades de materiais. Apesar deste elevado número ser positivo para abrir possibilidades de escolha de um material ideal, ele também gera uma tarefa desafiadora para quem precisa comparar os materiais, estabelecer relações e selecionar o melhor produto para uma determinada aplicação de engenharia (CHATTERJEE; ATHAWALE; CHAKRABORTY, 2010).

Quando há o desejo em produzir um novo produto demandado pelo mercado ou até mesmo melhorar um já existente, o processo de seleção de materiais torna-se intrínseco, visto que traduzir uma nova ideia em informações detalhadas é fundamental para o sucesso do projeto (ASHBY, 2012; SERAFINI et al, 2015).

Mesmo que a seleção de materiais para um projeto de engenharia pareça necessitar apenas de conceitos físicos, elétricos, magnéticos, mecânicos, químicos e outros aspectos relacionados à propriedade ou fabricação, esse processo também necessita de *know-how* de custo de material e de produção, de possíveis impactos ambientais, disponibilidade dessa matéria prima no mercado, características e condições de desempenho e muitas outras relações que influenciam diretamente no processo ou na escolha do produto final (CHATTERJEE; ATHAWALE; CHAKRABORTY, 2010).

Algumas das principais propriedades mecânicas, segundo Chatterjee, Athawale e Chakraborty (2010), na seleção de materiais são:

- Módulo de Young (força, tensão de escoamento, elasticidade, fadiga, resistência à fluência, ductilidade, dureza e tenacidade);
- Propriedades físicas (estrutura cristalina, densidade, ponto de fusão);
- Propriedades magnéticas e elétricas (resistividade, permissividade, rigidez dielétrica);
- Propriedades térmicas (calor específico, condutividade, expansividade, difusividade, transmissividade);

- Fatores diversos (como confiabilidade, durabilidade, reciclabilidade, impacto do material no meio ambiente).

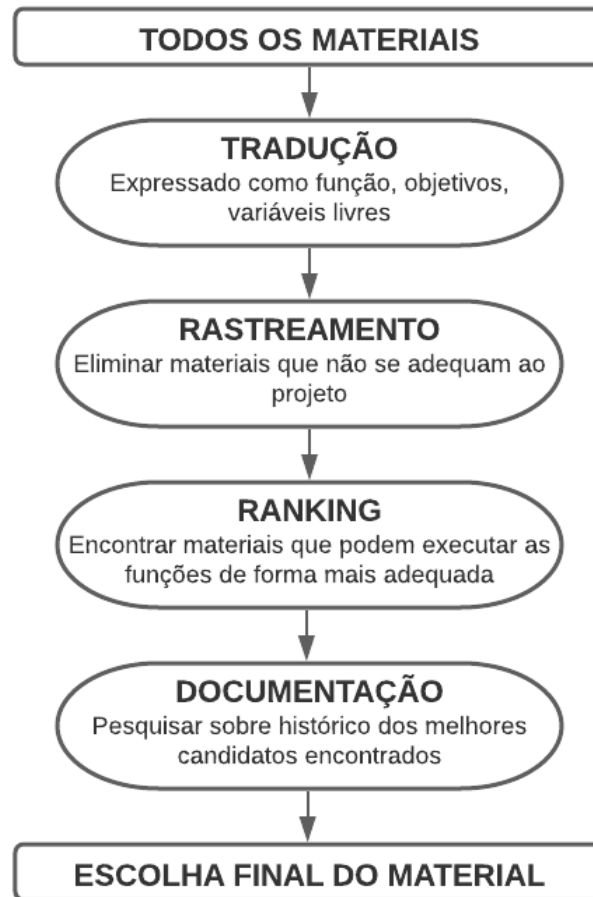
Considerando o avanço da Engenharia de Materiais, não é recomendado ao projetista delimitar suas atividades às escolhas tradicionais, porque assim ele evita uma possível perda de oportunidades de melhoria e crescimento. Com a grande quantidade de materiais com diversas propriedades disponíveis no mercado, a escolha do produto ideal para o projeto é extremamente complicada e, muitas vezes, incerta. Por esse motivo, a seleção de materiais é ideal e necessária para uma tomada de decisão firme e com embasamento dentro dos requisitos de projeto (ASHBY, 2012; FARAG, 2002).

Dentre as estratégias de seleção de materiais há uma que foi desenvolvida por Ashby (2012), e é amplamente conhecida ao redor do mundo e conta com quatro etapas (ANTUNES; OLIVEIRA, 2014; MEHMOOD; HANEEF; UDREA, 2018; SAWANT; MOHITE; CHEULKAR, 2018):

- Tradução: momento em que se converte os requisitos do projeto em restrições e objetivos tornando possível aplicar as informações aos bancos de dados de materiais. É necessário que se inicie o projeto de modo que todos os materiais sejam opção, sem nenhuma restrição, para que não corra o risco de descartar uma boa escolha.
- Rastreamento: início do processo de desconsiderar os materiais que não atendam aos objetivos do projeto. É nessa etapa que se define os limites das características do projeto de modo a permitir que o número de opções reduza;
- *Ranking*: a capacidade de cada material aprovado na última triagem é avaliada conforme a função demandada do projeto. Após análise comparativa os materiais com menor desempenho e eficiência devem ser desclassificados;
- Documentação: com os materiais aprovados da última triagem inicia-se o processo de coleta de dados, a realização de ensaios e a fabricação de uma lista com descrição detalhada dos melhores candidatos encontrados. O veredito final é dado com base nessa lista e condições locais, e na disponibilidade de fornecedores na região, de equipamentos, legislação regional, entre outros fatores (ASHBY, 2012).

Na Figura 1 observa-se o fluxograma resumido das etapas do processo de seleção de materiais estabelecido por Ashby:

Figura 1 – Estratégia para seleção de materiais. Os principais passos:



Fonte: Adaptado de ASHBY, 2011.

É possível dividir os métodos de seleção de materiais em métodos derivativos e não derivativos. O método derivativo, também conhecido como metodologia explícita, baseia-se em estabelecer parâmetros e propósitos de um projeto e convertê-los em um cálculo matemático que tem por finalidade maximizar ou minimizar um objetivo (D'ERRICO, 2015).

A função deve ter fundamentalmente três termos (ASHBY, 2011; CHOUDHARY; KUMAR; GUPTA, 2014; MEHMOOD; HANEEF; UDREA, 2018):

- Parâmetro geométrico;
- Parâmetro funcional;
- Propriedade do material.

Geralmente, os parâmetros geométrico e funcional permanecem constantes durante a análise, permitindo a avaliação das propriedades dos materiais. Essa propriedade do material é determinada como índice de mérito (IM) e é ele que deve ser utilizado para criar funções

matemáticas e plotar gráficos a fim de encontrar o melhor candidato para atender aos requisitos do projeto (ANTUNES; OLIVEIRA, 2014; CHOUDHARY; KUMAR; GUPTA, 2014).

O índice de mérito (IM) de um material é definido pelos propósitos e considerações do projeto, pelo qual recomenda-se encontrar um candidato que possua o maior índice possível, tornando o material mais apto para o uso. Deste modo, o índice de mérito é bastante relevante no cenário de seleção de materiais. Nem sempre o material que apresenta o maior índice mérito é a melhor alternativa. Com isso, deve-se também considerar outras limitações para o material (ANTUNES; OLIVEIRA, 2014; ASHBY, 2011).

Outra abordagem utilizada é a de métodos não derivativos que se diferencia dos métodos derivativos por ser direcionada à análise subjetiva e à tomada de decisão. Um exemplo desse método é estabelecer os pesos de destaque como requisitos chave do projeto. Esse processo permite associar valores às qualidades subjetivas e também pondera mais fatores que o método derivativo (D'ERRICO, 2015).

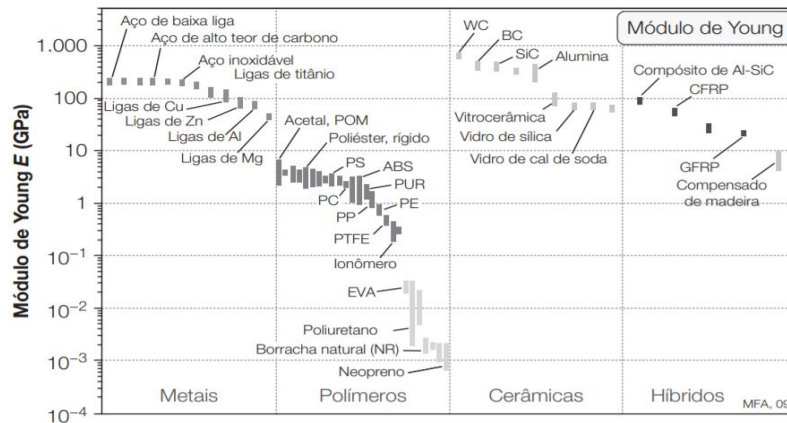
Além disso, é possível considerar parâmetros para além das propriedades do material (como custo de produção). Apesar de ser um processo muito utilizado é um método instável e subjetivo, o que torna essencial uma boa análise crítica e ponderação para escolher os pesos requisitos do projeto. Isso garante, portanto, uma seleção de materiais que sejam compatíveis com as necessidades do projeto (D'ERRICO, 2015).

3.2 Mapas de Propriedade

Levando em consideração que para escolher um melhor candidato não se deve analisar por grupos de materiais e sim pelas propriedades almejadas, os Diagramas de Propriedade são outros grandes aliados no método de seleção de materiais (ASHBY, 2012; JUNIOR, 2017; SHAH, 2014; SOUZA, 2015).

Cada propriedade de um material de engenharia tem uma faixa de valores característica, pelo quais muitas delas alcançam valores de módulo de elasticidade superiores à 10^5 GPa. O diagrama de barras apresentado na Figura 2 é um dos modos de expor esses valores. Cada barra representa um material e o seu comprimento expressa as faixas de módulo de Young apresentadas pelo material em suas várias formas.

Figura 2 – Diagrama de barras da família dos sólidos.

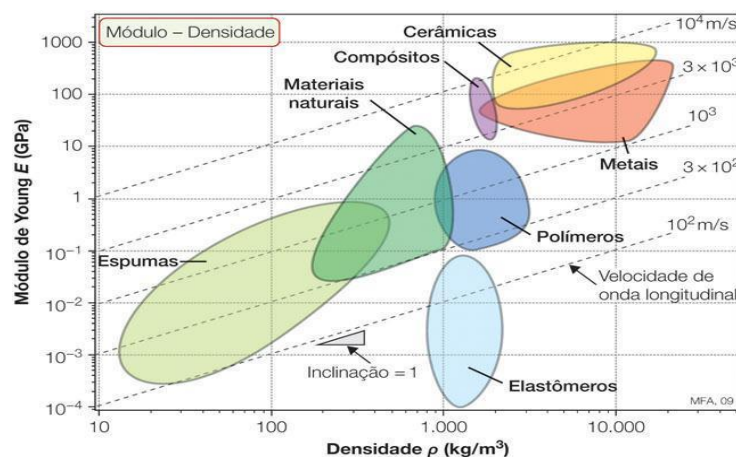


Fonte: Ashby, 2012.

Os materiais são separados por classes, onde é possível notar que materiais metálicos e cerâmicos possuem módulos entre 10 GPa e 100 GPa. Já os polímeros apresentam módulos de até 10 GPa. É possível observar que as faixas mencionadas possuem uma abrangência de 10^6 , por isso é comum utilizar escalas logarítmicas (ASHBY, 2012; JUNIOR, 2017; SOUZA, 2015).

É apresentado também um gráfico alternativo, onde encontra-se mais dados para a seleção, com uma faixa de eixos de Módulo de Young E x Densidade ρ , que abrange em escala logarítmica desde as espumas mais leves e tênues até os metais mais rígidos e pesados, conforme apresentado na Figura 3 (ASHBY, 2012; SHAH, 2014; JUNIOR, 2017; SOUZA, 2015).

Figura 3 – Diagramas de propriedade dos materiais.



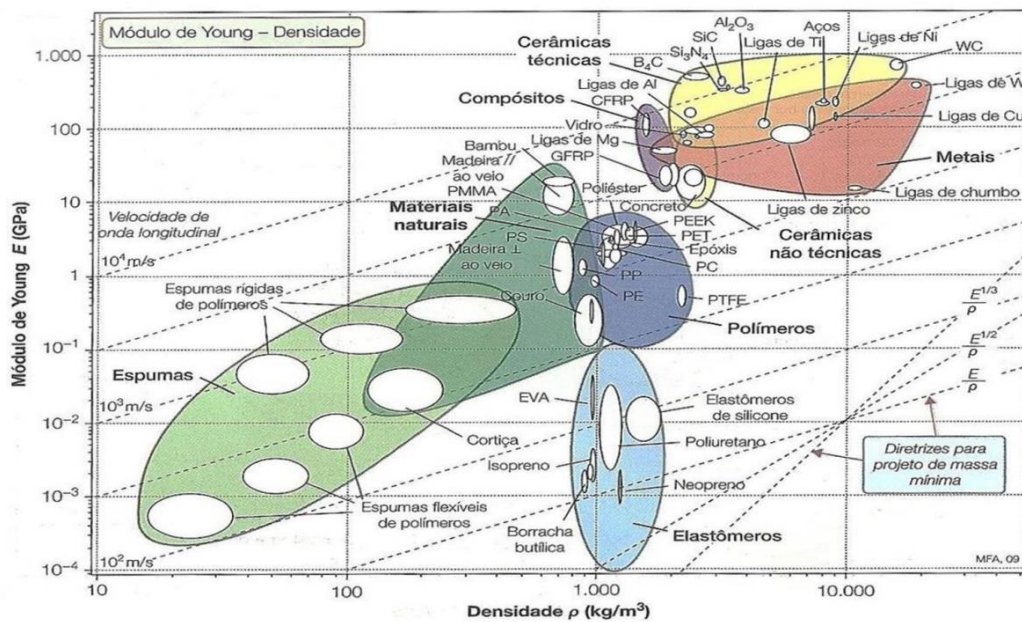
Fonte: Ashby, 2012.

Ao observar o diagrama, entende-se que os dados de uma determinada família tendem a se aglomerar e que as subfaixas associadas às famílias são consideravelmente menores que a

faixa total da propriedade. As informações de uma família podem ser englobadas em um envelope de propriedade (ASHBY, 2012; SHAH, 2014; JUNIOR, 2017; SOUZA, 2015).

Um diagrama $E \times \rho$ completo é apresentado na Figura 4, onde é possível encontrar os envelopes de famílias e, dentro desses envelopes encontram-se bolhas brancas, que são classes e subclasses desses materiais (ASHBY, 2012; SOUZA, 2015). Os diagramas são uma ótima escolha, visto que eles apresentam de forma clara, compacta e simples as propriedades de interesse, facilitando o entendimento de quem o analisa (ASHBY, 2012; SHAH, 2014).

Figura 4 – Gráfico do Módulo de Young (E) em relação à Densidade (ρ).



Fonte: Ashby, 2012

Os envelopes coloridos são referentes às classes de materiais distintas. Os tracejados diagonais representam a velocidade de onda longitudinal (v), e as diretrizes $\frac{E}{\rho}$, $\frac{E^{1/2}}{\rho}$, $\frac{E^{1/3}}{\rho}$ permitem a seleção de materiais para projeto de peso mínimo, limitado por deflexão (SHAH, 2014).

Considerando um valor fixo para velocidade de onda longitudinal (v) tem-se uma linha reta de inclinação 1, o que proporciona contornos de velocidade de onda constante ao diagrama, ou seja, essas linhas diagonais paralelas ligam os materiais que possuem ondas longitudinais com a mesma velocidade (ASHBY, 2012; JUNIOR, 2017; SOUZA, 2015).

Segundo Ashby (2012) e Shah (2014), os objetivos mais comuns para seleção de materiais em um projeto são:

- Minimizar massa;
- Minimizar volume;
- Minimizar custo;
- Minimizar impacto ambiental.

Porém, a opção que cumpre ou aperfeiçoa um dos objetivos geralmente não consegue cumprir os demais quesitos. Com isso, o melhor candidato para uma seleção de materiais é o que consegue aproximar ao máximo todos os objetivos das suas metas ao mesmo tempo. Diante disso, pode-se inferir a possibilidade de mais de um candidato tornar os quesitos satisfatórios (ASHBY, 2012; FARAG, 2002).

3.3 Bibliometria

Para o avanço do conhecimento, o processo de aquisição de informações vem sendo considerado um dos maiores pesos para o sucesso dessa fase. Os estudos bibliométricos têm se tornado para a área de pesquisa uma das maiores fontes de informação, o que favorece a evolução da tecnologia, comunicação e ciência (MARQUES, 2010).

Inúmeros métodos de apoio à tomada de decisão estudados e desenvolvidos nas áreas de pesquisa operacional são úteis para estabelecer *rankings* de comparação multicritério, os quais favorecem a comparação de materiais e suas propriedades (CHATTERJEE; CHAKRABORTY 2012).

Como área de estudo da Ciência da informação, a bibliometria tem se tornado uma parte considerável da análise de produção científica de um determinado país, visto que seus indicadores podem delinear o desempenho e progresso de uma área de conhecimento (ARAÚJO; ALVARENGA, 2011). Ao variar os níveis de complexidade e garantias estatísticas, esse método também pode ser utilizado para minimizar riscos e incertezas na escolha de um material conforme os requisitos, pesos e desempenho especificados (JEE; KANG, 2000).

Os indicadores podem ser apresentados em gráficos, tabelas e/ou mapas, tornando possível reconhecer a carga de importância dos temas nos campos científicos. Sendo assim, pode-se relacionar os temas envolvendo diversas variáveis: ano, instituição, procedência geográfica, área do conhecimento, palavras-chave e orientadores, os quais auxiliam na análise da dinâmica de produção científica de um tema de pesquisa específico, como a seleção de

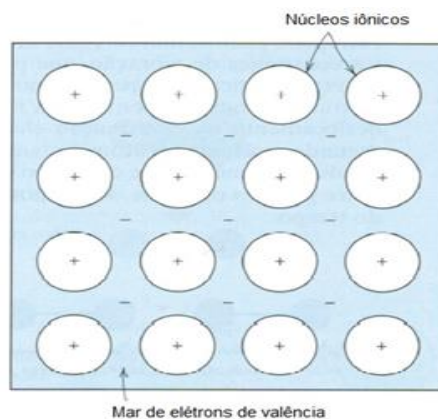
materiais e a tomada de decisão (ARAÚJO; ALVARENGA, 2011; ZHANG, 2017; BÖRNER, 2015).

3.4 Materiais Metálicos

Segundo Callister (2012), os materiais metálicos são compostos por um ou mais elementos químicos metálicos (ferro, alumínio, cobre) e, comumente, por materiais não metálicos (carbono, nitrogênio, oxigênio). As ligações encontradas nesses materiais são as ligações metálicas, cujos elétrons da camada de valência formam um “mar de elétrons” espalhados de maneira regular em volta dos núcleos dos íons metálicos, onde atua como uma espécie de cola para eles.

Na Figura 5 é mostrada a representação esquemática da ligação metálica.

Figura 5 – Representação esquemática da ligação metálica – Mar de elétrons



Fonte: Callister; Rethwisch (2012), p 29.

Os átomos dos materiais metálicos e suas ligas são muito organizados e possuem um número elevado de elétrons não localizados, o que significa que eles não estão ligados a nenhum átomo específico, proporcionando grande mobilidade eletrônica. Por conta disso, essa classe de materiais possui propriedades típicas como condutividade térmica e elétrica. No que tange aos atributos mecânicos, os materiais metálicos possuem elevados valores de rigidez e resistência, porém são dúcteis e resistentes à fratura (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

3.4.1 Ligas metálicas

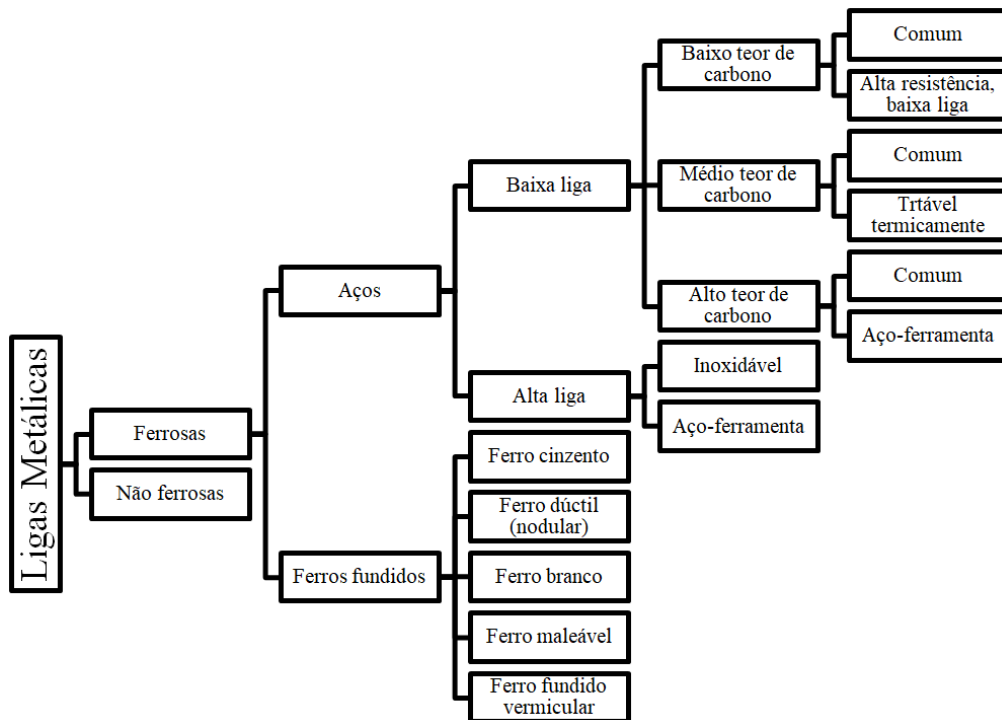
Os metais não costumam ser operados de forma pura, mas sim como ligas metálicas (substâncias compostas por dois ou mais metais, semimetais ou não-metais), onde há adição proposital de impurezas quando se deseja alcançar propriedades específicas (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

As especificidades mecânicas e químicas são dependentes de alguns fatores, entre eles (CALLISTER; RETHWISCH, 2012):

- elementos que formaram a liga metálica;
- proporção dos elementos;
- estrutura cristalina da liga;
- tratamentos térmicos realizados na liga.

É possível dividir as ligas metálicas em dois grandes grupos referentes à sua composição: ferrosas (em que o ferro é o principal constituinte e inclui aços e ferros fundidos) e não ferrosas (em que o ferro não é o principal constituinte: ligas de cobre, alumínio, titânio e outras) (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Na Figura 6 é apresentado esquema de classificação para as ligas metálicas.

Figura 6 - Esquema de classificação para as ligas metálicas



Fonte: Adaptado de Callister; Rethwisch (2012).

3.4.2 Aços

Aços são ligas metálicas de ferro e carbono cujo teor do carbono é de 0,002 % a 2,0 % do peso total da liga. Os aços-carbonos possuem apenas os elementos: carbono, silício, manganês, cromo, enxofre e fósforo. Contudo, é possível encontrar outros elementos de liga residuais (MOURÃO *et al.*, 2011).

Segundo Mourão *et al.* (2011), existem várias classificações de aços, entre elas:

- SAE – *Society of Automotive Engineers*;
- AISI – *American, Iron and Steel Institute*;
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*;
- ISO – *International Organization for Standardization*.

Os aços podem ser catalogados de acordo com propriedades principais, características químicas e atributos exigidos para sua utilização (TÉCNICAS, 2000).

3.4.2.1 Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas compostas com teor mínimo de 10,5 % de Cromo (Cr), e podem apresentar também o Níquel (Ni) em sua composição. O Cr permite a formação de um filme passivo de proteção contra corrosão, enquanto o Ni, que contribui para a melhoria da resistência à corrosão pela estabilização da fase austenítica (CARBÓ, 2008; LOTO, 2019). Além dessas vantagens, os aços inoxidáveis possuem estabilidade química e podem ser facilmente fabricados (TAO *et al.*, 2019).

As aplicações de aços inoxidáveis incluem indústria química, petrolífera, de geração de energia e gás (LOTO, 2019), automotiva, aeroespacial, eletrônica (TAO *et al.*, 2019) e metalúrgica, além de setores de construção (LI *et al.*, 2014).

A superfície dos aços inoxidáveis é protegida por uma fina camada passiva. Contudo, segundo Jafarzadeh *et al.* (2019), quando ele é encontrado em ambientes agressivos, com a presença de íons cloreto e/ou sulfato, por exemplo, esse filme torna-se instável e quebra

localmente em pontos fracos como inclusões, falhas e contornos de grãos segregados por soluto. Iniciam-se, assim, pontos de corrosão chamada corrosão por pite.

Como lembra Loto (2019), outros fatores determinantes para a corrosão do aço inoxidável incluem heterogeneidades microestruturais na superfície do aço, adições específicas de ligas Titânio (Ti), Nitrogênio (N), Boro (B). Dentre outros, como a quantidade (% em massa) de elementos resistentes à corrosão, por exemplo, Cr e Ni, dentro dos aços.

No entanto, a corrosão por pite está entre os modos mais perigosos de dano aos aços inoxidáveis, não apenas pela dificuldade de detecção precoce como penetração localizada, mas também por servir como precursor para início de trincas em corrosão sob tensão e fadiga por corrosão (BYEON; WU, 2019).

3.4.3 Ligas de alumínio

As ligas de alumínio são ligas não ferrosas no qual o metal básico é o alumínio com adição de elementos de liga, entre eles: cobre, magnésio, manganês, silício e zinco (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Essas ligas são amplamente utilizadas em setores automotivos, de transporte, construção civil, de energia, eletroeletrônicos, artigos esportivos, entre outros, devido às suas propriedades de elevada resistência à corrosão e de alta relação resistência/massa (SAKAIRI; OTANI; SASAKI, 2014).

O alumínio e suas ligas são revestidos por um filme fino de óxido de alumínio formado naturalmente, que protege o metal contra a corrosão. No entanto, a corrosão nas ligas de alumínio é um processo complexo que pode ser influenciada por uma variedade de fatores experimentais, como pH, temperatura, natureza da solução aniônica e camada passiva. Nessas imperfeições, a adsorção, a penetração e o acúmulo de íons agressivos como o Cl^- em falhas de películas protetoras são considerados fatores que impulsionam a nucleação de pites (QUEBBOU; CHAFI; OMARI, 2020).

3.4.4 Ligas de cobre

Ligas de cobre são amplamente utilizadas devido às suas propriedades mecânicas, corrosivas, condutividades térmica e elétrica, além de processabilidade. Elas são aplicadas na indústria aeroespacial, ferrovias de alta velocidade, eletrodomésticos e estruturas de chumbo (GENG *et al.*, 2020).

Conforme Geng *et al.* (2020), a adição de elementos de liga ao cobre é realizada a fim de refinar grãos, atrasar o processo de recristalização e melhorar a resistência e dureza das ligas de cobre. As ligas de cobre são relativamente mais estáveis e mais resistentes à corrosão do que as ligas de aço e alumínio (WANG *et al.*, 2020), no entanto, também estão sujeitas à corrosão por pite (LEE; KIM; KOO, 2010).

3.5 Corrosão

A corrosão é definida como a reação química ou eletroquímica entre um material, geralmente um metal ou liga, e o meio em que se encontra, levando à deterioração do material e de suas propriedades, além de gerar grande impacto em todo o mundo, levando à perdas econômicas, desperdício de recursos, poluição ambiental, acidentes de segurança e problemas de desenvolvimento social (ZUO *et al.*, 2019).

Nos últimos anos o custo mundial com manutenção, substituição e reparo de materiais, equipamentos e serviços relacionados à corrosão foi de cerca de US \$ 2 trilhões, o que representa mais de 3 % do PIB anual mundial (LEAL *et al.*, 2018).

Devido ao impacto gerado pela corrosão em metais, pesquisas de engenharia são realizadas em larga escala a fim de se obter alternativas relacionadas à proteção contra corrosão de superfícies metálicas. Aproximadamente 20 % a 25 % do custo com restauração e substituição de materiais podem ser economizados se tecnologias adequadas de controle de corrosão forem aplicadas (LEAL *et al.*, 2018).

3.6 Formas de Corrosão

É possível apresentar as formas de corrosão levando em consideração a aparência, forma de ataque, as diferentes causas e seus mecanismos. Segundo Gentil (2011), quando se tem a caracterização da forma de corrosão facilita o entendimento e a utilização de medidas que aumente a sua proteção.

Sendo assim, é possível classificar um tipo de corrosão pelo aspecto da superfície do material que foi corroído e no caso de aços carbono as formas mais comuns de corrosão são: a corrosão uniforme (distribuído por grandes regiões da superfície, com velocidade uniforme e calculável); galvânica (dois metais diferentes com contato elétrico, solução condutora e diferença de potencial); por frestas (ambiente mais propício para corrosão mais agressiva) e a corrosão por pites (ataque localizado com perfuração curta, porém profunda) (ROCH, 2013).

3.7 Meios Corrosivos

Segundo Gentil (2011), os meios corrosivos mais encontrados são: atmosféricos, águas naturais, solo, produtos químicos, alimentos, substâncias fundidas, solventes orgânicos, madeiras e plásticos. Conforme Wolyneec (2003), é necessário destacar a relevância que representa a natureza do meio corrosivo na proximidade da superfície metálica.

A corrosão em metais envolve uma variedade considerável de mecanismos, porém podem ser quantificadas em quatro grupos com as seguintes proporções de incidência (GENTIL, 2011):

- Corrosão em meios aquosos (90 %);
- Oxidação e corrosão quente (8 %);
- Corrosão em meios orgânicos (1,8 %);
- Corrosão por metais líquidos (0,2 %).

Portanto, conforme Wolyneec (2003) é possível notar que a corrosão em meios aquosos é a mais comum, visto que grande parte das corrosões ocorre no meio ambiente onde a água é o solvente predominante.

3.7.1 Meio Atmosférico

Estabelecida como deterioração de um material exposto ao ar e os demais poluentes, a corrosão atmosférica é tida como a mais danosa forma de corrosão em relação à custos e porção de material comprometido (METALS, 1987).

Segundo Callister (2010), é possível avaliar a relevância da corrosão atmosférica observando a elevada quantidade de publicações científicas referentes ao teste corrosivo de materiais metálicos em longo prazo. A ação corrosiva da atmosfera ocorre principalmente devido à:

- umidade relativa;
- substâncias poluentes e gases;
- temperatura;

- tempo de permanência do filme de eletrólito na superfície metálica.

O desgaste de metais e suas ligas na atmosfera é também um processo eletroquímico, dado pela formação de um eletrólito aquoso na superfície do material, gerado pelos vários componentes atmosféricos. Esses parâmetros, conforme Chawla (1991), são fortemente dependentes do tipo de atmosfera, modificando de uma para outra.

Segundo Baboian (1995), as atmosferas podem ser classificadas em três categorias:

- Atmosferas rurais: possuem um baixo grau e volume de corrosão, visto que dispõem de uma condutividade eletrolítica baixa devido às poucas concentrações de espécies iônicas. Nesse caso, as corrosões se darão dependendo da temperatura e umidade da área.
- Atmosferas industriais: possui corrosão dependente também das causas acima, porém fortemente motivado pelos poluentes industriais (gasosos ou sólidos) que com a presença de parcelas sulfurosas aumentam a potência do eletrólito, ampliando assim a corrosividade do sistema.
- Atmosferas marinhas: são os ambientes mais agressivos devido à presença do íon cloreto, da umidade, temperatura, direção do vento.

Outra causa do aumento da corrosão atmosférica em estruturas metálicas é a chuva ácida que, segundo Evangelista *et al.* (2006), é uma combinação da composição química das substâncias presentes na atmosfera, as quais se agregam às gotas de chuva na precipitação. Tal como afirma Vaz, Codaro e Acciari (2013), os elementos dióxido de enxofre (SO₂), trióxido de enxofre (SO₃) óxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂) são os poluentes mais comuns, sendo SO₂ e NO₂ encontrados em maiores volumes.

3.7.2 Solução de NaCl

A água do mar formada por compostos salinos (sobretudo cloretos e sulfatos de sódio e de magnésio) é o meio considerado um eletrólito agressivo onde o Cloreto de Sódio (NaCl) está presente com uma concentração média de 3,5 %, outros sais à base de Mg, Ca e K, além de outros solutos em menor quantidade. A água do mar possui um pH por volta de 7 e com uma condutividade elétrica média de 3000 S.m⁻¹. A taxa de aeração depende de alguns fatores,

como: material exposto, aeração, temperatura e a quantidade de microorganismos existentes no meio.

Sabe-se também que estruturas submersas em meios com NaCl estão constantemente sujeitas à excessivas taxas de corrosão (NUNES, 2007; SHREIR, 1994; TALBOT e TALBOT, 1998). Na Tabela 1 são apresentados os íons predominantes na água do mar (MÁRQUEZ, 2016).

Tabela 1 - Íons predominantes na água do mar

| Íons Salinos | % em massa |
|-------------------------|------------|
| Cloreto (Cl^-) | 55,04 |
| Sódio (Na^+) | 30,61 |
| Sulfato (SO_4^{2-}) | 7,68 |
| Magnésio (Mg^{2+}) | 3,69 |
| Cálcio (Ca^{2+}) | 1,16 |
| Potássio (K^+) | 1,10 |

Fonte: Adaptado de Vieira, 2013.

A salinidade da água pode ser classificada como doces, salobras e salgadas, conforme mostrado na Tabela 2. É importante destacar que, mesmo que haja outros constituintes presentes na água eles são insignificantes perante a concentração de cloretos (que são predominantemente agressivos) (MARIANO, 2008).

Tabela 2 - Classificação da salinidade da água

| | |
|----------------|-------------------------------|
| Águas Doces | Salinidade < 0,05 % |
| Águas Salobras | Salinidade entre 0,05 % e 3 % |
| Águas Salinas | Salinidade > 3 % |

Fonte: Adaptado de Vieira, 2013.

O meio corrosivo mais comum onde os metais são expostos para o levantamento da resistência à corrosão (ASTM G61-86) é o ambiente que simula a água do mar (aquoso salino, ~3,56 %).

3.8 Ensaio de Névoa Salina

O ensaio de névoa salina é considerado como um dos métodos mais difundidos para testes de corrosão acelerada (KIOSIDOU; KARANTONIS; SAKALIS, 2018). Este ensaio simula condições encontradas em atmosferas marítimas, utilizando-se da exposição contínua

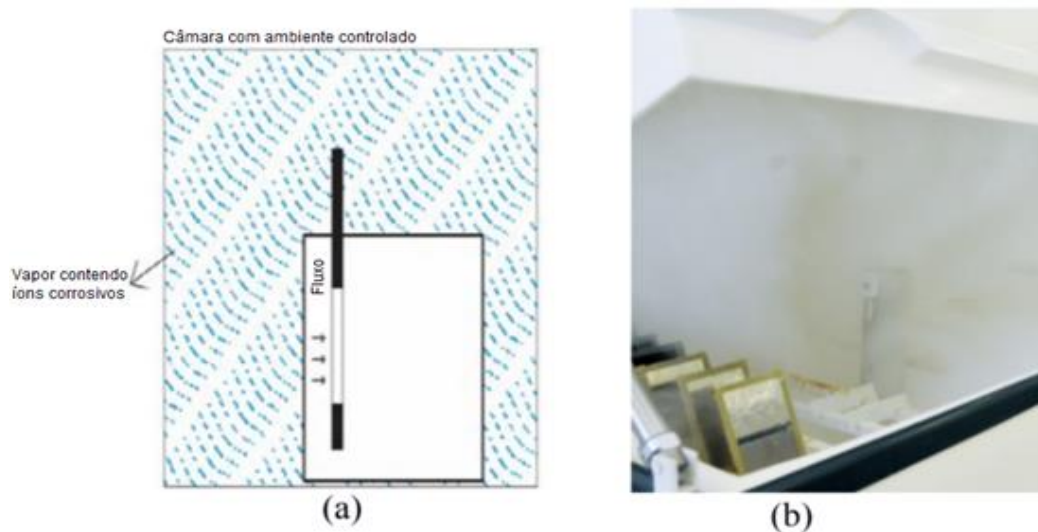
de névoa de solução de NaCl a uma concentração de 5 % em peso, temperatura de $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e pH variando entre 6,5 a 7,2, que leva as amostras a graus de corrosão muito elevados em um curto período de tempo (TRIPADALLI, 2012).

O objetivo do ensaio é permitir o controle dos fatores que contribuem para a corrosão de materiais, tais como temperatura, pressão, tipo de sal empregado, concentração da solução vaporizada, volume de solução aspergida e tempo entre cada aspersão. Porém, como são muitas variáveis a serem controladas o teste pode tornar-se complexo (MEIRA; FERREIRA, 2019).

Segundo Tripadalli (2012) o teste de névoa salina é realizado em uma câmara fechada com controle sobre as condições de exposição da amostra que é aspergida com solução salina vaporizada e, continuamente depositada na superfície da amostra (USMAN *et al.*, 2020).

É apresentado na Figura 7 (a) esquema da câmara de névoa salina contendo amostra submetida à incidência de vapor salino contendo íons corrosivos e (b) imagem real da câmara (MEIRA; FERREIRA, 2019).

Figura 7 – Esquema do ensaio em câmara de névoa salina em (a) e imagem da câmara em (b).



Fonte: MEIRA; FERREIRA, 2019.

3.9 Potencial de corrosão

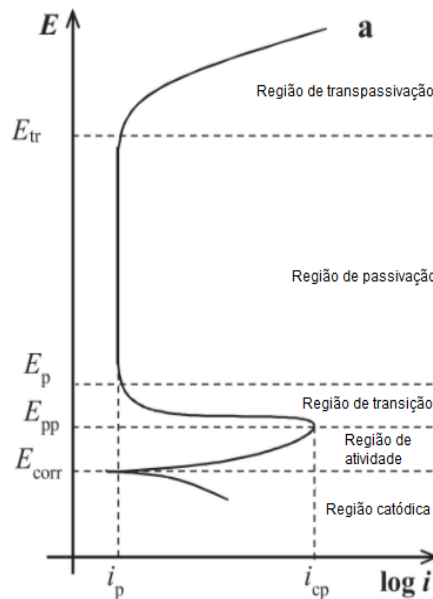
Para estudar o comportamento de corrosão de ligas metálicas em várias condições de exposição são utilizadas curvas de polarização anódica. O registro de curvas de polarização anódica por meio de estações de trabalho potenciostato/galvanostato é uma prática bastante comum para cientistas da corrosão que desejam estudar o comportamento ativo-passivo de ligas em contato com ambientes específicos. Tais ambientes podem ser idênticos ou uma simulação

das condições reais de exposição das ligas examinadas (BELLEZZE; GIULIANI; ROVENTI, 2018).

Normalmente, a abordagem típica usada para registrar curvas de polarização anódica é baseada no método potenciodinâmico e no padrão ASTM G5 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1994). Nesse método é utilizada uma célula de configuração de três eletrodos e um potencial linear em função do tempo é aplicado entre os eletrodos de trabalho e de referência, cuja corrente que passa pelos eletrodos de trabalho e contra-eletrodos pode ser medida (BELLEZZE; GIULIANI; ROVENTI, 2018).

Levando em consideração a área de trabalho do eletrodo, a densidade de corrente i , é calculada e os resultados deste teste são dados por um gráfico exibindo a curva E versus $\log i$, em que E é o potencial de eletrodo e $\log i$ é logaritmo da densidade de corrente (BELLEZZE; GIULIANI; ROVENTI, 2018), conforme é mostrado no gráfico da Figura 8.

Figura 8 – Representação esquemática de uma curva de polarização anódica genérica



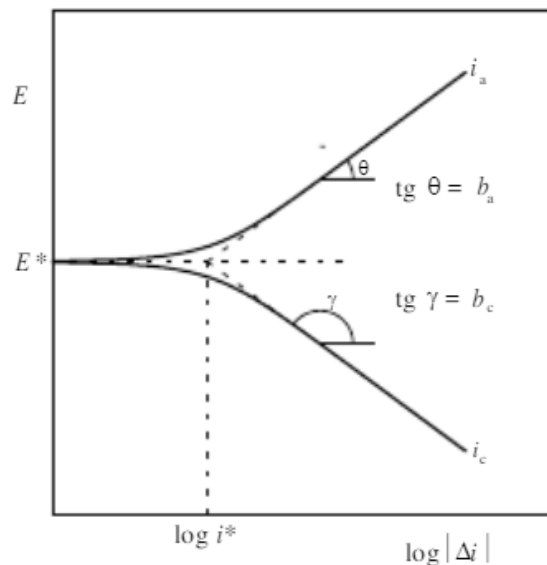
Fonte: BELLEZZE; GIULIANI; ROVENTI, 2018.

Uma boa prática na aquisição experimental da curva anódica é iniciar a polarização a partir de um leve potencial catódico (de 10 mV a 30 mV mais negativo do que o potencial de corrosão, E_{corr}). Esse gráfico esquemático mostra os parâmetros característicos que geralmente podem ser obtidos a partir da curva, diferente de E_{corr} : (i) a densidade de corrente crítica de passivação i_{cp} e o potencial primário passivo (ou passivação) correspondente E_{pp} , em que o filme passivo torna-se estável e a transição da liga ocorre do estado ativo para o passivo; (ii) o

i_p da corrente de passivação, em que a dissolução anódica da liga sofre uma redução significativa do i_{cp} , levando-o à condição de quase completa ausência de corrosão; (iii) o potencial de passivação E_{pas} , onde a passivação completa começa; (iv) o potencial de transpassivação E_{tr} , que pode ser obtido em correspondência a um aumento abrupto da densidade de corrente durante a varredura do potencial em direção a valores positivos (BELLEZZE; GIULIANI; ROVENTI, 2018).

Uma das principais leis da eletroquímica deve-se a Tafel. De acordo com a lei de Tafel, que foi observada empiricamente, o logaritmo da densidade de corrente em uma reação eletroquímica varia linearmente com o potencial do eletrodo, em potenciais removidos do potencial de repouso de circuito aberto (MCCAFFERTY, 2005). Na Figura 9 está representado graficamente o método de extrapolação das retas de Tafel.

Figura 9 – Representação gráfica do método de extrapolação das retas de Tafel.



Fonte: WOLYNEC, 2003.

No diagrama E versus $\log i$ identificado na Figura 9, apresentam-se as curvas de polarizações anódica i_a e catódica i_c , a densidade de corrente de troca i^* , que é a interseção das retas com o eixo de $\log |\Delta i|$, passando pelo potencial de corrosão E^* ($i=0$ para $i=\Delta i$). Verifica-se que nesse gráfico a extrapolação das retas de Tafel para o potencial de corrosão E^* determina o valor da taxa de corrosão i^* (WOLYNEC, 2003).

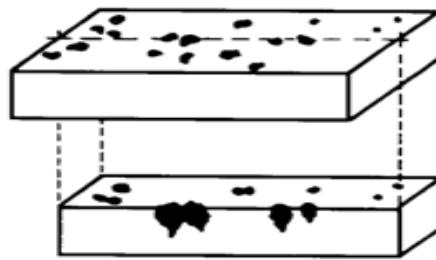
O método de exploração de Tafel é amplamente utilizado para encontrar-se o valor do potencial de corrosão através das curvas de polarização (DOMÉNECH-CARBÓ, 2020; FISCHER, 2019; LI, 2018).

3.10 Corrosão por pite

Gentil (2011) afirma que a corrosão por pite ocorre de forma localizada nas superfícies metálicas e é observada na forma de pites, isto é, cavidades que se apresentam em forma angulosa e tem profundidade geralmente maior que seu diâmetro.

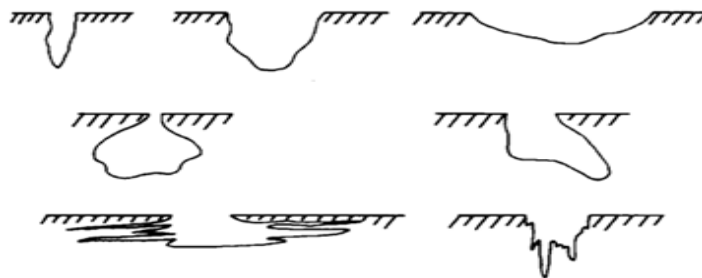
Conforme Jafarzadeh *et al.* (2019), a corrosão por pite ocorre basicamente da seguinte maneira: (1) Perda da passivação de uma pequena área da superfície, que se torna anódica; (2) Progressão da corrosão galvânica abaixo da região passivada, que se tornou catódica; (3) Ruptura do local do filme passivo na superfície, devido à corrosão subsuperficial. Na Figura 10 é apresentado um esquema da ocorrência de corrosão em forma de pites. Os pites podem ocorrer de várias formas, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 10 - Esquema de corrosão por pite.



Fonte: Adaptado de GENTIL, 1982.

Figura 11 - Várias formas de pite, segundo a ASTM G46-94.



Fonte: Adaptado de ASTM, 2005.

A corrosão por pite fornece pontos de iniciação para tensão, propagação de trinca ou fadiga por corrosão, que reduzem a vida útil do material (CHI; YI; LIU, 2020) e é considerada uma das causas mais comuns e catastróficas de falhas em estruturas metálicas (ZHANG, 2019).

Alguns dos fatores mais comuns que contribuem para a iniciação e propagação de corrosão por pite, segundo Bhandari *et al.* (2015), são:

- Danos químicos ou mecânicos localizados na película protetora de óxido;

- Fatores que podem causar a quebra de um filme passivo, como: acidez, baixa dissolução concentrações de oxigênio e altas concentrações de cloreto; estes são susceptíveis de se tornar um filme de óxido protetor menos estável e, assim, iniciar a corrosão;
- Danos localizados ou má aplicação do revestimento protetor;
- Presença de não uniformidades na estrutura metálica do componente, como não inclusões metálicas.

3.11 Ensaios eletroquímicos utilizados em corrosão por pite

O potencial de pite pode ser determinado por meio de distintas técnicas de polarização eletroquímica. Tem-se como exemplos: técnica potenciocinética ou potenciodinâmica, técnica potenciostática, técnica potenciodinâmica cíclica, método de “raspagem” eletroquímica, método galvanostático e temperatura crítica de pite, sendo a primeira a mais comum (WOLYNEC, 2003) e, portanto, será descrita a seguir.

Técnica de polarização

Sabe-se que na técnica de polarização potenciostática ou potenciodinâmica o metal é submerso dentro da solução aquosa de ensaio, que contém de 3,5 % a 4 % de NaCl. Faz-se o levantamento da curva de polarização do metal, na direção anódica a partir do potencial de corrosão E^* e com uma velocidade de varrimento padronizada (WOLYNEC, 2003).

Como utiliza-se um metal passivo, a densidade de corrente inicial é pequena, da ordem de 10^{-6} A/cm² a 10^{-5} A/cm² e, além disso, varia pouco com o aumento do potencial. Ao atingir o potencial de pite, o valor da densidade de corrente aumenta bruscamente. A intersecção da reta definida pela curva antes do aumento brusco da densidade de corrente com a reta definida pela curva após esse aumento define o valor do potencial de pite E_p (WOLYNEC, 2003).

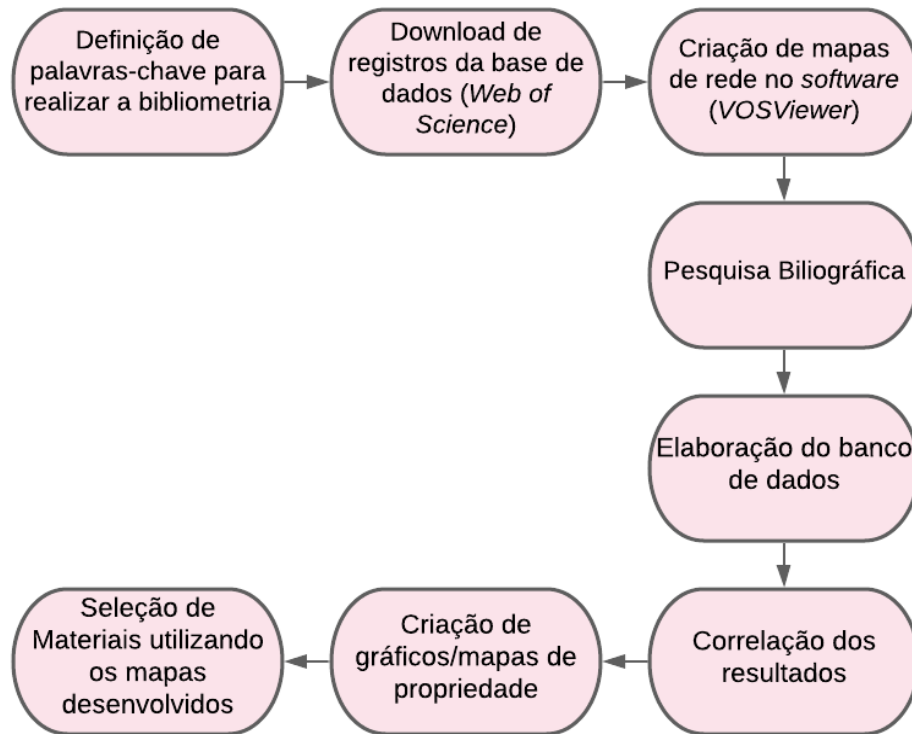
Por ser muito simples, essa técnica é amplamente utilizada na determinação do potencial de pite (WOLYNEC, 2003; AL SAADI et al., 2016; BRYTAN et al., 2016; BYEON; WU, 2019; SANNI et al., 2018; JEGDIĆ et al., 2019; LABIAPARI et al., 2019; SHOJAEI et al., 2019; TAO et al., 2019. No entanto, existem casos em que ocorre um aumento contínuo, não brusco, da densidade de corrente desde o início do levantamento da curva, tornando extremamente difícil a determinação do potencial de pite. É importante salientar que o valor do

potencial de pite medido pode ser maior que o real, devido à inércia do processo de varrimento de potencial (WOLYNEC, 2003).

4 METODOLOGIA

O fluxograma com as principais etapas realizadas neste trabalho é apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Etapas de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Próprio Autor.

4.1 Bibliometria

A bibliometria foi realizada (PEREIRA; OLIVEIRA; LEIVA, 2018) com o intuito de justificar as escolhas para a elaboração dos mapas de propriedade, analisando a correlação entre as palavras-chave dos artigos científicos mais atuais.

4.1.1 Base de dados para a geração dos mapas de rede

O resultado da bibliometria pode ser apresentado em forma de mapas de rede, que consiste em uma forma prática de analisar as palavras-chave e suas relações. A geração desses mapas foi realizada a partir da busca na base de dados do *Web of Science* – Coleção Principal (ALMEIDA *et al.*, 2020), através do acesso remoto concedido aos alunos do CEFET-MG e CEFET-RJ pelo portal de Periódicos da CAPES (Acesso CAFE).

Ao ser redirecionado ao *site*, foi realizada a procura através da opção de busca “Pesquisa Básica”, por meio da palavra-chave da pesquisa e, também, a partir da limitação de tempo de

publicações dos artigos. Para determinar a data de publicação, foi decidido recolher os documentos mais atuais e, devido ao número reduzido de documentos que poderíamos exportar por vez, foram realizados alguns testes para limitar o número de publicações apresentados.

As palavras-chave foram definidas (SHAH, 2019) a partir de leitura sobre o tema de corrosão, sendo elas:

- “*Pitting*”
- “*Corrosion Potential*”
- “*Pitting*” AND “*Corrosion Potential*”

O resultado gerado foi exportado ao *software* de planilhas, onde os dados foram tratados com o intuito de evitar que palavras iguais escritas de forma diferente fossem consideradas separadamente.

4.1.2 VosViewer

Para que os mapas de rede pudessem ser gerados, foi utilizado o *software* bibliométrico *VOSViewer* (1.6.15). Ele foi alimentado com os dados coletados da base *Web of Science* e, após aplicação de alguns filtros, foi gerado um mapa de redes que correlacionava as palavras-chave dos artigos.

Escolheu-se a opção de criar um mapa em que há a opção de ler a base de dados exportada do *Web of Science*. O tipo de análise escolhida foi a de co-ocorrências, onde apresenta-se o grau de interações entre as palavras-chave, cuja definição de número mínimo de ocorrências entre duas delas foi de pelo menos 15 vezes.

Cada palavra chave é apresentada como um nó na rede. Em caso de repetição das palavras-chave os nós aumentam de tamanho, portanto, quanto maiores, mais vezes foram mencionados e o número de citações em comum entre os termos é evidenciado pela espessura das linhas (PEREIRA; OLIVEIRA; LEIVA, 2018).

4.2 Pesquisa bibliográfica

A pesquisa bibliográfica foi realizada por meio de palavras-chave em variados *sites* de pesquisa (Google, Google Acadêmico, *Science Direct*, Portal da Capes e *sites* universitários do CEFET-MG e USFCAR). Foi estabelecido que a solução salina de aproximadamente 3,5 %

seria o meio utilizado para realizar o banco de dados e, para a criação do banco de dados foram utilizadas as palavras-chave que estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Palavras-chave utilizadas para as pesquisas de criação do banco de dados:

| Pesquisa |
|--|
| Corrosão de aço inoxidável ferrítico em meio NaCl tese |
| Corrosão alumínio meio salino tese |
| Corrosão alumínio NaCl |
| Corrosão Aço Ferrítico NaCl 3,5 % |
| Comparação dos resultados de corrosão metais em NaCl |
| Corrosão de aço inoxidável duplex em meio salino |
| Corrosão Aço Austenítico NaCl 3,5 % |
| Corrosão de cobre em meio salino |
| Corrosão cobre NaCl |
| Corrosão de alumínio em solução de NaCl |
| Corrosão de aço inoxidável martensítico em solução de NaCl |
| Corrosão de cobre em solução de NaCl |
| Corrosão alumínio NaCl |
| <i>Aluminium corrosion</i> NaCl |
| Corrosão alumínio NaCl |
| NAB corrosion NaCl |
| <i>Stainless steel corrosion</i> NaCl |
| Corrosão de Aço Duplex NaCl |
| <i>Copper corrosion</i> NaCl |
| <i>Copper alloy corrosion</i> NaCl |
| Corrosão Aço Martensítico NaCl 3,5 % |

Fonte: Próprio Autor.

4.3 Correlação de resultados

Após a busca nos *sites* de pesquisa e primeiro filtro, foram realizadas análises de alguns documentos e seleção das informações para a elaboração do banco de dados. As necessidades pré-estabelecidas foram: tipo de material; tratamento térmico; temperatura de ensaio; concentração do meio; variações de processamento; propriedades mecânicas; tempo de imersão; potencial de pite (E_p); potencial de corrosão (E_{corr}) e densidade de corrente (i_{corr}).

Como parte da criação da tabela, os dados foram tratados com correções, traduções e abreviações das frases, retirada da tolerância das células que seriam utilizadas para montagem do gráfico e conversão de valores encontrados para colocar todos na mesma unidade de medida. Foram descartadas as linhas que possuíam um número baixo dessas informações procuradas.

4.4 Gráficos/Mapas de Propriedade

A partir da planilha gerada com as informações coletadas foram criados, com o auxílio do gráfico de bolhas em *software* de planilhas, os seguintes mapas de propriedade:

- Limite de Escoamento x Potencial de Corrosão;
- Limite de Escoamento x Potencial de Pite;
- Limite de Escoamento/Densidade x Potencial de Corrosão;
- Limite de Escoamento x Densidade de Corrente;
- Limite de Escoamento/Densidade x Densidade de Corrente;
- Potencial de Corrosão x Densidade de Corrente;
- Potencial de Pite x Potencial de Corrosão.

4.5 Seleção de Materiais

Foi realizado um processo hipotético de seleção de materiais de um produto aplicado em ambiente corrosivo. De acordo com o método proposto por Ashby (2012), o primeiro passo foi estabelecer os atributos do projeto.

Inicialmente, foi definido que o requisito obrigatório seria o alto valor de limite de escoamento do material, de modo a permitir alta resistência mecânica em uma baixa seção de área de material. Como requisito desejável, porém não obrigatório, determinou-se a minimização da massa final do produto. Além disso, como o produto estará inserido em meio corrosivo, deve-se levar em consideração a tendência termodinâmica do material em sofrer corrosão.

A partir dos atributos estabelecidos, foram definidos valores mínimos de limite de escoamento/densidade, potencial de corrosão e densidade de corrente, sendo eles 37, -400 mV e $0,00088 \mu A/cm^2$ respectivamente. Os demais foram descartados da análise.

Os índices de mérito foram definidos e calculados para cada análise (YAZDANI; PAYAM, 2015), descrevendo os requisitos como equações de projeto. Estabeleceram-se relações matemáticas de forma a determinar que, quanto maior o índice de mérito mais as propriedades do material se adequam aos requisitos. Além disso, a partir da definição dos

índices de mérito encontraram-se os diagramas mais adequados para aplicá-los, sendo eles o de limite de escoamento/densidade *versus* potencial de corrosão e o de limite de escoamento/densidade *versus* densidade de corrente.

A relação entre limite de escoamento e densidade foi o primeiro parâmetro avaliado para a seleção de materiais. A partir desse requisito inicial foi possível estabelecer o primeiro índice de mérito do projeto. Neste cálculo, o índice de mérito 1 (IM 1), apresentado na Equação 1, é diretamente proporcional ao limite de escoamento e inversamente proporcional à densidade.

$$IM\ 1 = \frac{\text{Limite de escoamento}}{\text{Densidade}} \quad (1)$$

O potencial de corrosão (E_{corr}) foi outro parâmetro analisado. Quanto maior o E_{corr} , menor é a tendência termodinâmica do material em sofrer corrosão e, portanto, maior sua resistência termodinâmica ao processo corrosivo (WOLYNEC, 2003). Dessa forma, foi estabelecido o segundo índice de mérito (IM 2), indicado na Equação 2, sendo este diretamente proporcional ao potencial de corrosão:

$$IM\ 2 = E_{corr} \quad (2)$$

As ligas ferrosas em geral, como os aços inoxidáveis, têm menor tendência termodinâmica aos processos corrosivos que as ligas de alumínio e de cobre. No entanto, a taxa de corrosão das ligas ferrosas é diretamente proporcional à densidade de corrente, portanto foi aplicado um terceiro índice de mérito (IM 3), indicado na Equação 3:

$$IM\ 3 = \frac{1}{i_{corr}} \quad (3)$$

Para este atributo, o índice de mérito é inversamente proporcional à densidade de corrente.

A partir do diagrama e do cálculo do primeiro índice de mérito, foi estabelecida uma lista com os 20 materiais que melhor atenderam ao atributo analisado, excluindo aqueles cuja matriz do material era a mesma, havendo alteração apenas no revestimento ou concentração deste. Aplicando o segundo índice de mérito para os 20 materiais, foram selecionados os 15 com maiores valores e, então, aplicou-se um terceiro índice de mérito, escolhendo os 10 primeiros em ordem decrescente. Após a determinação dos índices de mérito foi feito um somatório de todos os valores encontrados dispostos em ordem decrescente, a fim de se sugerir os materiais que melhor desempenhariam sua função atendendo aos atributos do projeto.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Bibliometria

5.1.1 Base de dados para a geração dos mapas de rede

Após acessar a base de dados do *Web of Science*, foram realizadas três pesquisas, gerando três bases de dados diferentes; todas elas com o filtro inicial de anos entre 2010 e 2020. Foram alcançados os seguintes resultados para cada pesquisa:

- “*Pitting*” - 11.236 registros;
- “*Corrosion Potential*” - 3.568 registros;
- “*Pitting*” AND “*Corrosion Potential*” - 604 registros.

Levando em consideração que só é possível exportar 500 registros por vez, para a pesquisa de “*Pitting*”, foi realizado um novo filtro, considerando apenas o ano de 2020, obtendo-se 1.107 resultados. Para a pesquisa “*Corrosion Potential*” foi realizado um novo filtro, selecionando apenas os registros dos anos de 2019 e 2020 e obteve-se 822 registros. Como o número da pesquisa “*Pitting*” AND “*Corrosion Potential*” já estava bem próximo do que se desejava exportar, não foi realizado mais nenhum filtro.

Todas as pesquisas foram exportadas com 500 unidades de registro, considerando as opções “Registro completo e Referências citadas” para ter todos os conteúdos disponíveis pela base e “Texto sem formatação”, que é o formato de arquivo reconhecido pelo *software* utilizado.

5.1.2 VosViewer

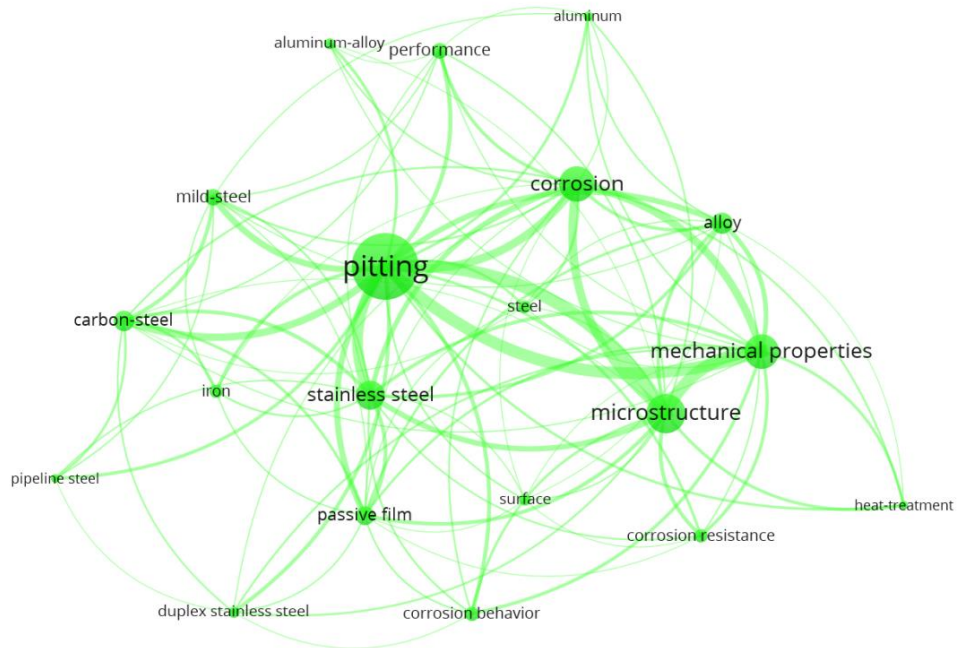
Palavras duplicadas ou com alguma variação na grafia foram unificadas, como é o exemplo de *Stainless-Steel* e *Stainless Steel*, *Alloy* e *Alloys*. Após a correção, a base de dados foi novamente aplicada ao *VOSViewer*, retirando as palavras-chaves que não possuíam conexão com o tema, como exemplo:

- *Wear*;
- *Initiation*;
- *Microbiology Influence Corrosion*;

- *Eletromechanical Impedance Spectroscopy.*

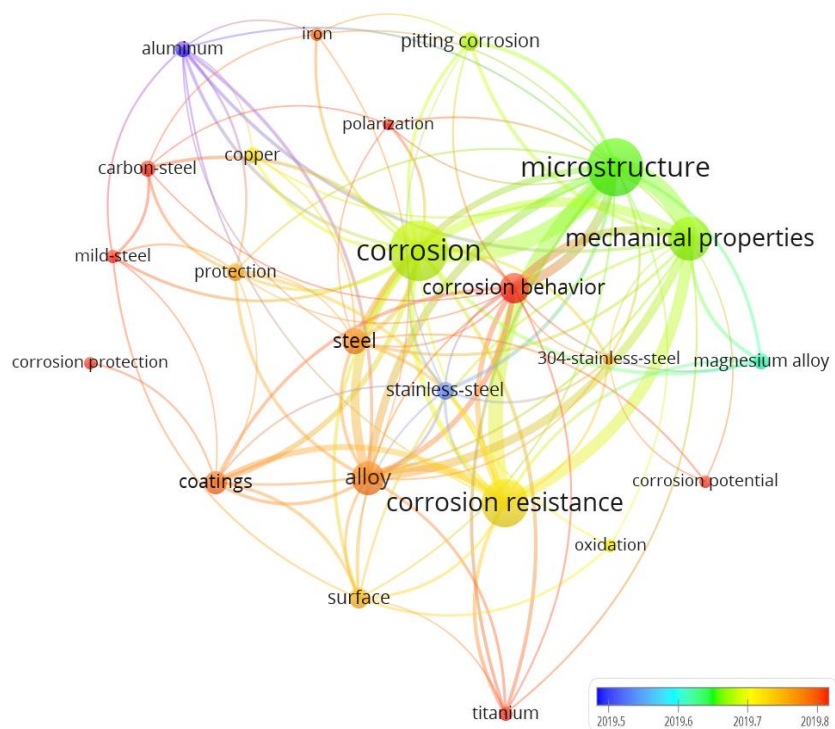
Em seguida foram gerados os gráficos correspondentes a cada uma das palavras-chave utilizadas, os quais são apresentados nas Figura 13, Figura 14, e Figura 15.

Figura 13 - Mapa de rede da palavra-chave “Pitting”



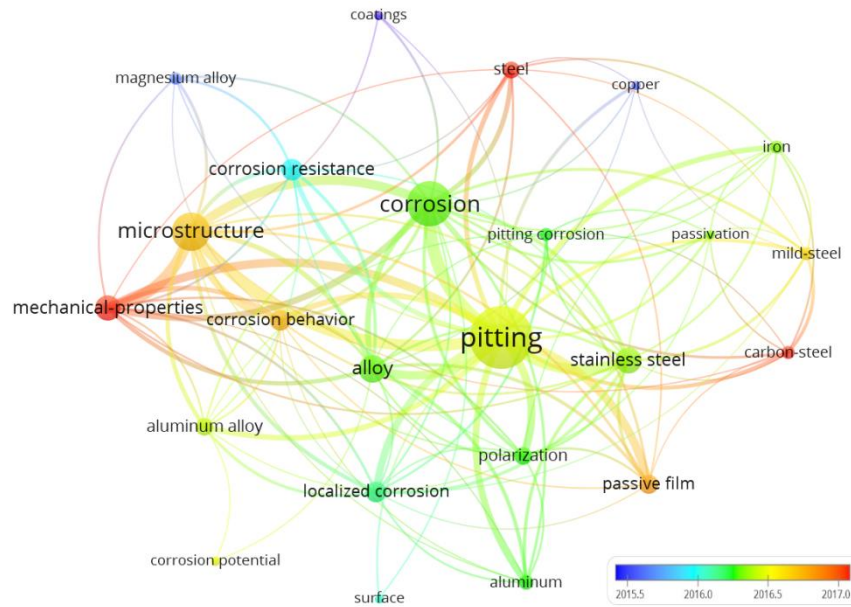
Fonte: Próprio autor.

Figura 14 - Mapa de rede da palavra-chave “Corrosion Potential”



Fonte: Próprio Autor.

Figura 15 - Mapa de rede das palavras-chave “Pitting” AND “Corrosion Potential”



Fonte: Próprio Autor.

Os mapas estão apresentados em inglês devido à pesquisa da base de dados do *Web of Science*. As traduções são: *Alloy* – Ligas; *Aluminum* – Alumínio; *Aluminum-alloy* – Ligas de alumínio; *Carbon-steel* – Aço-carbono; *Steel* – Aço; *Coatings* – Revestimentos; *Copper* – Cobre; *Corrosion* – Corrosão; *Corrosion behavior* – Comportamento corrosivo; *Corrosion potential* – Potencial de corrosão; *Corrosion protection* – Proteção contra corrosão; *Corrosion resistance* – Resistência à corrosão; *Duplex stainless steel* – Aço inoxidável duplex; *Heat-treatment* – Tratamento térmico; *Iron* – Ferro; *Localized corrosion* – Corrosão localizada; *Magnesium alloy* – Ligas de magnésio; *Mechanical properties* – Propriedades mecânicas; *Microstructure* – Microestrutura; *Mild-steel* – Aço macio; *Oxidation* – Oxidação; *Passive film* – Camada passiva; *Pipeline steel* – Tubulação de aço; *Pitting* – Pite; *Pitting corrosion* – Corrosão por pite; *Polarization* – Polarização; *Protection* – Proteção; *Stainless steel* – Aço inoxidável; *Surface* – Superfície; *Titanium* – Titânio.

O posicionamento das palavras no mapa de rede tem relação se os termos são de assuntos mais centrais ou periféricos, como os termos *pitting* e *corrosion*, os quais se encontram em posição central; o que é válido considerando que o assunto procurado era referente a essas palavras.

O *software VOSViewer*, através da análise da base de dados aplicada, identifica possíveis grupos de afinidade ou proximidade chamados *Clusters* (SHAH *et al.*, 2019). No caso do presente estudo, os *clusters* não formaram grupos que fizessem sentido lógico para o assunto

comentado, como separar os materiais das propriedades ou fazer associações entre palavras correlatas.

Por isso, foi decidido apresentar os gráficos com base nos períodos de publicação. O mapa de rede referente ao tema “*Pitting*”, é apresentado em apenas uma cor, visto que todos os registros são procedentes do início do ano de 2020. Já outros temas apresentam variações de cores que, conforme a legenda apresentada, refere-se àquela palavra que foi mais fortemente utilizada nos registros coletados. Na Figura 14 nota-se que as palavras relacionadas aos materiais metálicos e resistência à corrosão são as mais mencionadas no último ano.

Quando é feita a análise da Figura 15, observa-se que os aços e as propriedades mecânicas relacionadas à microestrutura e comportamento corrosivo são as mais mencionadas no último ano.

Ao analisar a dimensão do diâmetro do nó referente aos aços inoxidáveis, que é maior quando comparado a outros materiais, nota-se que há uma maior quantidade de publicações que tratam desses materiais. Além disso, os aços inoxidáveis ocupam posição central no gráfico admitindo que possui grande relação com as palavras ao redor. Em contrapartida, outros materiais como alumínio e suas ligas, cobre, ferro, ligas de magnésio e aço carbono encontram-se em posição periférica e em quantidades menores, o que sugere que devem ser mais abordadas em estudos relacionados à corrosão.

Dessa forma, no presente trabalho determinou-se que a pesquisa bibliográfica relacionada ao banco de dados para criação dos mapas de propriedade seria feita com base nos materiais mais abordados: os aços inoxidáveis. A partir daí estes foram comparados a alguns dos materiais menos publicados, os quais são as ligas de alumínio e de cobre.

5.2 Pesquisa Bibliográfica

Através das informações da análise bibliométrica, os materiais identificados como sendo os mais utilizados para meios corrosivos foram:

- Aço inoxidável austenítico;
- Aço inoxidável duplex;
- Aço inoxidável ferrítico;

- Aço inoxidável martensítico e supermartensítico;
- Ligas de alumínio;
- Ligas de cobre.

Na Tabela 4 é possível observar relação entre as pesquisas realizadas em diferentes *sites* e resultados encontrados.

Tabela 4 – Relação entre as pesquisas realizadas em diferentes *sites* e resultados encontrados.

| Pesquisa | Resultados | Sites de Pesquisa |
|--|-------------------|--------------------------|
| Corrosão de aço inoxidável ferrítico em meio NaCl tese | 16800 | Google |
| Corrosão alumínio meio salino tese | 46200 | Google |
| Corrosão alumínio NaCl | 80600 | Google |
| Corrosão Aço Ferrítico NaCl 3,5 % | 23139 | Portal Capes |
| Comparação dos resultados de corrosão metais em NaCl | 157000 | Google |
| Corrosão de aço inoxidável duplex em meio salino | 17700 | Google |
| Corrosão Aço Austenítico NaCl 3,5 % | 23122 | Portal Capes |
| Corrosão de cobre em meio salino | 43600 | Google |
| Corrosão cobre NaCl | 6250 | Google acadêmico |
| Corrosão de alumínio em solução de NaCl | 90200 | Google |
| Corrosão de aço inoxidável martensítico em solução de NaCl | 17700 | Google |
| Corrosão de cobre em solução de NaCl | 141000 | Google |
| Corrosão alumínio NaCl | 7310 | Google acadêmico |
| <i>Aluminium corrosion</i> NaCl | 16971 | <i>ScienceDirect</i> |
| Corrosão alumínio NaCl | 16942 | Portal Capes |
| <i>NAB corrosion</i> NaCl | 171 | <i>ScienceDirect</i> |
| <i>Stainless steel corrosion</i> NaCl | 15696 | <i>ScienceDirect</i> |
| Corrosão de Aço Duplex NaCl | 23153 | Portal Capes |
| <i>Copper corrosion</i> NaCl | 13919 | <i>ScienceDirect</i> |
| <i>Copper alloy corrosion</i> NaCl | 9169 | <i>ScienceDirect</i> |
| Corrosão Aço Martensítico NaCl 3,5 % | 23130 | Portal Capes |

Fonte: Próprio Autor

Grande parte das teses que foram utilizadas para coletar as informações para o banco de dados foram encontradas no Google e Google Acadêmico.

Apesar desses *sites* apresentarem resultados diversos sobre os assuntos, foi o local onde mais encontrou-se teses com informações relevantes. Já os artigos foram coletados em sua

maioria no *Science Direct*, devido à sua grande relevância acadêmica e dados fundamentais para este trabalho.

No Catálogo de Teses e Dissertações do Portal da Capes não foram encontrados documentos relevantes. Mesmo com o uso de filtros e palavras-chaves, os resultados não trouxeram informações úteis para a produção do banco de dados com as informações pré-estabelecidas.

5.3 Correlação dos Resultados

Dos materiais consultados foram selecionados 95 documentos mais relevantes ao tema das pesquisas, destes, 54 foram descartados por não possuírem as especificações e valores relevantes à pesquisa. Por fim, 41 documentos, dentre eles, teses, artigos e dissertações foram utilizados para a criação do banco de dados, destes, 30 foram utilizados na criação dos gráficos apresentados neste trabalho.

Na Tabela 5 é possível observar os materiais e as demais informações que foram encontradas e listadas. Nota-se que, na maioria das vezes, os autores optaram por informar apenas o potencial de corrosão, deixando de informar o potencial de pite. Por meio da análise dos documentos estudados, verificou-se também que 79% dos testes de corrosão em imersão salina utilizados, considera-se concentração de NaCl igual a 3,5 %.

Tabela 5 – Resultados encontrados após análise dos documentos coletados. (Continua)

| Material | Variações de Processamento / Tratamento Térmico | T. Ens. (°C) | C. Meio (%) | LE (Mpa) | Dens. (g/cm ³) | Mód. Young (Gpa) | Pot. De Pite – Ep (mV) | Pot. Pite TOL. (±) | Pot. Cor. Ecorr (mV) | Pot. Cor. TOL. (±) | Dens. Cor. Icorr (µA/cm ²) | Dens. Cor. TOL. (±) |
|----------------|---|--------------|-------------|----------|----------------------------|------------------|------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--|---------------------|
| AISI 316L | - | 25 | 3 | 290 | 8 | 200 | 281 | 40 | -91 | 6 | 0,16 | 0,04 |
| AISI 316L | Revestido ZrN | 25 | 3 | 290 | 8 | 200 | 282 | 30 | -12 | 7 | 0,007 | 0,004 |
| AISI 316L | Revestido ZrSiN – 2,5 % | 25 | 3 | 290 | 8 | 200 | 241 | 29 | -31 | 30 | 0,0096 | 0,001 |
| AISI 316L | Revestido ZrSiN – 5,6 % | 25 | 3 | 290 | 8 | 200 | 277 | 30 | -21 | 27 | 0,014 | 0,008 |
| AISI 316L | Revestido ZrSiN – 12,3 % | 25 | 3 | 290 | 8 | 200 | 279 | 30 | 40 | 16 | 0,006 | 0,0009 |
| SAF 2304 | - | 25 | 3 | 460 | 7,7 | 200 | 351 | 11 | -105 | 23 | 0,16 | 0,08 |
| SAF 2304 | Revestido ZrN | 25 | 3 | 460 | 7,7 | 200 | 572 | 40 | 13 | 10 | 0,0086 | 0,0018 |
| SAF 2304 | Revestido ZrSiN – 2,5 % | 25 | 3 | 460 | 7,7 | 200 | 627 | 50 | 36 | 13 | 0,012 | 0,01 |
| SAF 2304 | Revestido ZrSiN – 5,6 % | 25 | 3 | 460 | 7,7 | 200 | 465 | 9 | 42 | 10 | 0,0057 | 0,0008 |
| SAF 2304 | Revestido ZrSiN – 12,3 % | 25 | 3 | 460 | 7,7 | 200 | 436 | 80 | 3 | 27 | 0,0104 | 0,0028 |
| AISI 316 | - | 24 | 3,5 | 310 | 7,9 | 200 | | | -110 | 3 | 0,389 | 0,012 |
| AISI 304 | - | 25 | 3 | 295 | 7,8 | 200 | -94 | | -180 | | 0,73 | |
| AISI 304 | Recobrimento PANI dopado | 25 | 3 | 295 | 7,8 | 200 | 20 | | -144 | | 0,658 | |
| AISI 304 | Recobrimento PANI desdopado | 25 | 3 | 295 | 7,8 | 200 | 54 | | -55 | | 0,514 | |
| AISI 420 | - | 25 | 3 | 350 | 7,7 | 220 | -325 | | -377 | | 3,845 | |
| AISI 420 | Recobrimento PANI dopado | 25 | 3 | 350 | 7,7 | 220 | -298 | | -354 | | 2,855 | |
| AISI 420 | Recobrimento PANI desdopado | 25 | 3 | 350 | 7,7 | 220 | -285 | | -321 | | 2,855 | |
| AISI 430 | - | 25 | 3 | 260 | 7,7 | 200 | -106 | | -195 | | 0,455 | |
| AISI 430 | Recobrimento Pani dopado | 25 | 3 | 260 | 7,7 | 200 | -52 | | -150 | | 0,358 | |
| AISI 430 | Recobrimento Pani desdopado | 25 | 3 | 260 | 7,7 | 200 | 4 | | -97 | | 0,283 | |
| ASTM 487 CA6NM | - | 25 | 3,5 | 550 | 7,69 | | | | -0,03 | | 5,662 | |
| ASTM 487 CA6NM | Temperado e Revenido | 25 | 3,5 | 689 | 7,69 | | | | 0,25 | | 0,9383 | |
| UNS S31803 | Laminado a frio / CR | 25 | 3,5 | 250 | 7,8 | 200 | 988 | 18 | -158 | 20 | | |
| UNS S31803 | Laminado a frio / Conformado | 25 | 3,5 | 250 | 7,8 | 200 | 982 | 17 | -158 | 12 | | |
| UNS S31803 | Laminado a frio / Soldado | 25 | 3,5 | 250 | 7,8 | 200 | 964 | 92 | -214 | 63 | | |
| AISI 304 | - | 25 | 3,5 | 295 | 7,8 | 200 | 120 | 19 | -289,1 | | | |
| AISI 304L | - | 25 | 3,5 | 300 | 7,8 | 200 | | | -281 | | 0,876 | |
| AISI 304L | Revestimento de Mo | 25 | 3,5 | 300 | 7,8 | 200 | | | -265 | | 0,0314 | |

Tabela 5 – Resultados encontrados após análise dos documentos coletados. (Continuação)

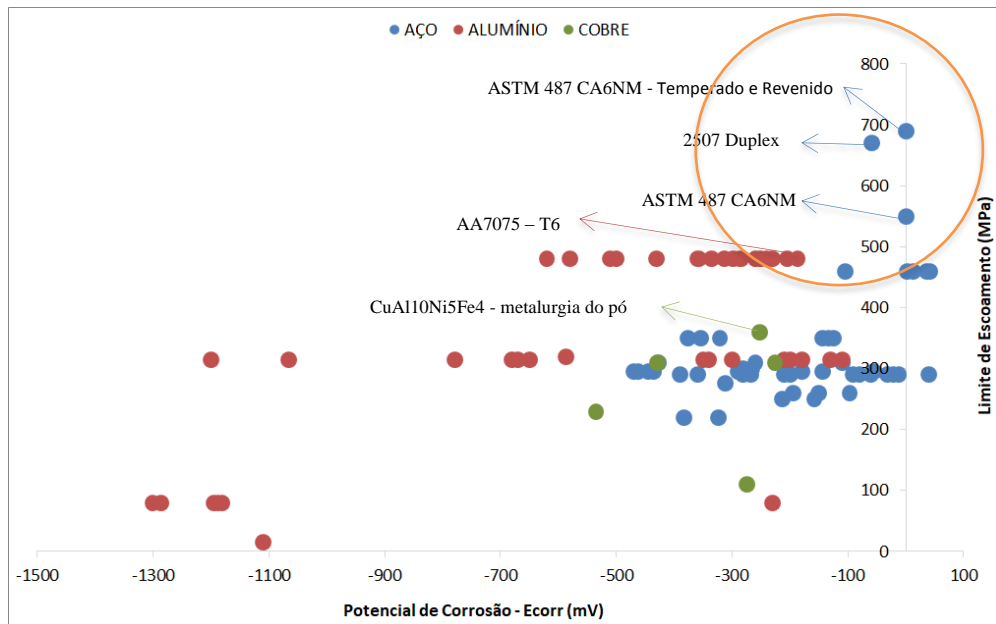
| | | | | | | | | | | | | |
|--|---|----|-----|-----|-----|-----|------|----|-------|----|-----------|---------|
| AISI 304L | Recozido | 25 | 3,5 | 220 | 7,8 | 200 | | | -383 | | 3,289 | |
| AISI 304L | Revestimento de Mo e recozido | 25 | 3,5 | 220 | 7,8 | 200 | | | -323 | | 0,292 | |
| AISI 304 | - | 25 | 3,5 | 295 | 7,8 | 200 | 120 | | -289 | | | |
| AISI 304 | - | 25 | 3,5 | 295 | 7,8 | 200 | 278 | | -470 | | 6,11 | |
| AISI 316 | - | 25 | 3,5 | 310 | 7,9 | 200 | 590 | | -427 | | 2,23 | |
| AISI 316L | - | 25 | 3,5 | 290 | 8 | 200 | 100 | | -200 | | | |
| AISI 410 | - | 25 | 3,5 | 276 | 7,7 | 190 | -250 | | -312 | | | |
| AISI 420 | - | 25 | 3,5 | 350 | 7,7 | 220 | 138 | 11 | -125 | 8 | | |
| AISI 420 | 25 % laminado | 25 | 3,5 | 350 | 7,7 | 220 | 91 | 40 | -133 | 7 | | |
| AISI 420 | 50 % laminado | 25 | 3,5 | 350 | 7,7 | 220 | 37 | 9 | -143 | 9 | | |
| AISI 304 | - | 25 | 3,5 | 295 | 7,8 | 200 | | | -268 | | 0,447 | |
| 2507 Duplex | - | 25 | 3,5 | 670 | 7,8 | 210 | 1090 | | -59 | | 0,826 | |
| AISI 316L | - | 25 | 3,5 | 290 | 8 | 200 | | | -359 | | 7,7 | |
| AISI 444 | (UNS S44400 SFSS) | 25 | 3,5 | 310 | 7,7 | 200 | 920 | | -260 | | 6,9 | |
| AISI 304 | - | 25 | 3,5 | 295 | 7,8 | 200 | 423 | | -435 | | 3,827 | |
| AISI 304 | Laser potência 1,75 kW e varredura de 12 mm/s | 25 | 3,5 | 295 | 7,8 | 200 | -861 | | -462 | | 1,616 | |
| AISI 304 | Laser potência 1,75 kW e varredura 30 mm/s | 25 | 3,5 | 295 | 7,8 | 200 | -116 | | -445 | | 3,555 | |
| AISI 316L | - | 25 | 3,5 | 290 | 8 | 200 | | | -390 | | 1,955 | |
| AISI 316L | Revestimento à laser – fluência de 2,69 J/cm² | 25 | 3,5 | 290 | 8 | 200 | | | -210 | | 0,1678 | |
| AISI 316L | Revestimento à laser – fluência de 3,96 J/cm² | 25 | 3,5 | 290 | 8 | 200 | | | -80 | | 0,562 | |
| AISI 316L | Revestimento à laser – fluência de 6,28 J/cm² | 25 | 3,5 | 290 | 8 | 200 | | | -60 | | 0,501 | |
| AISI 316L | Revestimento à laser – fluência de 8,14 J/cm² | 25 | 3,5 | 290 | 8 | 200 | | | -281 | | 0,275 | |
| AISI 316L | Revestimento à laser – fluência de 9,55 J/cm² | 25 | 3,5 | 290 | 8 | 200 | | | -268 | | 0,354 | |
| AA5052 | Revestido com KCS | 25 | 3,5 | 15 | 2,7 | 68 | | | -1110 | | | |
| AA5052 | - | 25 | 3,5 | 80 | 2,7 | 68 | | | -230 | | 0,0000645 | |
| AA7075 | - | 20 | 3,5 | 315 | 3 | 70 | | | -1065 | | 5,701 | |
| AA7075 | Com laser 17 GW/cm² | 20 | 3,5 | 315 | 3 | 70 | | | -778 | | 0,833 | |
| AA5052 | - | 25 | 3,5 | 80 | 2,7 | 68 | -939 | 4 | -1301 | 2 | 6,53 | 0,23 |
| AA5052 | Revestido com KGM – 50 ppm | 25 | 3,5 | 80 | 2,7 | 68 | -928 | 3 | -1286 | 4 | 1,31 | 0,02 |
| AA5052 | Revestido com KGM – 100 ppm | 25 | 3,5 | 80 | 2,7 | 68 | -907 | 3 | -1195 | 5 | 1,12 | 0,05 |
| AA5052 | Revestido com KGM – 150 ppm | 25 | 3,5 | 80 | 2,7 | 68 | -848 | 5 | -1188 | 6 | 0,54 | 0,03 |
| AA5052 | Revestido com KGM – 200 ppm | 25 | 3,5 | 80 | 2,7 | 68 | -806 | 2 | -1181 | 3 | 0,39 | 0,02 |
| AA7075 | - | 25 | 3,5 | 315 | 3 | 70 | | | -1200 | | | |
| AA2024-T3 | - | 25 | 3,5 | 320 | 3 | 71 | | | -587 | | | |
| AA7075 | - | 25 | 3,5 | 315 | 3 | 70 | | | -350 | | 0,15 | |
| AA7075 | Jato de plasma (pintada) 20s | 25 | 3,5 | 315 | 3 | 70 | | | -340 | | 0,33 | |
| AA7075 | Jato de plasma (pintada) 30s | 25 | 3,5 | 315 | 3 | 70 | | | -200 | | 0,066 | |
| AA7075 | Jato de plasma (pintada) 40s | 25 | 3,5 | 315 | 3 | 70 | | | -210 | | 0,032 | |
| AA7075 | Jato de plasma (pintada) 60s | 25 | 3,5 | 315 | 3 | 70 | | | -300 | | 0,016 | |
| AA7075 | DBD (pintada) 5 min | 25 | 3,5 | 315 | 3 | 70 | | | -180 | | 0,034 | |
| AA7075 | DBD (pintada) 7,5 min | 25 | 3,5 | 315 | 3 | 70 | | | -110 | | 0,024 | |
| AA7075 | DBD (pintada) 10 min | 25 | 3,5 | 315 | 3 | 70 | | | -130 | | 0,027 | |
| AA7075 | DBD (pintada) 15 min | 25 | 3,5 | 315 | 3 | 70 | | | -110 | | 0,019 | |
| AA7075 | Não tratada (sem pintura) | 25 | 3,5 | 315 | 3 | 70 | | | -670 | | 0,5 | |
| AA7075 | DBD (sem pintura) | 25 | 3,5 | 315 | 3 | 70 | | | -650 | | 0,49 | |
| AA7075 | Jato de plasma (sem pintura) | 25 | 3,5 | 315 | 3 | 70 | | | -680 | | 0,21 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI200 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -298 | | 0,00088 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI400 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -234 | | 0,00086 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI600 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -205 | | 0,0001 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI800 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -313 | | 0,00024 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI1000 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -287 | | 0,00069 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI1200 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -336 | | 0,00013 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI200 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -285 | | 0,00088 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI400 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -252 | | 0,00086 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI600 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -187 | | 0,0001 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI800 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -251 | | 0,00024 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI1000 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -313 | | 0,00069 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI1200 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -358 | | 0,00013 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI/PVC 1/1 B200 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -620 | | 0,003 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI/PVC 1/1 B400 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -510 | | 0,0021 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI/PVC 1/1 B600 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -360 | | 0,0011 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI/PVC 1/1 B800 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -260 | | 0,00047 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI/PVC 1/1 B1000 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -230 | | 0,00074 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI/PVC 1/1 B200 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -580 | | 0,003 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI/PVC 1/1 B400 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -500 | | 0,0021 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI/PVC 1/1 B600 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -430 | | 0,0011 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI/PVC 1/1 B800 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -360 | | 0,00047 | |
| AA7075-T6 | Revestimento PANI/PVC 1/1 B1000 | 25 | 3,5 | 480 | 3 | 70 | | | -240 | | 0,00074 | |
| CuAl ₁₀ Ni ₃ Fe ₄ | - | 25 | 3,5 | 360 | 8,2 | 120 | | | -252 | | 6,68 | |
| NAB | - | 25 | 3,5 | 310 | 8,3 | 120 | | | -226 | | 0,8 | |
| Cobre eletrolítico | - | 25 | 3,5 | 229 | 9 | 120 | | | -535 | | 0,00307 | |
| CuNi ₁₀ | - | 25 | 3,5 | 110 | 8,9 | 120 | | | -274 | | 0,01831 | 0,00038 |
| MAB | - | 25 | 3,5 | 310 | 8,2 | 130 | | | -429 | 25 | 4,94 | 2,48 |

Fonte: Próprio Autor.

5.4 Gráficos/Mapas de Propriedade

A Figura 16 foi elaborada na hipótese de um determinado projeto de produto aplicado em meio aquoso salino, cujo objetivo foi reduzir o diâmetro do material suportando elevadas cargas de trabalho, além de otimizar a resistência à corrosão.

Figura 16 – Limite de Escoamento x Potencial de Corrosão.

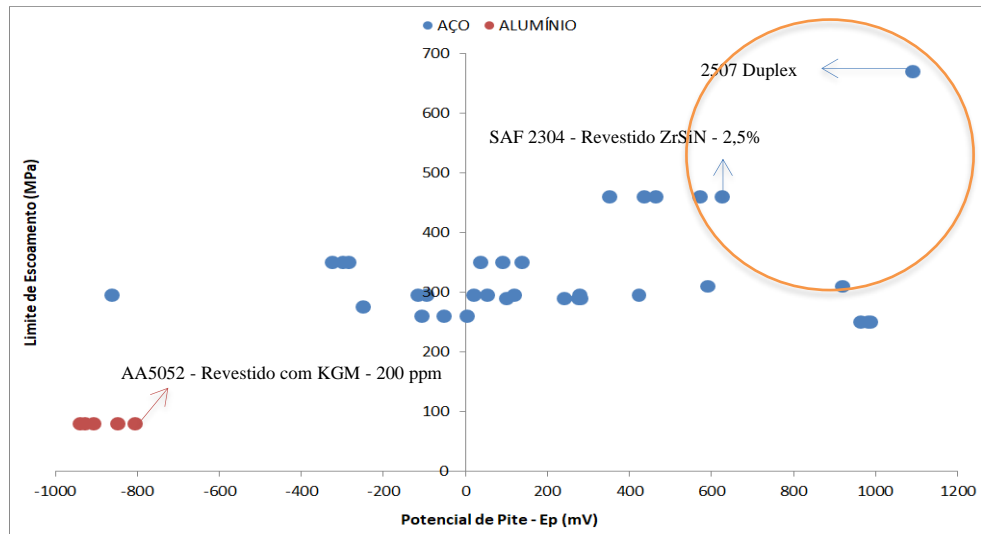


Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que os materiais capazes de otimizar esse projeto se encontrariam de forma prioritária dentro do local demarcado, onde é possível encontrar os maiores valores de potencial de corrosão, que garante uma maior resistência à corrosão, e maiores valores de tensão de falha, que permite haver alta resistência em uma baixa seção de material.

A Figura 17 foi criada em um projeto considerando a necessidade de aumentar a resistência à corrosão por pite aliada a uma alta tensão de falha, de modo a propiciar redução de espessura e aumento da segurança do produto.

Figura 17 – Limite de Escoamento x Potencial de Pite.

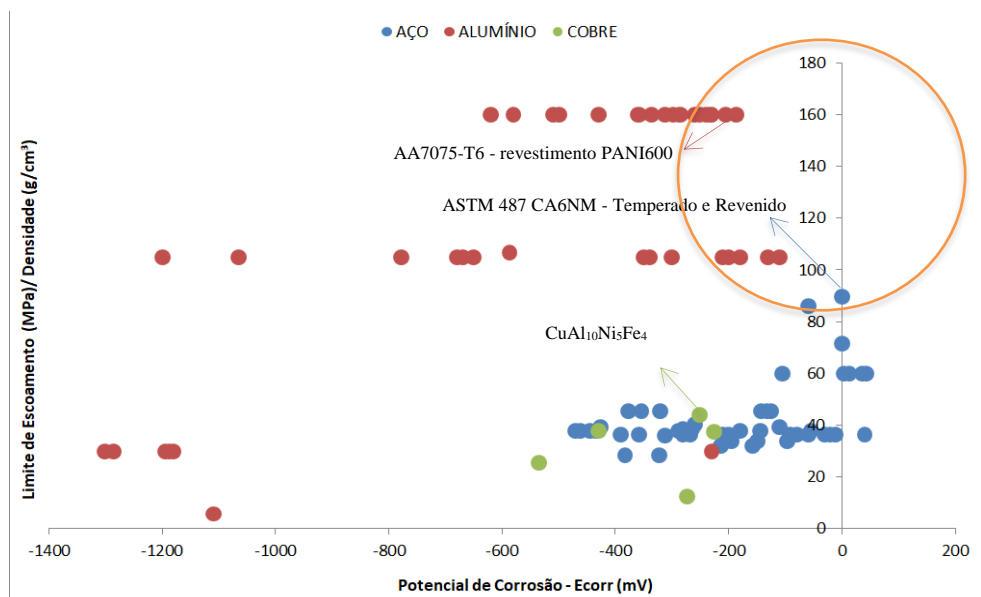


Fonte: Próprio Autor.

Um material que tenha elevada resistência à corrosão por pite, possui o E_p elevado. Sendo assim, é provável que a melhor opção desse projeto se encontre na área demarcada do gráfico, onde se observa a combinação dos maiores valores de resistência ao pite e limite de escoamento.

Sabendo-se que o índice de mérito de tensão de falha por densidade do material é utilizado em projetos onde se quer reduzir a massa final do produto, a Figura 18 foi criada usando tal informação e associando ao potencial de corrosão.

Figura 18 – Lim. Escoamento/Densidade x Potencial de Corrosão.

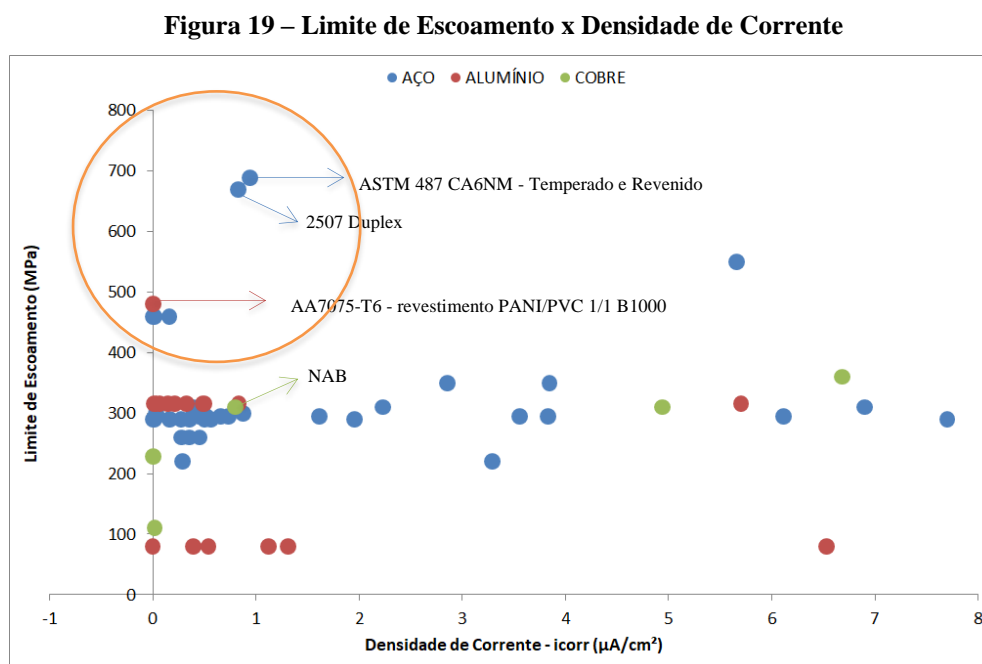


Fonte: Próprio Autor.

É possível encontrar materiais que possuem baixa densidade e elevado limite de escoamento, o que potencializa a seleção de um material que possui menor massa. Com isso, nota-se que as ligas de alumínio se destacam, ocupando majoritariamente a parte superior do gráfico. Em um projeto mecânico que visa potencializar a resistência mecânica e reduzir dimensão com aplicação em meio corrosivo, quanto mais para a direita do gráfico for, maior será a tendência termodinâmica do material a resistir à corrosão.

Ao comparar as ligas de aço com as de alumínio por meio da análise do potencial de corrosão, observa-se que o aço possui menor tendência termodinâmica ao processo corrosivo em relação ao alumínio. Ambos têm tendência a formar película e se passivar, porém, o alumínio forma a película mais rapidamente. Espera-se desses dois materiais uma densidade de corrente baixa após a formação da película.

Em uma seleção de materiais, a Figura 19 auxilia a encontrar materiais que possuem elevado limite de escoamento e baixa taxa de corrosão.

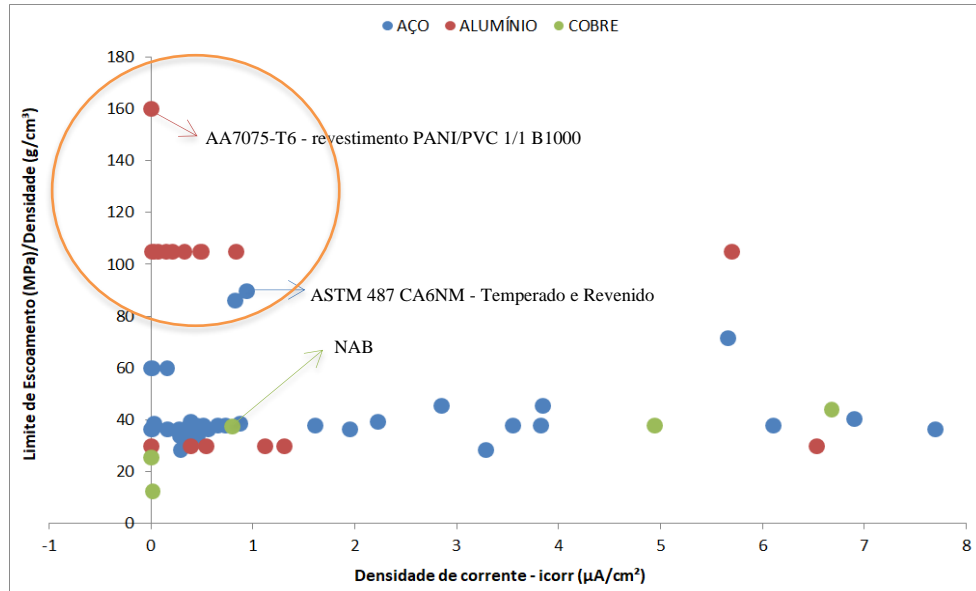


Fonte: Próprio Autor.

Para que o material possua baixa taxa de corrosão, é necessário que possua baixo valor de densidade de corrente e, um material que possui um elevado valor de tensão de falha possui um elevado limite de escoamento. Portanto, para um projeto que necessita de uma redução de espessura e alta resistência à corrosão o ideal é utilizar materiais que estão dentro do círculo destacado no gráfico.

Na Figura 20 é apresentada relação entre tensão de falha por densidade em relação à densidade de corrente.

Figura 20 – Limite de Escoamento/Densidade x Densidade de Corrente

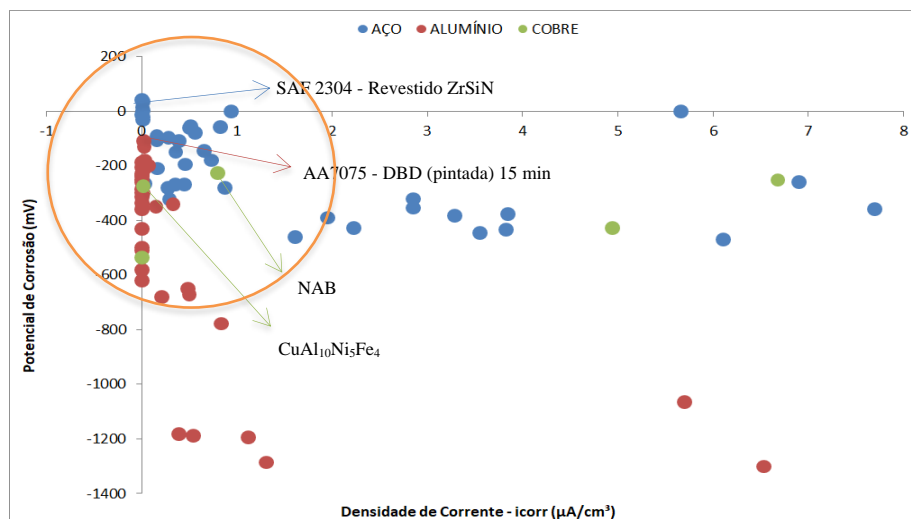


Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que a área demarcada potencializa as necessidades de um projeto que necessite de um material com menor massa e elevada resistência à corrosão. Observa-se também que, de acordo com os materiais selecionados para o estudo, as ligas de alumínio ocupam de forma unânime esse espaço.

A Figura 21 representa a relação entre a tendência química termodinâmica de corrosão em relação à densidade de corrente de troca.

Figura 21 – Potencial de Corrosão x Densidade de Corrente



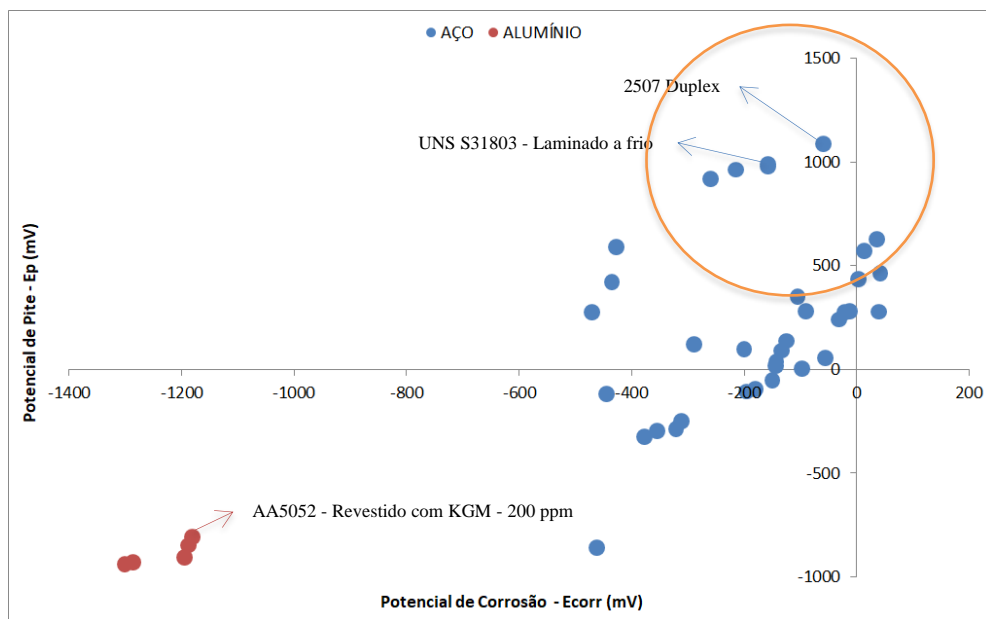
Fonte: Próprio Autor.

Este mapa pode ser utilizado para projetos onde as propriedades mecânicas não estariam em análise, mas sim as propriedades corrosivas. Dentro do local traçado no gráfico encontram-se os materiais que têm a menor tendência à corrosão e, quando corroem, possuem a menor taxa de corrosão dos materiais estudados. Nesse caso, observa-se que há uma grande variedade de materiais que localizados neste local.

A relação entre o potencial de corrosão com a densidade de corrente refere-se à tendência termodinâmica do material em sofrer corrosão sem filme (limpo, lixado, com filme removido mecanicamente). Após a formação do filme, a densidade de corrente diminui e o que torna-se mais importante para avaliação é o potencial de pite, visto que este irá indicar o quanto o material é mais ou menos resistente ao processo de corrosão após o rompimento da camada passiva (BELLEZZE; GIULIANI; ROVENTI, 2018).

Na Figura 22 é possível observar a relação entre o potencial de corrosão e o potencial de pite.

Figura 22 – Potencial de Pite x Potencial de Corrosão.



Fonte: Próprio Autor.

Este mapa também deveria ser utilizado apenas para projetos onde as propriedades mecânicas não estariam em análise. Na área marcada se encontram os materiais que teriam uma maior resistência ao pite, entregando assim, um material que teria maior resistência à exposição duradoura em ambiente corrosivo.

As escalas dos gráficos não se encontram semelhantes visto que, para diferentes propriedades, os valores máximos e mínimos variam grandemente. Caso as escalas fossem as mesmas em todos os gráficos, a visualização dos resultados seria prejudicada. Portanto, as autoras deste trabalho optaram por apresentar os mapas com escalas variadas.

5.5 Seleção de Materiais

Ao aplicar as considerações definidas para o projeto hipotético, o resultado do índice de mérito é uma combinação das propriedades de limite de escoamento/densidade, potencial de corrosão e densidade de corrente. Assim, analisou-se os diagramas apresentados na Figura 18 e na Figura 20.

A partir do cálculo do índice de mérito 1 (IM 1), foi estabelecida uma lista com os 20 materiais com maior valor, apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Materiais com maiores valores para o índice de mérito 1 (IM 1).

| Material | IM 1 = $\frac{LE}{D}$ |
|--|---|
| AA7075-T6 – Revestimento PANI200 | 160 |
| AA7075-T6 – Revestimento PANI/PVC 1/1 B200 | 160 |
| AA7075 | 105 |
| AA7075 – DBD (pintada) 5 min | 105 |
| ASTM 487 CA6NM – Temperado e Revenido | 89,60 |
| 2507 Duplex | 85,90 |
| ASTM 487 CA6NM – Sem tratamento | 71,52 |
| SAF 2304 | 59,74 |
| SAF 2304 – Revestido ZrN | 59,74 |
| AISI 420 | 45,45 |
| AISI 420 – Recobrimento PANI dopado | 45,45 |
| CuAl ₁₀ Ni ₅ Fe ₄ | 43,90 |
| AISI 444 – (UNS S44400 SFSS) | 40,26 |
| AISI 316 | 39,24 |
| AISI 304L | 38,46 |
| AISI 304L – Revestimento de Mo | 38,46 |
| AISI 304 | 37,82 |
| AISI 304 – Recobrimento PANI desdopado | 37,82 |
| MAB | 37,80 |
| NAB | 37,35 |

Fonte: Próprio autor.

Conforme evidenciado na área superior direita de Figura 18 e apresentado na Tabela 6, verifica-se que a liga de alumínio AA7075-T6 revestida com PANI 200 apresenta o maior valor para o índice de mérito 1, seguida da liga de alumínio AA7075-T6 revestida com a blenda

PANI/PVC B200, liga de alumínio AA7075, liga de alumínio AA7075 – DBD e aço ASTM 487 CA6NM temperado e revenido.

A partir da Tabela 6 obtida, foi aplicado o IM 2 e selecionou-se os 15 materiais com maior potencial de corrosão, apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Materiais com maiores valores para o índice de mérito 2 (IM 2).

| Material | IM 2 = E_{corr} (mV) |
|--|--|
| SAF 2304 – Revestido ZrN | 13,00 |
| ASTM 487 CA6NM – Temperado e Revenido | 0,25 |
| ASTM 487 CA6NM – Sem tratamento | -0,03 |
| AISI 304 – Recobrimento PANI desdopado | -55 |
| 2507 Duplex | -59 |
| SAF 2304 | -105 |
| AISI 316 – Sem tratamento | -110 |
| AISI 304 | -180 |
| AA7075 – DBD (pintada) 5 min | -180 |
| NAB | -226 |
| CuAl ₁₀ Ni ₅ Fe ₄ | -252 |
| AISI 444 (UNS S44400 SFSS) | -260 |
| AISI 304L – Revestimento de Mo | -265 |
| AISI 304L | -281 |
| AA7075-T6 – Revestimento PANI200 | -298 |

Fonte: Próprio autor.

Ao contrário do IM 1, com a aplicação do IM 2 pode-se verificar que apenas ligas de aços ocupam as cinco primeiras posições, sendo elas SAF 2304 revestida com ZrN, ASTM 487 CA6NM temperado e revenido, ASTM 487 CA6NM sem tratamento térmico, AISI 304 recoberto com PANI desdopado e aço 2507 duplex. Tal fato pode ser confirmado pelo fato de, em geral, as ligas ferrosas terem uma menor tendência termodinâmica aos processos corrosivos que as ligas de alumínio e de cobre.

A partir da Tabela 7, selecionou-se os dez materiais com maior IM 3, apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Materiais com maiores valores para o índice de mérito 3 (IM 3).

| Material | $IM\ 3 = \frac{1}{i_{corr}}$ |
|--|------------------------------|
| AA7075-T6 – Revestimento PANI200 | 1136,36 |
| SAF 2304 – Revestido ZrN | 116,28 |
| AISI 304L – Revestimento de Mo | 31,85 |
| AA7075 – DBD (pintada) 5 min | 29,41 |
| SAF 2304 | 6,25 |
| AISI 316 | 2,57 |
| AISI 304 – Recobrimento PANI desdopado | 1,95 |
| AISI 304 | 1,37 |
| NAB | 1,25 |
| 2507 Duplex | 1,21 |

Fonte: Próprio autor.

Após a determinação do terceiro índice de mérito foi feito um somatório de todos os valores de índice de mérito encontrados, exibidos na Tabela 9. Esse somatório foi realizado no intuito de comparar os atributos avaliados.

Tabela 9 – Somatório dos índices de méritos dos materiais encontrados para os candidatos do projeto.

| Material | $IM\ 1 = \frac{LE}{D}$ | $IM\ 2 = E_{corr}\ (mV)$ | $IM\ 3 = \frac{1}{i_{corr}}$ | Soma IM |
|--|------------------------|--------------------------|------------------------------|---------|
| AA7075-T6 – Revestimento PANI200 | 160,00 | -298,00 | 1136,36 | 998,36 |
| SAF 2304 – Revestido ZrN | 59,74 | 13,00 | 116,28 | 189,02 |
| 2507 Duplex | 85,90 | -59,00 | 1,21 | 28,11 |
| AISI 304 – Recobrimento PANI desdopado | 37,82 | -55,00 | 1,95 | -15,23 |
| SAF 2304 | 59,74 | -105,00 | 6,25 | -39,01 |
| AA7075 – DBD (pintada) 5 min | 105,00 | -180,00 | 29,41 | -45,59 |
| AISI 316 | 39,24 | -110,00 | 2,57 | -68,19 |
| AISI 304 | 37,82 | -180,00 | 1,37 | -140,81 |
| NAB | 37,35 | -226,00 | 1,25 | -187,40 |
| AISI 304L – Revestimento de Mo | 38,46 | -265,00 | 31,85 | -194,69 |

Fonte: Próprio autor.

A partir de análise da Tabela 9 sugere-se que os materiais que melhor desempenham sua função atendendo a todos os objetivos do projeto são a liga de alumínio AA7075-T6 revestida com PANI200, seguida dos aços 2304 revestido com ZrN e 2507 duplex.

Ressalta-se que em projetos em que é necessária apenas a redução de massa pode-se utilizar o IM 1 como principal candidato, assim como em projetos em que se avalia apenas o potencial de corrosão, para se ter uma tendência termodinâmica a processos corrosivos menor utiliza-se o IM 2 e, em projetos em que se deseja analisar a taxa de corrosão pode-se utilizar o

IM 3. Além disso, em projetos em que têm-se como requisitos todos os índices de mérito, pode-se utilizar o somatório para encontrar o melhor material.

Além dos requisitos estudados para os projetos hipotéticos, poderiam ter sido analisados também os custos dos materiais (SCHELESKI, 2015; HAGNELL *et al.*, 2020), a fim de tornar ainda mais robusto o processo de seleção de materiais. No entanto, muitos dos materiais estudados neste trabalho foram processados de forma específica (com distintos revestimentos, em concentrações e condições individuais) para cada estudo analisado nos artigos científicos, teses e dissertações, o que tornaria improvável a aquisição de tais dados relacionados a custos.

Por fim, conclui-se que foi possível testar os mapas de propriedades gerados e demonstrar sua importância e utilidade no processo de seleção de materiais.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o presente trabalho foi possível elaborar e analisar mapas de propriedades abordando a resistência à corrosão como característica desejável na metodologia de seleção de materiais.

Ao analisar os mapas de rede gerados a partir da pesquisa bibliométrica, determinou-se que a pesquisa bibliográfica relacionada ao banco de dados para criação dos mapas de propriedade seria feita com base nos materiais mais abordados: os aços inoxidáveis. A partir daí estes foram comparados a alguns dos materiais menos publicados, os quais são as ligas de alumínio e de cobre.

Verificou-se a partir das pesquisas bibliométrica e bibliográfica realizadas que justificasse a elaboração dos gráficos de propriedades relacionados à corrosão, visto que os mapas de propriedades de Ashby abordam apenas propriedades físicas, térmicas, mecânicas e elétricas.

Os mapas de propriedade foram criados a partir de dados de corrosão de ligas de aços inoxidáveis, alumínio e cobre em meios aquosos salinos, utilizando-se as relações entre potencial de corrosão, potencial de pite, densidade de corrente, limite de escoamento e densidade, que podem ser utilizados em projetos de seleção onde redução de massa, redução de espessura e resistência à corrosão são usadas como critérios mandatórios para escolha de um material.

Por fim, realizou-se um processo hipotético e simplificado de seleção de materiais de um produto aplicado em ambiente corrosivo utilizando-se os mapas de propriedades gerados de limite de escoamento/densidade x potencial de corrosão e de limite de escoamento/densidade x densidade de corrente, demonstrando a utilidade e relevância dos gráficos criados no processo de seleção de materiais.

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se uma análise dos custos dos principais candidatos encontrados no processo hipotético de seleção de materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL SAADI, S.; YI, Y.; CHO, P.; JANG, C.; BEELEY, P. Passivity breakdown of 316L stainless steel during potentiodynamic polarization in NaCl solution. **Corrosion Science**, v. 111, p. 720-727, 2016.
- ALMEIDA, L.; FELZENSZWALB, I.; MARQUES, M.; CRUZ, C. Nanotechnology activities: environmental protection regulatory issues data. **Heliyon**, v. 6, n. 10, p. e05303, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **B-117: standard practice for operating salt spray (fog) apparatus**. Philadelphia, 1995.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. G5-94 standard reference test method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurements. **Annual book of ASTM standards**, v. 3, p. 73-79, 1994.
- ANTUNES, Renato Altobelli; DE OLIVEIRA, Mara Cristina Lopes. Materials selection for hot stamped automotive body parts: An application of the Ashby approach based on the strain hardening exponent and stacking fault energy of materials. **Materials & Design**, v. 63, p. 247-256, 2014.
- ARAÚJO, Ronaldo Ferreira; ALVARENGA, Lidia. A bibliometria na pesquisa científica da pós-graduação brasileira de 1987 a 2007 10.5007/1518-2924.2011. **Encontros Bibli: Revista Eletrônica de Biblioteconomia e Ciência da Informação**, [S.L.], v. 16, n. 31, p. 51-70, 25 maio 2011. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
- ASHBY, M. F. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico**. 4. ed. Tradução de Arlete Similler. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- ASHBY, M. F. **Materials Selection – The basics**. In: **ASHBY, M. F. Materials Selection in Mechanical Design**. Oxford: Elsevier, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8094: material metálico revestido e não revestido: corrosão por exposição à névoa salina: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1993.
- ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G46-94 Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion**. ASTM, 2005.
- BABOIAN, R. (ed.). **Corrosion Testing and Standards: Applications and Interpretations**. Fredericksburg, VA, ASTM Manual Series – American Society for Testing and Materials Publication, 1995, 764p.
- BANDEIRA, R. M. **Estudos da proteção à corrosão da liga de alumínio AA7075-T6 por revestimentos a base de polianilina. Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo.
- BELLEZZE, T.; GIULIANI, G.; ROVENTI, G. Study of stainless steels corrosion in a strong acid mixture. Part 1: cyclic potentiodynamic polarization curves examined by means of an analytical method. **Corrosion Science**, v. 130, p. 113-125, 2018.
- BENZBIRIA, N.; ECHIHI, S.; BELGHITI, M. E.; THOUME, A.; ELMAKSSOUDI, A.; ZARROUK.; ZERTOUBI, M.; AZZI, M. **Novel synthesized benzodiazepine as efficient corrosion inhibitor for copper in 3.5% NaCl solution**. *Materials Today: Proceedings*, 2020.
- BÖRNER, K.; Theriault, T.N.; et al. Mapping Science Introduction: Past, Present and Future. **Bulletin of the Association for Information Science and Technology**, v. 41, n. 2, p. 12–16, 2015.
- BHANDARI, J.; KHAN, F.; ABBASSI, R.; GARANIYA, R. O. Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures—A technical review. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 37, p. 39-62, 2015.
- BRYTAN, Z.; NIAGAJ, J.; REIMAN, L. Corrosion studies using potentiodynamic and EIS electrochemical techniques of welded lean duplex stainless steel UNS S82441. **Applied Surface Science**, v. 388, p. 160-168, 2016.
- BYEON, J.; WU, K. Morphological estimation of pitting corrosion on vertically positioned 304 stainless steel using acoustic-emission duration parameter. **Corrosion Science**, v. 148, p. 331-337, 2019.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. [s.l: s.n.].

CALLISTER, William D. Jr. e RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 8ª ed. Rio de Janeiro. Ed. LTC, 2010.

CARBÓ, H. Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações. 2008. Disponível em: <http://200.17.228.88/disciplinas/EME733/Semin%C3%A1rios%20Inox/Catalogo%20aplicac%C3%B5es%20especificas.pdf> Acesso em 05 de novembro de 2020

CHAKRABORTY, A.; SINGH, J. K.; SEN, D.; PITAYANA, S.; MANNA, L.; KRISHNA, S.; MAJUMDAR, J. D. Microstructures, wear and corrosion resistance of laser composite surfaced austenitic stainless steel (AISI 304 SS) with tungsten carbide. **Optics & Laser Technology**, v. 134, p. 106585.

CHATTERJEE, Prasenjit; ATHAWALE, Vijay Manikrao; CHAKRABORTY, Shankar. **Materials selection using complex proportional assessment and evaluation of mixed data methods**. Elsevier. Bengal, p. 1-10. 14 jul. 2010.

Chatterjee, P.; Chakraborty, S. Material selection using preferential ranking methods. **Materials and Design**, v. 35, p. 384–393, 2012.

CHAUHAN, Dheeraj Singh; MOUADEN, Khadija El; QURAIISHI, M.A.; BAZZI, Lahcen. Aminotriazolethiol-functionalized chitosan as a macromolecule-based bioinspired corrosion inhibitor for surface protection of stainless steel in 3.5% NaCl. **International Journal Of Biological Macromolecules**. Marocco, p. 234-241. fev. 2020.

CHAWLA, S. K.; PAYER, J. H. Atmospheric corrosion: a comparison of indoor vs outdoor. *La Metallurgia Italiana*, v.84, n.2, p. 135-138, 1991. Disponível em: https://www.researchgate.net/journal/0125-8281_Engineering_Journal

CHI, G.; YI, D.; LIU, H. Effect of roughness on electrochemical and pitting corrosion of Ti-6Al-4V alloy in 12 wt. % HCl solution at 35 C. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 2, p. 1162-1174, 2020.

CHOUDHARY, Priyanka; KUMAR, Rajneesh; GUPTA, Navneet. Dielectric material selection of microstrip patch antenna for wireless communication applications using Ashby's approach. **International Journal of Microwave and Wireless Technologies**, v. 7, n. 5, p. 579-587, 2015.

EVANGELISTA, H. et al. **Composição química da chuva e aporte atmosférico na ilha grande**. Química Nova, Vol. 29, No. 3, 471-476, 2006. RJ.

FARAG, M. M. **Quantitative methods of materials selection**. In: _____. Handbook of Materials Selection. Nova York: John Wiley & Sons, 2002. cap. 1, p. 3-27.

FENG, X.; ZHANG, X.; XU, Y.; SHI, R.; LU, X.; ZHANG, L.; ZHANG, J.; CHEN, D. **Corrosion behavior of deformed low-nickel stainless steel in groundwater solution**. Engineering Failure Analysis, v. 98, p. 49-57, 2019.

FERRAZ, Claudiane Pinto; SAGGIORO, Paola de Castro; GODOY, Geralda Cristina Durães de; OLIVEIRA JÚNIOR, Reinaldo Borges de. **Análise do comportamento da resistência à corrosão do aço AISI 316 termicamente tratado**. Petra, Belo Horizonte, v. 4, n. 1, p. 23-40, jul. 2018.

FISCHER, D. A.; VARGAS, I. T.; PIZARRO, G. E.; ARMIJO, F.; WALCZAK, M. The effect of scan rate on the precision of determining corrosion current by Tafel extrapolation: A numerical study on the example of pure Cu in chloride containing medium. **Electrochimica Acta**, v. 313, p. 457-467, 2019.

DOMÉNECH-CARBÓ, A.; SCHOLZ, F.; BRAUNS, M.; TILEY-NEL, S.; OLIVER, A.; AGUILLELLA, G.; MONTOYA, N.; DOMÉNECH-CARBÓ, M. T. Electrochemical dating of archaeological gold based on refined peak current determinations and Tafel analysis. **Electrochimica Acta**, v. 337, p. 135759, 2020.

GASTALDO, Felipe Toloi. **Efeitos do Tratamento de Superfície a Laser na Microestrutura e na Resistência ao Desgaste do Aço Inoxidável Martensítico**. 2010. 83 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

GENG, Y.; BAN, Y.; WANG, B.; LI, X.; SONG, K.; ZHANG, Y.; JIA, Y.; TIAN, B.; LIU, Y.; VOLINSKY, A. A review of microstructure and texture evolution with nanoscale precipitates for copper alloys. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 5, p. 11918-11934, 2020.

GENTIL, V. **Corrosão**. 2ª ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1982.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6ª ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 2011.

HAGNELL, M. K.; KUMARASWAMY, S.; NYMAN, T.; AKERMO, M. From aviation to automotive-a study on material selection and its implication on cost and weight efficient structural composite and sandwich designs. **Heliyon**, v. 6, n. 3, p. e03716, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8044**: Corrosion of metals and alloys – Terms and definitions. 1986.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9227**: corrosion tests in artificial atmospheres: salt spray tests. Switzerland, 2012. Annual Book of International Standards.

JAFARZADEH, S.; CHEN, Z.; ZHAO, J.; BOBARU, F. Pitting, lacy covers, and pit merger in stainless steel: 3D peridynamic models. **Corrosion Science**, v. 150, p. 17-31, 2019. Disponível

JAVIDI, Mehdi; HAGHSHEENAS, Seyyed Mohammad Saleh; SHARIAT, Mohammad Hossein. CO2 corrosion behavior of sensitized 304 and 316 austenitic stainless steels in 3.5 wt.% NaCl solution and presence of H2S. **Corrosion Science**. Iran, p. 1-9. set. 2019.

Jee, D.-H.; Kang, K.-J. A method for optimal material selection aided with decision making theory. **Materials & Design**, v. 21, n. 3, p. 199–206, 2000.

JEGDIĆ, B.; BOBIĆ, B.; RADOJKOVIĆ, B.; ALIĆ, B.; RADOVANOVIĆ, L. Corrosion resistance of welded joints of X5CrNi18-10 stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 266, p. 579-587, 2019.

JUNIOR, J. J. F. S. **Software educativo de seleção de materiais pelo método ashby**. 2016. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha do Campus Três Poços, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda.

KIOSIDOU, E. D.; KARANTONIS, G. N.; SAKALIS, D. I. Electrochemical impedance spectroscopy of scribed coated steel after salt spray testing. **Corrosion Science**, v. 137, p. 127-150, 2018.

KURELO, B. C. E.; SOUZA, G. B.; SERBENA, F. C.; LEPIENSKI, C. M.; BORGES, P. C. **Mechanical properties and corrosion resistance of α N-rich layers produced by PIII on a super ferritic stainless steel**. Elsevier, Paraná, v. 403, n. -, p. 1-9, set. 2020.

LABIAPARI, W. S.; ARDILA, M. A. N.; BINDER, C.; COSTA, H. I.; MELLO, J. B. D. **Mechanical effects on the corrosion resistance of ferritic stainless steels during microabrasion-corrosion**. *Wear*, v. 426, p. 1474-1481, 2019.

LEAL, D. A.; RIEGEL-VIDOTTI, I. C.; FERREIRA, M. G. S.; MARINO, C. E. B. Smart coating based on double stimuli-responsive microcapsules containing linseed oil and benzotriazole for active corrosion protection. **Corrosion Science**, v. 130, p. 56-63, 2018.

LEE, S.; KIM, J.; KOO, J. Investigation of pitting corrosion of a copper tube in a heating system. **Engineering Failure Analysis**, v. 17, n. 6, p. 1424-1435, 2010.

LI, C.X.; BELL, T. **Corrosion properties of plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel in 3.5% NaCl and 1% HCl aqueous solutions**. *Corrosion Science*. Birmingham, p. 2036-2049. out. 2005.

LI, D. Tafel analysis in practice. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 826, p. 117-124, 2018.

LI, L.; DONG, C. F.; YAO, J. Z.; LI, X. G. Effect of pH on pitting corrosion of stainless steel welds in alkaline salt water. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 709-715, 2014.

LOTO, R. T. **Corrosion resistance and morphological deterioration of 316Ti austenitic, GX4CrNiMo16-5-1 martensitic and 444 ferritic stainless steels in aqueous corrosive environments**. *Results in Physics*, 2019.

LTD, Iron Boar Labs. Material Properties Database. 2009. Disponível em: <https://www.makeitfrom.com/>. Acesso em: 30 nov. 2020.

LU, Y.; GUAN, Y.; LI, Y.; WANG, M.; WANG, Y. **Nanosecond laser fabrication of superhydrophobic surface on 316L stainless steel and corrosion protection application.** Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 604, p. 125259, 2020.

LV, Y.; DING, Y.; CUI, H.; LIU, G.; WANG, B.; CAO, L.; LI, L.; QIN, Z.; LU, W. **Investigation of microscopic residual stress and its effects on stress corrosion behavior of NiAl bronze alloy using in situ neutron diffraction/EBSD/tensile corrosion experiment.** Materials Characterization, p. 110351, 2020.

MA, C.y.; ZHOU, L.; ZHANG, R.X.; LI, D.G.; SHU, F.y.; SONG, X.G.; ZHAO, Y.Q. **Enhancement in mechanical properties and corrosion resistance of 2507 duplex stainless steel via friction stir processing.** Jmr&t: Journal Materials Research and Technology. Weihai, p. 8296-8305. maio 2020.

MAKE IT FROM. Material Properties. Disponível em: <https://www.makeitfrom.com/>- Acesso em: 30 nov. 2020.

MARIANO, Carolina. **Obtenção de Revestimentos de Nióbio Depositados por Aspersão Térmica para Proteção à Corrosão Marinha.** 2008. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Departamento de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MARQUES, Andrielle de A. **A bibliometria: reflexões para comunicação científica na Ciência da Comunicação e Ciência da Informação.** In: Congresso Brasileiro de Ciências da Comunicação, 33, 2010, Caxias do Sul. Anais... Caxias do Sul: INTERCOM, 2010. p. 1-10.

MÁRQUEZ, M. V. C. **Avaliação da resistência à corrosão do aço carbono ASTM 572 GR50 exposto a óleo cru, água do mar e misturas de óleo/água do mar em condições estáticas e dinâmicas.** 2016. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

MCCAFFERTY, E. Validation of corrosion rates measured by the Tafel extrapolation method. **Corrosion science**, v. 47, n. 12, p. 3202-3215, 2005.

MEHMOOD, Zahid; HANEEF, Ibraheem; UDREA, Florin. Material selection for Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS) using Ashby's approach. **Materials & Design**, v. 157, p. 412-430, 2018.

MEIRA, G. R.; FERREIRA, P. R. R. **Revisão sobre ensaios acelerados para indução da corrosão desencadeada por cloretos em concreto armado.** Ambiente Construído, v. 19, n. 4, p. 223-248, 2019.

MENEZES, Fernanda de Lima. **Resistência à corrosão e à oxidação dos aços aisi 316l e saf 2304 revestidos por zrn e zrsin pela técnica de magnetron sputtering reativo.** 2019. 144 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

METALS HANDBOOK. **Corrosion.** Volume 13 - 9 ed. Metals Park, Ohio. ASM International, 1987, 1415p.

MOHAMMADI, I.; SHAHRABI, T.; MAHDAVIAN, M.; IZADI, M. **Sodium diethyldithiocarbamate as a novel corrosion inhibitor to mitigate corrosion of 2024-T3 aluminum alloy in 3.5 wt% NaCl solution.** Journal of Molecular Liquids, p. 112965, 2020.

MORAES, Fernando Cruz de. **Influência da microestrutura dos aços inoxidáveis (austeníticos, ferríticos e martensíticos) na proteção contra a corrosão por filmes de polianilina.** 2006. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

MOTA, Gabriela Leite. **Análise de corrosão do aço duplex uns s31803 após os processos de conformação e soldagem.** 2018. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Cefet-MG, Belo Horizonte, 2018.

MOUADEN, Khadija El.; CHAUHAN, D.s.; QURAIISHI, M.A.; BAZZI, Lahcen. **Thiocarbonylhydrazide-crosslinked chitosan as a bioinspired corrosion inhibitor for protection of stainless steel in 3.5% NaCl.** Elsevier, Saudi Arabia, v. 15, n. -, p. 1-8, mar. 2020.

MOURÃO, M. B. et al. **Introdução à Siderurgia.** [s.l.] Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2011.

- MUI, T. S. M. Influência de tratamentos a plasma na resistência à corrosão e na propriedade de adesão de uma camada protetiva sobre a superfície de ligas de alumínio. / Taiana She Mir Mui – Guaratinguetá, 2016. 117 f. : il. Bibliografia : f. 101-110.
- NIE, Jingjing; WEI, Liang; JIANG, Ying; LI, Qian; LUO, Hongjie. **Corrosion mechanism of additively manufactured 316 L stainless steel in 3.5 wt.% NaCl solution.** Journal Pre-Proof. Shanghai, p. 1-30. set. 2020.
- NUNES, L. P. **Fundamentos de resistência à corrosão.** Rio de Janeiro: Interciência, IBP: ABRACO, 2007, 330p.
- ÖZTÜRK, S.; SÜNBUİL, S. E.; METOGLU, A.; IÇIN, M. **Improvement of microstructure, tribology and corrosion characteristics of nickel-aluminum bronze by P/M method.** Tribology International, v. 151, p. 106519, 2020.
- Panossian, Zehbour; Almeida, Neusvaldo L. de; Sousa, Raquel M. F. de; Pimenta, Gutemberg de S.; Marques Leandro B. S.; Corrosion of carbon steel pipes and tanks by concentrated sulfuric acid: A review. **Corrosion Science**, São Paulo, Vol. 58, p. 1-11, Janeiro (2012)
- PANOSSIAN, Zehbour et al. **Corrosão do aço-carbono em ácido sulfúrico concentrado.** Intercorr. Salvador, p. 1-24. maio 2012.
- PEREIRA, Beatriz Cordeiro de Farias; OLIVEIRA, Bráulio Salumão de; LEIVA, Daniel Rodrigo. **Análise bibliométrica da produção científica em métodos de tomada de decisão para seleção de materiais.** In: **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 23., 2018, Foz do Iguaçu. Anais [...] . Foz do Iguaçu: -, 2018. p. 9144-9155
- Ponte, R. B. **Disseminação de íons cloreto na orla marítima do bairro de Boa Ciagem, RECIFE-PE.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife.
- QUEBBOU, Z.; CHAFI, M.; OMARI, L. E. H. Corrosion resistance of 5005 aluminum alloy by anodizing treatment in a mixture of phosphoric and boric acids. **Materials Today: Proceedings**, 2020.
- ROCH, Janaina Cardozo da. **Obtenção de inibidores de corrosão a partir de extratos de produtos naturais.** 2013. 106 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- SAIDI, D.; ZAID, B.; SOUAMI, N.; SAOULA, N.; SIAD, M.; AHMED, A. Si; BIBERIAN, J.P. AES depth profiles in Mo-coated 304L stainless steel achieved by RF-magnetron sputtering and influence of Mo on the corrosion in 3.5% NaCl solution. **Journal Of Alloys And Compounds.** Alegria, p. 45-50. maio 2015.
- SAKAIRI, M.; OTANI, K.; SASAKI, R. Electrochemical noise evaluation of metal cation effects on galvanic corrosion of aluminum alloys in low concentration of chloride ion containing solutions. **Procedia Engineering**, v. 86, p. 589–596, 2014.
- SALAH, Salar; KAZEMIPOUR, Mostafa; NASIRI, Ali. **Effects of microstructural evolution on the corrosion properties of AISI 420 martensitic stainless steel during cold rolling process.** Materials Chemistry And Physics. Newfoundland, p. 1-14. out. 2020.
- SANNI, O.; POPOOLA, A. P. I.; FAYOMI, O. S. I. The inhibitive study of egg shell powder on uns n08904 austenitic stainless steel corrosion in chloride solution. **Defence Technology**, v. 14, n. 5, p. 463-468, 2018.
- SAWANT, Vishram B.; MOHITE, Suhas S.; CHEULKAR, Laukik N. Comprehensive contact material selection approach for RF MEMS switch. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 4, p. 10704-10711, 2018.
- SCHELESKI, S. Seleção de materiais no projeto de máquinas e implementos agrícolas. **Design e Tecnologia**, v. 5, n. 09, p. 29-41, 2015.
- SELVAM, Karthikeyan; SAINI, Jaskaran; PERUMAL, Gopinath; AYYAGARI, Aditya; SALLOOM, Riyadh; MONDAL, Riya; MUKHERJEE, Sundeep; GREWAL, Harpreet Singh; ARORA, Harpreet Singh. Exceptional cavitation erosion-corrosion behavior of dual-phase bimodal structure in austenitic stainless steel. **Tribology International.** Uttar Pradesh, p. 77-86. jan. 2019.
- SERAFINI, M.; RUSSO, D.; RIZZI, C. Multi criteria material selection for eco-design. **Computer-Aided Design and Applications**, Bergamo, v. 12, p. 526-536, 2015.

SHAH, Darshil U. Natural fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts. **Materials & Design** (1980-2015), v. 62, p. 21-31, 2014.

SHAH, S. H. H.; LEI, S.; ALI, M.; DORONIN, D.; SYED, T. H. **Prosumption**: bibliometric analysis using HistCite and VOSviewer. *Kybernetes*, 2019.

SHALABI, K.; EL-GAMMAL, O. A.; ABDALLAH, Y. M. **Adsorption and inhibition effect of tetraaza-tetradentate macrocycle ligand and its Ni (II), Cu (II) complexes on the corrosion of Cu₁₀Ni alloy in 3.5 % NaCl solutions**. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 609, p. 125653.

SHOJAEI, E.; MIRJALILI, M.; MOAYED, M. H. **The influence of the crevice induced IR drop on polarization measurement of localized corrosion behavior of 316L stainless steel**. *Corrosion Science*, 2019.

SHREIR, L. L.; Jarman, R. A.; Burstein, G. T. **Corrosion**: v.1 - metal e environment reaction. 3^oed., Oxford. Boston: Butterworth-Heinemann, 1994, 21:95 p.

SHRIVER, D.F.; ATKINS, P.W.; LANGFORD, C.H. **Química Inorgânica**. Bookman, 3^a ed. Porto Alegre., 2003.

SID ACO INOX. Tabela de propriedades. Disponível em: - <http://sidacoinox.com.br/tabela-de-propriedades/>
Acesso em: 15 de outubro de 2020.

SONG, Q. N.; TONG, Y.; XU, N.; SUN, S. Y.; LI, H. L.; BAO, Y. F.; JIANG, Y. F.; WANG, Z. B.; QIAO, Y. X. **Synergistic effect between cavitation erosion and corrosion for various copper alloys in sulphide-containing 3.5 % NaCl solutions**. *Wear*, p. 203258, 2020.

SOUZA, R. A. L., **Software educativo de seleção de materiais pelo método Ashby**. 2015. 188f. Dissertação (Mestrado Profissional em Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha do Campus Três Poços, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda.

TALBOT, D e TALBOT, J. *Corrosion Science and Technology*. **Boca Raton: CRC press**, 406 p. 1998

TAO, H.; ZHOU, C.; ZHENG, Y.; HONG, Y.; ZHENG, J.; ZHANG, L. **Anomalous evolution of corrosion behaviour of warm-rolled type 304 austenitic stainless steel**. *Corrosion Science*, v. 154, p. 268-276, 2019.

TÉCNICAS, A. B. D. N. **NBR NM-ISO 4948-1: Aços - Classificação dos aços não ligados e ligados Parte 1: Classificação dos aços em não ligados e ligados com base na sua composição química**. Rio de Janeiro: [s.n.].

TENAX AÇOS ESPECIAIS. **Aços Inoxidáveis**. Disponível em: <https://www.tenax.com.br/tenax/produtos/acos-inoxidaveis/>
Acesso em: 14 de outubro de 2020.

TRIDAPALLI, C. W. **Estudo comparativo de metodologias de ensaios acelerados de corrosão por frestas nas ligas de aço inox AISI 430 e AISI 304**. 2012.

USMAN, B. J.; SCENINI, F.; CURIONI, M. **The effect of exposure conditions on performance evaluation of post-treated anodic oxides on an aerospace aluminium alloy: Comparison between salt spray and immersion testing**. *Surface and Coatings Technology*, v. 399, p. 126157, 2020.

VAZ, E. L. S.; CODARO, E. N.; ACCIARI, H. A. Effect of Nitrogen and Sulfur Oxides on Copper and Zinc Corrosion: an experiment for teaching of corrosion. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 5, n. 4, p. 1-11, 10 jun. 2013. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20130050>.

VIEIRA, Magda Rosângela Santos. **Estudo dos processos de corrosão e biocorrosão causados por fluidos da indústria de petróleo**. 2013. 129 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

WANG, H.; NING, C.; HUANG, Y.; CAO, Z.; CHEN, X.; ZHANG, W. Improvement of abrasion resistance in artificial seawater and corrosion resistance in NaCl solution of 7075 aluminum alloy processed by laser shock peening. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 90, p. 179-185, 2017.

WANG, H.; FAN, Y.; TIAN, L.; ZHAO, J.; REN, L. Colorimetric/fluorescent dual channel sensitive coating for early detection of copper alloy corrosion. **Materials Letters**, v. 265, p. 127419, 2020.

WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquímicas em Corrosão**. EDUSP, São Paulo, 2003.

- YAZDANI, M.; PAYAM, A. F. **A comparative study on material selection of microelectromechanical systems electrostatic actuators using Ashby. VIKOR and TOPSIS.** *Materials & Design (1980-2015)*, v. 65, p. 328-334, 2015.
- ZHANG, B.; MA, X. L. A review—Pitting corrosion initiation investigated by TEM. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 35, n. 7, p. 1455-1465, 2019.
- ZHANG, K.; YANG, W.; GE, F.; XU, B.; CHEN, Y.; YIN, X.; LIU, X.; ZUO, H. A self-curing konjac glucomannan/CaCO₃ coating for corrosion protection of AA5052 aluminum alloy in NaCl solution. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 151, p. 691-701, 2020.
- ZHANG, K.; YANG, Y.; XU, B.; CHEN, Y.; YIN, X.; LIU, Y.; ZUO, Y. Inhibitory effect of konjac glucomannan on pitting corrosion of AA5052 aluminium alloy in NaCl solution. **Journal of colloid and interface science**, v. 517, p. 52-60, 2018.
- ZHANG, Y.; ZHANG, G.; et al. Scientific evolutionary pathways: Identifying and visualizing relationships for scientific topics. **Journal of the Association for Information Science and Technology**, v. 68, n. 8, p. 1925–1939, 2017.
- ZHENG, Z.B.; ZHENG, Y.G.. Effects of surface treatments on the corrosion and erosion-corrosion of 304 stainless steel in 3.5% NaCl solution. **Corrosion Science**. Guangzhou, p. 1-12. set. 2016.
- ZUO, S.; LIU, Z.; LIU, W.; LI, X.; LI, Z.; YAO, C.; CHEN, Q.; FU, Y. TiO₂ nanorod arrays on the conductive mica combine photoelectrochemical cathodic protection with barrier properties. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 776, p. 529-535, 2019.