

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEMEC - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

MARIANA GABRIELA MOREIRA DE FREITAS

**PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA
ESTRUTURAS DE PAINÉIS ELÉTRICOS DE MÉDIA TENSÃO**

SÃO CARLOS
2024

MARIANA GABRIELA MOREIRA DE FREITAS

**PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA
ESTRUTURAS DE PAINÉIS ELÉTRICOS DE MÉDIA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao DEMec
- Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de São Carlos, para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Barcelos Otani
Coorientador: Prof. Dr. Lucas Henrique Staffa

SÃO CARLOS
2024



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905
Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-ADP nº 28/2024/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Ata da Defesa Pública (GDP-TCC-ADP)


Aos dezanove dias do mês de setembro de 2024, por meio de videoconferência, realizou-se a Defesa Pública do Trabalho de Conclusão de Curso da estudante Mariana Gabriela Moreira de Freitas do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos, devidamente matriculado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, perante a Banca Examinadora, composta pelos Professores Lucas Barcelos Otani, Lucas Henrique Staffa, João Gustavo Pereira da Silva e Arthur de Bribean Guerra segundo o estabelecido nas Normas para apresentação de Trabalho de Conclusão do Curso.


Após a apresentação e arguições, a Banca deliberou, segundo os critérios estabelecidos nas normas supracitadas:

Nome do Docente	Função	Nota
Lucas Barcelos Otani	Orientador	9,5
Lucas Henrique Staffa	Coorientador	9,5
João Gustavo Pereira da Silva	Membro da Banca 1	9,5
Arthur de Bribean Guerra	Membro da Banca 2	9,5

Com isso, o Trabalho foi considerado Aprovado, com nota final 9,5.


São Carlos, 19 de setembro de 2024.

 Documento assinado eletronicamente por **Lucas Barcelos Otani, Professor(a) do Ensino Superior**, em 19/09/2024, às 10:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

 Documento assinado eletronicamente por **Arthur de Bribean Guerra, Professor(a) Substituto(a)**, em 19/09/2024, às 10:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

 Documento assinado eletronicamente por **Joao Gustavo Pereira da Silva, Docente**, em 19/09/2024, às 10:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

 Documento assinado eletronicamente por **Lucas Henrique Staffa, Docente**, em 19/09/2024, às 10:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

 A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **1579228** e o código CRC **BC584E48**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.027938/2024-91

SEI nº 1579228

Modelo de Documento: Grad: Defesa TCC: Ata, versão de 02/Agosto/2019

Dedico este trabalho a todas as mulheres que sonham atuar na Engenharia Mecânica. Este é o espaço onde vocês pertencem e podem brilhar. Que cada obstáculo se transforme em um passo em direção às suas conquistas, iluminando o caminho para um futuro mais inovador e inclusivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e à espiritualidade que sempre estiveram ao meu lado, guiando-me com sabedoria e força, iluminando meu caminho e me permitindo alcançar cada objetivo com perseverança e fé.

À minha família, agradeço pelo suporte, carinho e apoio incondicional, mesmo à distância. Em especial, minha sincera gratidão à minha mãe, pai e avó por todo o incentivo ao longo da minha vida acadêmica. Obrigada por sonharem junto comigo e possibilitarem meus estudos. Sem vocês, essa conquista não seria possível.

Às minhas irmãs, Ana Clara e Maria Cecília, agradeço por serem minhas maiores motivações para alcançar meus objetivos. Minha vida é completa com vocês, e mesmo de longe, são minha fonte constante de inspiração, força e amor.

À Gabriela Assagra, a quem me refiro carinhosamente como "meu amigo", agradeço pela amizade firmada desde o primeiro dia de aula. De todos os encontros que tive na graduação, o nosso, com certeza, foi o mais feliz. Em nossa amizade, encontrei conforto, amor, incentivo e muita resiliência. Hoje, sou feliz e grata por encerrar esse ciclo ao seu lado. Juntas, mais uma vez, conseguimos!

Aos meus amigos Maria Bertazzo, João Henrique Schiavon e Pedro Henrique Fernandes, agradeço por todo o apoio, carinho e companhia ao longo desses anos de UFSCar. A amizade de vocês foi essencial para minha trajetória.

A todos meus amigos do time de Strategic Procurement, agradeço pelo apoio e compreensão durante este período final da minha graduação. A colaboração de cada um foi fundamental para o sucesso desta etapa. Vocês são incríveis!

Ao meu orientador, prof. Dr. Lucas Otani e Coorientador, prof. Dr. Lucas Staffa, agradeço pela dedicação, paciência e conhecimentos compartilhados ao longo do desenvolvimento do trabalho. Obrigada por, desde o início, terem acreditado na ideia do projeto.

RESUMO

FREITAS, Mariana Gabriela Moreira de. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA ESTRUTURAS DE PAINÉIS ELÉTRICOS DE MÉDIA TENSÃO. 2024. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2024.

Painéis elétricos de média tensão são equipamentos amplamente utilizados no contexto industrial para controle e distribuição de energia elétrica. No que tange aos materiais para a estrutura de tais painéis, é necessário que requisitos importantes sejam preenchidos a fim de garantir uma correta operação desses componentes. Adicionalmente a requisitos estruturais básicos, os painéis devem suportar condições adversas e cíclicas de intemperismo, além de haver a necessidade de serem comercialmente viáveis e tecnicamente possíveis de serem fabricados. Diante disso, neste trabalho foi utilizado o Método de Ashby para orientar o processo de Seleção de Materiais do invólucro de painéis de média tensão, incluindo a utilização de índices de mérito e considerações importantes acerca dos processos de fabricação desses itens. A partir de uma busca bibliográfica, foram levantadas normas que devem ser cumpridas para tal finalidade, juntamente com materiais que já são utilizados em tais aplicações, incluindo potenciais candidatos para substituição total ou parcial. Como ferramenta computacional, foi utilizado o *software* Ansys Granta Edupack 2020. Ao final, a pesquisa revelou que aços de baixo carbono se destacam como opção viável para a aplicação estudada, especialmente AISI 1015 e 1020 encruados.

Palavras-chave: Painéis elétricos. Seleção de materiais. Processos de fabricação. Aços carbono.

ABSTRACT

FREITAS, Mariana Gabriela Moreira de. Final Work Template. 2024. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2024.

Medium-voltage switchgears are widely used in industry to control and distribute electricity. When it comes to materials for the structure of such panels, important requirements must be achieved in order to guarantee the correct operation of these components. In addition to the basic structural requirements, the panels must withstand adverse and cyclical weathering conditions, as well as being commercially viable and technically possible to manufacture. With this in mind, this study used the Ashby Method to guide the Material Selection process for medium voltage switchgear enclosures, including the use of merit indexes and important considerations about the manufacturing processes for these items. Based on a literature search, the standards that must be respected for this purpose were surveyed, along with materials that are already used in such applications, including potential candidates for total or partial replacement. Ansys Granta Edupack 2020 was used as a computational tool. In the end, the research revealed that low carbon steels stand out as a viable option for the application studied, especially as rolled AISI 1015 and 1020.

Keywords: Medium-voltage switchgears. Materials selection. Manufacturing processes. Carbon steels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática simplificada de um painel elétrico de média tensão - Painel de disjuntores.	17
Figura 2 – Representação esquemática simplificada de um painel elétrico de média tensão - Painel de interruptores-seccionadores com fusíveis HV HRC.	17
Figura 3 – Diagrama de equilíbrio metaestável ferro-carbono. Em (a) está representado um diagrama que compreende a faixa de teor de cementita comum a aços e ferros fundidos. Em (b) está representado com maior detalhes as faixas de temperatura e fases para os aços-carbono. . .	21
Figura 4 – Esquemático da determinação gráfica da tensão limite de escoamento.	28
Figura 5 – Relação entre a camada de zinco formada de acordo com tempo de imersão do aço com diferentes teores de zinco.	32
Figura 6 – Região de dobra em chapa metálica.	33
Figura 7 – Relação entre raio mínimo de dobra e ductilidade do metal dobrado (medida a partir da diminuição de área observada).	34
Figura 8 – Representação esquemática da metodologia de Ashby para a seleção de materiais.	36
Figura 9 – Exemplo de Diagrama de Ashby.	37
Figura 10 – Correlação entre Resistência Mecânica Específica e Ductilidade. . .	42
Figura 11 – Correlação entre Pegada de CO_2 na produção primária e Preço. . .	43
Figura 12 – Materiais candidatos para a Seleção de Materiais a partir do índice de mérito.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas e composição química do DX51D	25
Tabela 2 – Parâmetros considerados para o revestimento Z275.	25
Tabela 3 – Tabela de tradução.	39
Tabela 4 – Tabela de Materiais Candidatos.	45
Tabela 5 – Composição química dos materiais selecionados.	47
Tabela 6 – Propriedades mecânicas e aceitação para laminação a frio dos ma- teriais selecionados.	48

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	12
2 – OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivos específicos	14
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Painéis elétricos e seus componentes	15
3.2 Fundamentos dos aços carbono	19
3.3 Requisitos necessários para a construção de chapas para painéis elétricos de média tensão	24
3.3.1 Propriedades mecânicas	26
3.4 Processo de fabricação de chapas para painéis elétricos	29
3.4.1 Obtenção de chapas de aço	29
3.4.2 Galvanização a quente	30
3.4.3 Dobramento	33
3.5 Aspectos de seleção de materiais	35
3.5.1 Método de Ashby	35
3.5.1.1 Tradução	36
3.5.1.2 Triagem	36
3.5.1.3 Classificação	37
3.5.1.4 Documentação	38
4 – METODOLOGIA	39
5 – RESULTADOS	41
5.1 Triagem	41
5.2 Classificação	41
5.3 Documentação e Seleção final	46
6 – CONCLUSÃO	52

REFERÊNCIAS 53

1 INTRODUÇÃO

Painéis elétricos de média tensão, conforme Filho (2013), compreendem um conjunto de dispositivos de manobra, associados a equipamentos de proteção, comando e medição e controle instalados internamente a um invólucro metálico. Diante disso, os painéis são equipamentos fundamentais em infraestruturas elétricas, têm como função primordial a garantia da transmissão segura e confiável de eletricidade, o que os torna essenciais para ambientes industriais complexos. Nesse sentido, ao oferecerem uma solução eficaz para a gestão de energia, os painéis elétricos contribuem substancialmente para a minimização de perdas energéticas, garantindo a integridade do fornecimento elétrico em setores onde a confiabilidade e eficiência energética são imperativos.

À vista disso, contemporaneamente, nota-se na indústria uma alta dependência de sistemas elétricos robustos capazes de garantir a eficiência e segurança de suas operações. Nesse contexto, os painéis elétricos de média tensão ganham notoriedade como elementos fundamentais, exercendo um importante papel no controle e distribuição segura de energia elétrica em ambientes industriais. Entretanto, pelo fato de tais equipamentos possuírem sistemas complexos e estarem sujeitos a inúmeros desafios impostos por condições adversas de intemperismo, faz-se indispensável uma escolha criteriosa de insumos para a fabricação da estrutura desses painéis.

Sob tal perspectiva, em um contexto onde a eficiência, segurança e sustentabilidade são prioridades, cada material selecionado exerce um papel fundamental no desempenho global do painel. Nesse sentido, no que tange à estrutura de tal dispositivo, tem-se que a escolha adequada de materiais influencia diretamente fatores como a estabilidade estrutural do equipamento, durabilidade, resistência a condições adversas, como eventuais danos estruturais advindos de possíveis colapsos elétricos internos. Além disso, a seleção adequada de materiais é uma rota importante que deve ser seguida para possibilitar um aumento na vida útil de painéis elétricos, assim como viabilizar potencial redução nos custos relacionados à fabricação destes componentes.

A presente pesquisa busca ir além das limitações teóricas ao fornecer uma contribuição acadêmica, juntamente com diretrizes práticas para profissionais da indústria, mediante à adição de aspectos relevantes na escolha de materiais para a fabricação da estrutura externa de painéis elétricos. Ao fazê-lo, este estudo pretende sugerir uma otimização na seleção de materiais para a estrutura de painéis elétricos de média tensão, contribuindo com a inclusão de aspectos relacionados à sustentabilidade e eficiência das operações industriais, além de posicionar-se como um guia em meio à interseção entre desafios técnicos e econômicos relativos ao escopo apresentado. Para tanto, a Seleção de Materiais será orientada pelo Método de Ashby e, como principal ferramenta computacional, será empregado o *software Ansys Granta EduPack 2020*. Adicionalmente, aspectos importantes relacionados aos métodos de fabricação destes painéis, juntamente com requisitos de durabilidade serão levados em consideração para direcionar a escolha de possíveis candidatos para determinada aplicação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia e aplicá-la para a seleção de materiais empregados na estrutura externa de painéis elétricos de média tensão, envolvendo tanto os principais requisitos relacionados às propriedades, quanto aspectos de processos de fabricação.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre os materiais que compõem o exterior de painéis elétricos de média tensão, a fim de identificar propriedades mecânicas relevantes para a especificação de um material para determinada aplicação, juntamente com aspectos relacionados à durabilidade de tais materiais;
- Desenvolver critérios de seleção, considerando metodologias de priorização e índices de mérito, para avaliar e classificar materiais candidatos para compor a estrutura externa de painéis elétricos;
- Utilizar o software *Ansys Granta Edupack 2020* como principal ferramenta de seleção e análise de materiais, considerando adicionalmente às propriedades necessárias, aspectos de fabricação e tópicos a respeito de viabilidade econômica;
- Investigar o comportamento dos materiais candidatos no escopo de processos de fabricação, destacando vantagens, desvantagens e potenciais impactos no produto final.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Painéis elétricos e seus componentes

Painéis elétricos de média tensão são equipamentos cuja principal finalidade é a garantia da transmissão segura e confiável de energia em setores onde a confiabilidade energética é um imperativo. Nesse sentido, pelo fato de contribuírem significativamente para a minimização de perdas e para a preservação da integridade do fornecimento elétrico, esses equipamentos são altamente aplicáveis em ambientes industriais complexos, como estações de comutação do nível de distribuição primária e subestações de energia.

Nessa perspectiva, pelo fato de a operação dos painéis ocorrer no nível de média tensão, que abrange valores entre 1 kV e 40,5 kV, o projeto de tais equipamentos é robusto e incorpora sistemas de proteção sofisticados, incluindo a prevenção a curto-circuitos, arcos elétricos e sobrecargas. Esses recursos são essenciais para promover operações seguras e atender às particularidades impostas pela faixa de tensão mencionada. Dessa forma, devido às criticidades observadas no equipamento e suas aplicações, são exigidas certificações específicas de órgãos internacionais de normalização.

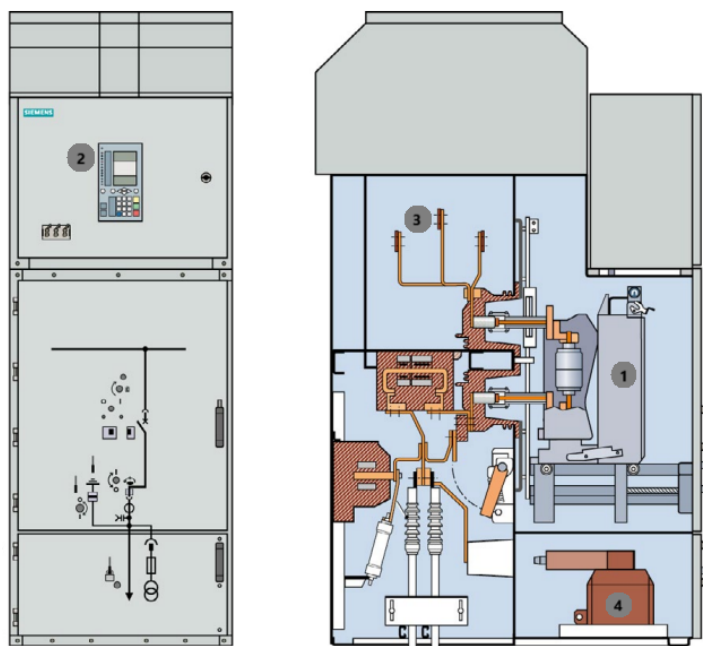
À vista disso, a *International Electrotechnical Commission* é reconhecida como a principal instituição regulamentadora de normas para painéis elétricos de média tensão. Esses equipamentos são submetidos a rigorosos testes e processos de certificação, conforme estipulados pela IEC: 62271-200 (2007). Fazem parte do processo de certificação inúmeros ensaios, como os de resistência a curto-circuitos e arco elétrico, além de testes de isolamento, temperatura e desempenho funcional. Dessa forma, tem-se que a norma supracitada aborda uma série de requisitos para garantir a segurança, confiabilidade e desempenho dos painéis elétricos de média tensão, promovendo, assim, a padronização e qualidade desses equipamentos a nível internacional.

Nesse contexto, conforme a IEC: 62271-200 (2007), os painéis de média

tensão podem apresentar dois meios de isolamento distintos: ar atmosférico e gás. Os painéis isolados a ar empregam essa substância entre os dispositivos condutores, enquanto os modelos isolados a gás utilizam o hexafluoreto de enxofre (SF_6) para o mesmo fim. Desse modo, tem-se que os painéis isolados a gás oferecem excelentes propriedades de isolamento, o que permite que os equipamentos possuam dimensões menores, favorecendo o uso em locais com espaço limitado. No entanto, pelo fato de o SF_6 ser um gás com alto potencial de aquecimento global, o uso dos modelos isolados a ar é preferido para as aplicações. Assim sendo, para os propósitos do trabalho atual, serão considerados os painéis elétricos de média tensão isolados a ar, visando examinar mais detalhadamente as especificidades, requisitos e considerações relevantes para essa tecnologia.

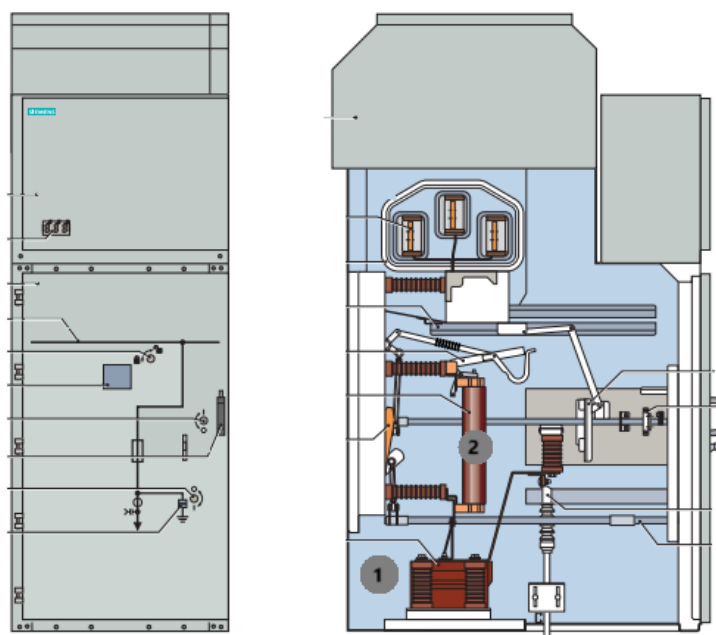
Seguindo as premissas apresentadas anteriormente, os painéis elétricos são compostos por equipamentos capazes de realizar a distribuição, controle e proteção da energia elétrica em sistemas que operam na faixa de média tensão. Nessa perspectiva, a seguir serão apresentados os principais componentes e suas funções, destacando suas características e importância na operação dos sistemas supracitados. Para tanto, nas Figuras 1 e 2 é possível visualizar representações esquemáticas simplificadas dos painéis de média tensão.

Figura 1 – Representação esquemática simplificada de um painel elétrico de média tensão - Painel de disjuntores.



Fonte: Adaptado de Siemens (2023).

Figura 2 – Representação esquemática simplificada de um painel elétrico de média tensão - Painel de interruptores-seccionadores com fusíveis HV HRC.



Fonte: Adaptado de Siemens (2023).

A princípio, têm-se os disjuntores de média tensão, destacados em (1) na Figura 1. Conforme exposto por Belentani (2011), estes são equipamentos de manobra utilizado para proteger o sistema elétrico contra sobrecargas e curto-circuito. Esses dispositivos são projetados para interromper o fluxo de corrente elétrica quando ocorrem condições anormais, como picos de energia ou falhas no circuito. Nesse aspecto, assim como nos painéis elétricos, existem dois meios principais de isolação para os disjuntores: gás e ar. Os equipamentos isolados a ar utilizam essa substância entre os contatos como forma de interromper o arco elétrico durante as operações. Em contrapartida, os dispositivos isolados a gás empregam fluidos como SF_6 para o mesmo fim. Pelo fato de possuírem propriedades dielétricas superiores ao ar, a utilização de gases permite a construção de disjuntores mais compactos, todavia, esses modelos são menos utilizados por levantarem preocupações ambientais consideráveis, devido ao potencial de aquecimento global do SF_6 .

Em sequência, têm-se os relés de proteção, evidenciados em (2), na Figura 1, que são dispositivos projetados para monitorar continuamente parâmetros elétricos, como corrente, tensão e frequência, e acionar ações de proteção quando detectam uma condição de sobrecarga, curto-circuito ou outras falhas. As principais funcionalidades dos relés de proteção incluem a coordenação com outros dispositivos de proteção, a discriminação entre falhas internas e externas, a rápida desconexão do circuito afetado e a minimização do tempo de interrupção do fornecimento de energia. (SIEMENS, 2024).

Além disso, no interior dos painéis também são encontrados barramentos de cobre, destacado em (3) na Figura 1. Esses componentes são responsáveis pela transmissão de energia em nível de média tensão e atuam como o sistema central de distribuição, conectando diversos dispositivos de entrada, saída e controle dos painéis. Devido à alta condutividade elétrica do cobre, os barramentos garantem a transferência eficiente de energia, ao passo que proporcionam conexões seguras e confiáveis entre os demais componentes do sistema, uma vez que o cobre é um material robusto e estruturalmente estável.

Ademais, no escopo de componentes dos painéis de média tensão, estão os

transformadores de instrumentação, os quais são utilizados para modificar os sinais primários de tensão e corrente nominais do sistema para valores compatíveis com os dispositivos de medição e proteção. À vista disso, tem-se que os transformadores de corrente (TC), de acordo com Filho (2013), são utilizados para suprir dispositivos que apresentam resistência elétrica baixa, tais como relés. Mediante ao fenômeno de conversão eletromagnética, os TCs, ilustrados em (1) na Figura 2, transformam elevadas correntes primárias em secundárias proporcionalmente menores, permitindo que os instrumentos de medição e proteção operem adequadamente sem que seja necessário possuírem correntes nominais semelhantes a corrente de carga do sistema ao qual estão ligados. Por outro lado, os transformadores de potencial, vistos em (4), na Figura 1, são equipamentos que visam diminuir tensões elevadas para valores menores, a fim de auxiliar a leitura realizada por instrumentos de medição e relés, tornando-a mais precisa e segura. De forma semelhante aos TCs, os transformadores de potencial permitem que os dispositivos de proteção e medição operem corretamente sem a necessidade de possuírem tensão de isolamento análoga à da rede em que estão ligados.

Outro equipamento presente nos painéis estudados são os fusíveis limitadores primários, como os HRC AT (*High Rupturing Capacity – Ampere Total*), ilustrados em (2) na Figura 2. Esses dispositivos são responsáveis pela proteção de equipamentos e circuitos contra sobrecargas, pelo fato de possuírem a capacidade de limitar a corrente de curto-circuito em razão dos tempos extremamente curtos em que atuam, consoante ao exposto por Filho (2013).

Por fim, tem-se que a estrutura externa dos painéis elétricos é constituída de chapas de aço. O material utilizado para essa finalidade é selecionado com precisão, devido à sua importância crítica para o desempenho e integridade dos equipamentos presentes no interior do painel. À vista disso, na seção subsequente serão detalhadas as características e requisitos específicos deste aço.

3.2 Fundamentos dos aços carbono

Consoante ao exposto por Colpaert (2008), aços são ligas metálicas compostas, majoritariamente, por ferro e carbono. A presença de carbono é fundamental

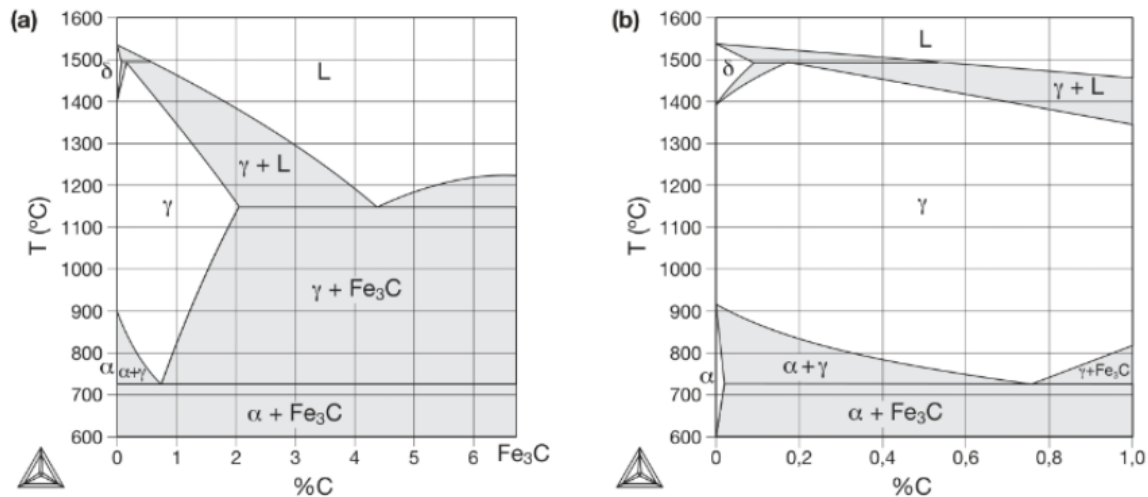
na determinação das propriedades do aço, uma vez que influencia diretamente na microestrutura do material. No entanto, além de ferro e carbono, a liga de aço pode ser composta por diversos elementos, tais como níquel, manganês, silício, entre outros.

À vista disso, a microestrutura do aço é complexa e varia segundo a composição química e tratamentos termomecânicos aos quais o material é submetido. De acordo com Colpaert (2008), subjacente aos efeitos associados a propriedades e tratamentos, está o conceito de transformação de fases. A maneira em que tais transformações ocorrem nas diferentes etapas de processamento dos aços define, em geral, as características e propriedades das estruturas obtidas.

Nesse contexto, tem-se que o ferro pode apresentar duas estruturas cristalinas distintas, a depender da temperatura: cúbica de corpo centrado (CCC), denominada como ferrita e cúbica de face centrada (CFC) denominada austenita. Os elementos de liga, além de possibilitar um aumento na estabilidade das fases presentes, podem gerar uma gama de possibilidades de precipitação e/ou formação de novas fases, como a presença de carbonetos, por exemplo. Dessa forma, no que tange às estruturas em uma liga à base de ferro, é importante conhecer as fases presentes para determinadas temperaturas e composições (principalmente o teor de carbono) desta liga em determinadas temperaturas e processamentos. Para tanto, no contexto de metalurgia, como dito por Colpaert (2008), a maneira mais usual de apresentar uma síntese de tais informações é a partir de diagramas de fases. Estes podem ser obtidos via experimentos ou calculados mediante a dados termodinâmicos.

Diante disso, os diagramas de fases são ferramentas importantes para a previsão de fases estáveis e/ou metaestáveis (como a cementita Fe_3C , por exemplo) em determinadas temperaturas, bem como as regiões de transição de fases. Vale destacar que, a depender do processo de fabricação, é possível suprimir ou até mesmo induzir fases que não são previstas por estes diagramas, devido à principal limitação de não previsão da cinética das reações envolvidas. Um diagrama de fases $Fe - Fe_3C$ em função do teor de carbono se encontra apresentado na Figura 3. Em relação às possíveis fases presentes em aços em condições de equilíbrio, tem-se a ferrita ($Fe - \alpha$), austenita ($Fe - \gamma$) e cementita (Fe_3C), os quais serão descritos adiante.

Figura 3 – Diagrama de equilíbrio metaestável ferro-carbono. Em (a) está representado um diagrama que compreende a faixa de teor de cementita comum a aços e ferros fundidos. Em (b) está representado com maior detalhes as faixas de temperatura e fases para os aços-carbono.



Fonte: (COLPAERT, 2008).

A partir do que foi apresentado, no que compete à ferrita ($Fe - \alpha$), tem-se que esta é uma fase do aço com estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), condição mais estável em baixas temperaturas (abaixo de $912^{\circ}C$). Esse constituinte é capaz de dissolver, em $727^{\circ}C$, cerca de 0,02% de carbono e apresenta baixa dureza e alta ductilidade. Em aços baixo carbono, a ferrita é a fase predominante e fornece ao material boa capacidade de deformação plástica.

Ao aumentar a temperatura, o ferro sofre uma transformação em estado sólido para a austenita ($Fe - \gamma$), que possui estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) e encontra estabilidade em temperaturas acima de $912^{\circ}C$, quando não há a presença do carbono. Essa fase apresenta maior solubilidade de carbono, tendo índices próximos a 2,11% em peso. No que tange às propriedades mecânicas da austenita, observa-se boa ductilidade e tenacidade. No entanto, em condições de resfriamento rápido, a austenita pode originar a formação de uma fase metaestável denominada martensita, cuja estrutura é tetragonal e possui caráter duro e frágil.

Outra fase formada é a cementita, ou carboneto de ferro (Fe_3C), uma fase intermediária formada por cerca de 6,67% de carbono em peso. Mecanicamente, essa fase é dura e frágil, a qual pode diminuir a tenacidade do aço quando presente em

grandes quantidades. Vale ressaltar que essa fase é crítica para determinar fatores como dureza e resistência ao desgaste nos aços. Destaca-se, ainda, a possibilidade de realização de diversos tipos de tratamentos térmicos, como a normalização, recozimento pleno ou esferoidização, que são realizados a fim de modificar a morfologia desta fase na microestrutura.

Um microconstituente importante em aços carbono é a perlita, comum em materiais de médio e alto teor de carbono. Consiste na formação de regiões com lamelas de $Fe - \alpha + Fe_3C$, devido à reação eutetóide (aproximadamente $727^\circ C$) proveniente da austenita ($Fe - \gamma$) durante o resfriamento lento. A perlita, em termos de propriedades mecânicas, confere ao aço uma boa combinação de dureza e tenacidade, além de equilibrar satisfatoriamente aspectos de resistência e ductilidade.

Anteriormente à realização de tratamentos térmicos, os aços podem passar por processos de conformação mecânica a frio que irão gerar um processo denominado encruamento. O encruamento provoca a multiplicação e o entrelaçamento de discordâncias na estrutura cristalina, impedindo a movimentação desses defeitos e, conseqüentemente, aumentando a resistência e dureza do material. No entanto, o processo descrito ocasiona a diminuição da ductilidade, tornando-o mais suscetível a fraturas.

A fim de otimizar as propriedades mecânicas dos aços através do ajuste microestrutural, é possível realizar operações de aquecimento e resfriamento controlados. Esses processos são denominados tratamentos térmicos e suas principais variáveis consistem na temperatura, taxa de aquecimento, taxa de resfriamento e tempo de manutenção em cada patamar. Tais tratamentos desempenham um papel fundamental no arranjo de propriedades mecânicas obtidas nos aços, entre os quais se destacam, no presente trabalho, normalização, recozimento e têmpera e revenimento.

Dentro das possibilidades de tratamentos térmicos para ajuste microestrutural, há a normalização que, consoante a Colpaert (2008), é o tratamento térmico indicado para obter uma estrutura homogênea e refinada, bem como melhorar a resistência e tenacidade dos aços que, tipicamente, são submetidos a trabalhos a quente e apresentam, ao final da conformação, estrutura pouco homogênea e tamanho de

grãos grosseiros. O processo de normalização se dá a partir do aquecimento do aço a uma temperatura acima da zona de austenitização, seguido de resfriamento ao ar. O objetivo desse tratamento é a obtenção de uma microestrutura uniforme, composta majoritariamente por grãos finos de perlita e ferrita, o que possibilita que o material apresente propriedades mecânicas equilibradas. Além disso, a normalização, geralmente, é utilizada para melhorar aspectos de usinabilidade dos materiais, bem como prepará-los para tratamentos subsequentes.

Outro tratamento possível é o recozimento, cujo objetivo é aliviar as tensões internas, aumentar ductilidade e refinar a microestrutura dos aços. De acordo com Silva e Mei (2021), existem três tipos de recozimento: pleno ou supercrítico, subcrítico e esferoidização ou intercrítico.

Posto isso, o recozimento pleno é aquele em que o aço é aquecido a uma temperatura acima da austenitização e resfriado lentamente dentro do forno, resultando em uma microestrutura composta por ferrita e perlita, tornando o aço mais dúctil. Tipicamente, o intuito desse tratamento, conforme exposto por Colpaert (2008), é restituir ao aço as propriedades alteradas por um tratamento termomecânico anterior, além de refinar e/ou homogeneizar estruturas brutas de fusão.

Além disso, há o recozimento subcrítico, o qual, de acordo com Silva e Mei (2021), ocorre em uma temperatura abaixo da de austenitização e é utilizado, sobretudo, para recuperar a ductilidade do aço trabalhado a frio. Em geral, é feito o aquecimento do aço carbono em uma temperatura entre $595^{\circ}C$ e $675^{\circ}C$, seguido de resfriamento ao ar. Esse tratamento também é empregado para aliviar as tensões residuais provenientes de operações de conformação e soldagem, por exemplo. Por outro lado, tem-se o recozimento de esferoidização, cujo objetivo principal, mediante ao exposto por Colpaert (2008), é alterar a distribuição dos carbonetos na microestrutura, transformando-os em pequenas esferas dispersas na matriz, a partir do aquecimento do material a uma temperatura próxima à faixa de austenitização. Esse tratamento é amplamente utilizado em aços de médio e alto carbono e aços-ferramenta, e favorece a ductilidade e usinabilidade do material.

Em relação aos tratamentos térmicos, têm-se, ainda, a têmpera e revenimento.

O processo de têmpera consiste no aquecimento do aço, em temperatura de austenitização, seguido de resfriamento rápido, em um meio como água ou óleo. Em consequência desse processo, há a formação de martensita temperada, fase extremamente dura e frágil. No entanto, para que as propriedades do aço sejam ajustadas para viabilizar um equilíbrio ideal entre dureza e tenacidade, é feito o revenimento. Esse processo constitui-se do aquecimento uniforme do aço a uma temperatura menor que a de austenitização, por tempo suficiente para haver a equalização de temperatura e obtenção das propriedades desejadas, resultando em martensita revenida, que é um microconstituente capaz de fornecer melhor combinação entre tenacidade e resistência.

3.3 Requisitos necessários para a construção de chapas para painéis elétricos de média tensão

Atualmente, a estrutura externa dos painéis elétricos de média tensão é composta por chapas de aço galvanizado, cuja resistência à corrosão e durabilidade são fundamentais para ambientes diversos. Devido à criticidade da aplicação desse material, as chapas devem cumprir rigorosos padrões de qualidade e especificações técnicas. A exemplo disso, tem-se que um dos requisitos essenciais para o material é que ele seja estrutural, ou seja, apresente, mediante a certificações, controle e garantia de suas propriedades mecânicas.

Nesse contexto, como forma de assegurar a qualidade do produto, bem como sua adequação para suportar as exigentes condições operacionais, as chapas de aço são fabricadas com base em diretrizes advindas de órgãos internacionais de normatização, entre as quais se destaca a DIN EN 10346 (2009), cujos parâmetros serão utilizados como referência no presente trabalho. Essa norma especifica requisitos para materiais planos de aço baixo carbono conformados a frio, que possuem revestimento contínuo a quente e tratados superficialmente com zinco e suas ligas, além de elencar propriedades mecânicas exigidas para o material. Ademais, o documento discorre sobre a composição do aço, processo de galvanização utilizado e aspectos de qualidade superficial provenientes de tal técnica. Nessa perspectiva, as características do modelo utilizado para a estrutura de painéis elétricos de média tensão serão descritas a seguir.

Primeiramente, a classificação dos aços baixo carbono na norma é feita con-

siderando a capacidade de conformação a frio desses materiais, de forma crescente. Nesse sentido, o aço empregado para os painéis é o DX51D, pelo fato de esse modelo apresentar características favoráveis para dobramento, processo ao qual a chapa será submetida em etapas posteriores de fabricação. O material em questão possui a composição química e propriedades mecânicas conforme destacado na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas e composição química do DX51D

Propriedades mecânicas		Composição química [% máx. em peso]						
Limite de escoamento [MPa]	Alongamento mínimo [%]	C	P	S	Mn	Ti	Si	Fe
270-500	22	0,18	0,12	0,045	1,2	0,3	0,5	bal.

Fonte: Adaptado de DIN EN 10346 (2009).

Em sequência, a norma aborda aspectos relacionados ao processo de galvanização a quente ao qual a chapa de aço é submetida. Esse tratamento superficial refere-se à imersão do aço em zinco líquido, o que garante, sobretudo, alta proteção contra corrosão. No contexto das chapas de aço utilizadas no invólucro de painéis elétricos, o revestimento segue os parâmetros especificados pela categoria Z275, como descrito na Tabela 2. Vale ressaltar que a qualidade desse revestimento é verificada por meio de testes mecânicos, entre os quais se destacam o teste triplo pontual, que aplica carga em três pontos para medir a resistência e a capacidade do revestimento de suportar tensões e deformações sem falhas; e o teste pontual único, empregado para avaliar a aderência do revestimento em uma área específica, o que permite a identificação de falhas como descamação e variações indesejadas de espessura.

Tabela 2 – Parâmetros considerados para o revestimento Z275.

Massa mínima total do revestimento ¹ [g/m ²]		Valores de espessura do revestimento por superfície ² [μm]		Densidade [g/cm ³]
Teste triplo pontual	Teste pontual único	Valor típico	Faixa	7,1
275	235	20	13 a 27	

Fonte: Adaptado de DIN EN 10346 (2009).

Após o processo de galvanização a quente, nota-se o surgimento de *spangles*, isto é, grãos de cristal de diferentes tamanhos, na superfície do aço. Essa característica

¹ Massa mínima total do revestimento, em ambas as superfícies em [$\frac{g}{m^2}$].

² Valores de orientação teóricos para a espessura do revestimento por superfície no ensaio de ponto único [μm].

depende das condições do revestimento utilizado, no entanto, não afeta a qualidade superficial do material tratado. Porém, no que tange ao aço considerado para as chapas estudadas, é admitida a condição de *minimized spangles*, em que o acabamento é obtido a partir do controle do processo de solidificação, resultando em uma superfície com a presença reduzida de cristais, os quais, muitas vezes, podem não ser visíveis a olho nu.

Subsequentemente, no que compete à qualidade superficial do aço, a norma estabelece três possibilidades: *As coated surface (A)*, *Improved surface (B)* e *Best quality surface (C)*. O modelo estudado prevê que a superfície do aço tenha qualidade B, a qual é obtida a partir do processo de "laminação de acabamento leve", do inglês *skin passing*, que consiste em um processo de laminação a frio usado para melhorar a planicidade e qualidade superficial do material laminado. Dessa forma, como resultado, é permitido que o aço apresente pequenas imperfeições, tais como rupturas de nivelamento, riscos ligeiros e manchas de passivação ligeiras.

Por fim, em termos de tratamento superficial, o modelo em pauta requer a condição de *Chemical Passivation and Oiling (CO)* como uma medida essencial para garantir a proteção da superfície do material. Este processo envolve a aplicação de uma camada química passivadora, que forma uma barreira protetora contra a corrosão, seguida pela adição de óleo, que atua como uma camada adicional de proteção, evitando a oxidação e aumentando a durabilidade do material.

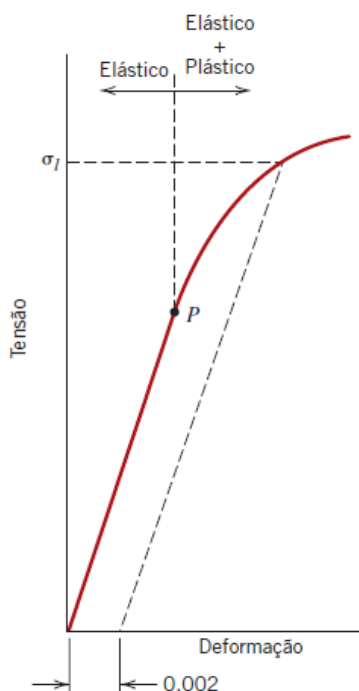
3.3.1 Propriedades mecânicas

Tendo em vista que os painéis elétricos de média tensão são submetidos a condições operacionais rigorosas, faz-se necessário estabelecer e considerar critérios relacionados às propriedades mecânicas do material empregado na fabricação da estrutura externa desses equipamentos. Essa abordagem é essencial para que a *performance* e integridade da aplicação desejada sejam garantidas. Nesse contexto, tem-se que, dentre as diversas propriedades mecânicas observadas nos materiais, destacam-se a tenacidade à fratura, limite de escoamento, ductilidade e coeficiente de encruamento.

À vista disso, no que compete à tenacidade à fratura, tem-se que essa propriedade indica a resistência de um material à ruptura quando há a presença de concentradores de tensão no componente, conforme exposto por Callister e Rethwish (2016). No contexto de aplicação de painéis de média tensão, essa propriedade se torna ainda mais crucial, uma vez que tais equipamentos, por operarem energizados em uma faixa de média tensão, estão suscetíveis à ocorrência de arcos elétricos. Esse fenômeno refere-se à descarga elétrica visível que pode ocorrer entre componentes condutores no painel, provocando calor intenso, luz e ondas de pressão. Nesse cenário, a tenacidade à fratura desempenha um papel essencial, não apenas auxiliando na absorção da energia gerada, mas também prevenindo a propagação de trincas que poderiam comprometer a integridade estrutural do painel. Isso impede uma eventual ruptura do material, garantindo a segurança do equipamento mesmo em condições adversas. Dessa forma, para que a confiabilidade e a segurança da operação e das pessoas ao redor do equipamento sejam garantidas, é essencial que a estrutura externa dos painéis elétricos seja capaz de dissipar a energia e resistir aos esforços gerados em possíveis episódios de arcos elétricos, evitando falhas catastróficas.

Ademais, outra propriedade essencial para esse contexto é o limite de escoamento, o qual se refere à tensão máxima suportada pelo material antes do início da deformação plástica. De acordo com Callister e Rethwish (2016), para metais que apresentem transição gradual do início do regime plástico, o ponto da tensão limite de escoamento pode ser aproximado como aquele que demarca o fim da linearidade na curva tensão-deformação. Graficamente, foi convencionado que a intersecção entre a curva tensão-deformação e uma reta construída paralela e defasada a 0,2% da porção elástica indica a tensão limite de escoamento. Um esquemático desse método pode ser visualizado na Figura 4, em que o ponto σ_l se refere à grandeza desejada. No que compete à estrutura dos painéis elétricos, os valores estabelecidos para essa propriedade compreendem a faixa de 270 a 500MPa, conforme a norma DIN 10346. Este intervalo assegura que o material utilizado possui resistência suficiente para suportar as cargas mecânicas impostas durante a aplicação, sem sofrer deformações permanentes que comprometam sua funcionalidade.

Figura 4 – Esquemático da determinação gráfica da tensão limite de escoamento.



Fonte: Callister e Rethwish (2016).

Em sequência, tem-se a ductilidade, propriedade responsável por medir o grau de deformação plástica desenvolvido até o momento da fratura. Em termos quantitativos, a ductilidade pode ser expressa nos valores de alongamento até a fratura em um ensaio de tração. A norma DIN 10346 prevê um alongamento mínimo de 22%, de forma que este assegura que a estrutura possa acomodar deformações consideráveis sem fraturar, absorvendo impactos e distribuindo tensões internamente. Além disso, essa propriedade é crucial para os processos de fabricação aos quais as chapas metálicas utilizadas estão submetidas, uma vez que favorece a conformabilidade do material.

Adicionalmente, no contexto de conformação de metais, outra propriedade importante a ser considerada é o coeficiente de encruamento. Conforme exposto por Callister e Rethwish (2016), essa propriedade mede a capacidade do material de aumentar sua resistência e dureza à medida que é deformado plasticamente. Ademais, o coeficiente de encruamento expressa o valor máximo de deformação homogênea que um metal pode suportar antes de falhar, o que o torna um parâmetro essencial para prever o comportamento do material durante o processo de conformação. Essa ca-

racterística é especialmente relevante na fabricação de estruturas externas de painéis elétricos, uma vez que as chapas de aço utilizadas para tais estruturas passam por operações de dobramento. Durante esses processos, o encruamento influencia diretamente a capacidade do metal de ser conformado sem trincar ou falhar, assegurando que o material mantenha a integridade mecânica mesmo sob tensões elevadas. Assim, o controle adequado do coeficiente de encruamento é fundamental para garantir que o material possa ser deformado de maneira eficiente, sem comprometer a qualidade e a segurança das estruturas metálicas produzidas.

Em conjunto, as propriedades mecânicas descritas determinam a adequação dos materiais para a estrutura externa de painéis elétricos de média tensão. A combinação de alta tenacidade à fratura, limite de escoamento adequado, boa ductilidade e capacidade de encruamento garante que o material suporte as condições operacionais e ofereça segurança e confiabilidade ao longo de sua vida útil.

3.4 Processo de fabricação de chapas para painéis elétricos

3.4.1 Obtenção de chapas de aço

O aço é uma liga metálica que se destaca por sua resistência, durabilidade e versatilidade. Por essa razão, esse material é amplamente utilizado em diversos segmentos, tornando-se fundamental para a infraestrutura industrial. Nesse contexto, faz-se necessário compreender o processo de fabricação atrelado a esse componente.

A maioria dos aços carbono são fabricados por intermédio do processo de lingotamento contínuo. Após a obtenção da liga, através da redução do minério até o ajuste composicional por diversos processos de refino, o aço líquido é vertido em moldes que solidificam apenas a região externa do material, que será então passado por rolos de laminação. A solidificação do aço neste processo é relativamente complexa e deve-se tomar um cuidado extremo com relação aos parâmetros, para não haver um colapso do material durante a fabricação do lingote. Ao final deste processo, são obtidas placas que passam por processos de corte, identificação e inspeção.

Em seguida, é feita a laminação a quente do aço. Nesse processo, o material é aquecido e estirado até atingir larguras e espessuras desejadas. Como produtos finais

dessa técnica, tem-se chapas grossas e tiras a quente. Para a obtenção de chapas finas de aço, as bobinas provenientes da laminação a quente passam pela decapagem, onde são limpas com ácidos e, posteriormente, sofrem o processo de laminação a frio, a fim de reduzir ainda mais sua espessura.

A partir disso, o material pode passar por tratamentos térmicos de recozimento, com o intuito de aliviar tensões residuais e recuperar as propriedades mecânicas do aço e, em seguida, é submetido ao laminador de encruamento para ajustar propriedades e melhorar aspectos de planicidade do material. Como resultado dos procedimentos descritos obtém-se bobinas de aço, as quais podem ser cortadas em dimensões desejadas, podendo ser comercializadas na forma de chapas.

Além disso, geralmente, o aço produzido a partir da laminação a frio, consoante ao exposto por Fongaro e Ludwig (2023), é amplamente destinado a aplicações que requerem do material boa conformabilidade e qualidade superficial. Por essa razão, o material é encaminhado a processos como galvanização a quente, com o propósito refinar aspectos como proteção a corrosão.

3.4.2 Galvanização a quente

A galvanização a quente é um tratamento superficial amplamente utilizado na indústria para promover a proteção de aços contra a corrosão. Esse processo consiste na imersão do aço em um banho de zinco líquido fundido a temperaturas entre $445^{\circ}C$ a $465^{\circ}C$, que criam uma camada protetora que se liga metalurgicamente à superfície do aço, fornecendo uma barreira física contra agentes corrosivos, o que contribui para o prolongamento da vida útil desses materiais.

Consoante ao exposto por Rose, Wandera e Favor (2021), o processo de galvanização a quente pode ser dividido em três etapas principais: preparação da superfície (pré-tratamento), galvanização e pós-tratamento. É importante ressaltar que a correta execução de cada uma dessas etapas é crucial para a garantia da qualidade do revestimento final.

Nesse contexto, na etapa de pré-tratamento é feita a limpeza adequada da superfície do aço que receberá, posteriormente, o banho de zinco líquido. Conforme

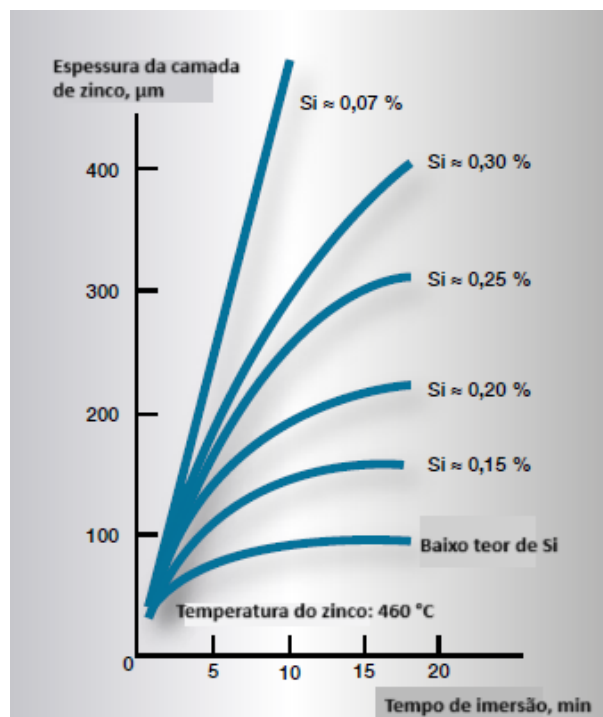
Rose, Wandera e Favor (2021), é essencial haver preparação adequada da superfície do material a ser tratado, uma vez que o alcance dos resultados pretendidos com o processo de galvanização está diretamente associado a essa etapa. Isto, pois a aderência do zinco é favorecida por uma superfície bem tratada. Dessa forma, a princípio, ocorre, a partir da adição de uma solução alcalina quente ou ácido clorídrico, a remoção de componentes como óleos, graxas e sujeiras do material. Em seguida, em um processo conhecido como decapagem, o aço é imerso a um banho ácido para remoção de carepas de laminação e regiões oxidadas, conforme Kanno (2021). Por fim, o aço é submetido a fluxagem, processo que promove a remoção completa dos resíduos de óxidos superficiais presentes, a partir da utilização de sais fundidos, como cloreto de amônio e cloreto de zinco.

Subsequentemente, ocorre a etapa de galvanização a quente propriamente dita. Nesse processo, o aço é completamente imerso em um banho de zinco fundido a temperaturas entre 445°C a 465°C e com pureza mínima de 98%, Rose, Wandera e Favor (2021). A partir disso, observa-se a aderência do zinco à superfície do aço, gerando uma camada de proteção ao material, a qual é otimizada devido à formação de carbonato de zinco, advindo da reação entre o zinco e o dióxido de carbono presente no ar.

Adicionalmente, vale ressaltar que a composição química do aço influencia diretamente na qualidade do revestimento de zinco. Os elementos que causam maior impacto são silício e fósforo. No que compete ao silício, consoante a Pokorny et al. (2016), tem-se que esse elemento provoca o aumento da solubilidade do ferro no zinco, resultando em revestimentos espessos, mas frágeis e com baixa aderência da camada de zinco. Tipicamente, os aços podem ser classificados em três categorias principais, conforme o teor de silício presente em sua composição: "*killed steel*" (teor de silício menor que 0,03% em peso), "*Sandelin range*" (teor de silício entre 0,03% e 0,12% em peso) e "*Sebisty range*" (teor de silício entre 0,15% e 0,25% em peso). Na Figura 5 é possível visualizar uma relação entre a camada de zinco formada de acordo com tempo de imersão do aço com diferentes teores de zinco. É perceptível que, a curva de "baixo teor de silício" demonstra a formação de camadas de zinco mais finas. Dessa forma, de acordo com Pokorny et al. (2016), aços com baixo teor de silício, os chamados "*killed*

steels", proporcionam resultados mais favoráveis para o processo de galvanização a quente, uma vez que a camada de zinco formada é uniforme e não muito espessa, e o material apresenta boas propriedades mecânicas.

Figura 5 – Relação entre a camada de zinco formada de acordo com tempo de imersão do aço com diferentes teores de zinco.



Fonte: Adaptado de Galvanizing. . . (2019).

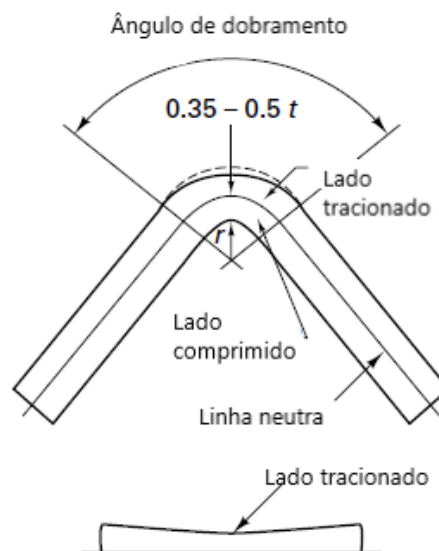
Por outro lado, o fósforo, embora menos influente que o silício, também pode contribuir para o aumento da taxa de dissolução do ferro no zinco, o que promove a formação de camadas mais espessas do revestimento. Quando combinado com o silício, podem causar problemas de aderência do zinco à superfície do aço e diminuir as propriedades mecânicas do material galvanizado. Considerando a combinação com aços que apresentam baixo teor de silício na composição, é interessante que o fósforo represente valores menores a 0,04% na composição em peso do aço, segundo Pokorny et al. (2016).

Por fim, a última etapa do processo de galvanização é o pós-tratamento. Nesse momento, são feitas a inspeção e monitoramento da qualidade dos itens galvanizados. O pós-tratamento pode incluir testes físicos e laboratoriais para verificar a espessura do revestimento, uniformidade e aderência do zinco ao material.

3.4.3 Dobramento

O dobramento é um processo de conformação mecânica fundamental na manufatura de componentes na forma de chapas, uma vez que viabiliza a produção de peças com geometrias complexas e precisas. Essa operação, consoante ao exposto por Black e Kohser (2008), consiste em deformar plasticamente uma chapa metálica até que esta adquira a forma angular desejada, sem que haja danos à estrutura do material. À vista disso, observa-se, na dobra simples, o efeito de tração na superfície exterior da chapa, enquanto o interior assume um estado de compressão, o que pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 – Região de dobra em chapa metálica.



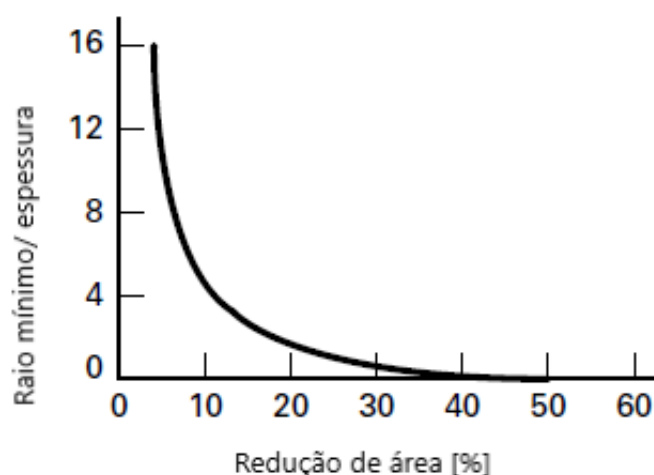
Fonte: Adaptado de Black e Kohser (2008).

Diante disso, tem-se que, como resultado do perfil da chapa metálica e dos esforços aos quais ela é submetida, há o fenômeno conhecido como *springback*. Em concordância com o apresentado por Pritima et al. (2022), este fenômeno diz respeito ao retorno elástico observado na peça dobrada no momento em que a força aplicada sobre tal componente é retirada, indicando a mudança geométrica ocorrida durante o processo de deformação do material.

Nesse contexto, de acordo com Black e Kohser (2008), existem diversos fatores a serem considerados ao estabelecer parâmetros de dobramento para um material. Entre eles, destaca-se o raio mínimo de dobra, que diz respeito ao menor raio possível

de ser praticado sem que haja ruptura do metal. Esse fator está diretamente relacionado com a ductilidade e espessura observadas no material, conforme visualizado na Figura 7, que demonstra como o raio de dobra e a espessura variam com a ductilidade, neste caso, medida feita por redução em área do aço. Assim sendo, nota-se que quanto mais dúctil for o componente, menores são os raios possíveis de serem atingidos, de forma que um raio igual a zero está associado à possibilidade do material dobrar 180° (ou seja, é possível dobrar o material sobre si mesmo sem que haja fratura).

Figura 7 – Relação entre raio mínimo de dobra e ductilidade do metal dobrado (medida a partir da diminuição de área observada).



Fonte: Adaptado de Black e Kohser (2008).

O resultado do processo de dobramento também sofre influências da direção em que o carregamento é aplicado no material. Especificamente em relação aos aços, devido à anisotropia advinda do processo de laminação observável no material, dobras realizadas paralelamente à direção de laminação podem apresentar maior resistência e menor ductilidade, ao passo que dobras feitas perpendicularmente podem resultar em propriedades de conformação mais convenientes. Por essa razão, conforme Black e Kohser (2008), sempre que possível, é indicado optar pela dobra na direção perpendicular. Uma explicação plausível para essa escolha se pauta no fato de a direção paralela favorecer o surgimento e propagação de trincas na superfície da chapa metálica, especialmente na região que se encontra sob tração.

3.5 Aspectos de seleção de materiais

Consoante ao exposto por Ashby (2011), a área de seleção de materiais é extremamente relevante para o desenvolvimento de projetos de engenharia, *design*, ciência e sustentabilidade. Essa área de estudos requer análises multidisciplinares, que envolvem, por exemplo, aspectos de propriedades físico-químicas e mecânicas dos materiais, bem como especificações técnicas e requisitos de desempenho deles. No entanto, o processo de seleção pode ser dificultado pela vasta gama de materiais disponíveis para análise.

Nesse aspecto, a importância da seleção consistente de materiais reside no fato de que diferentes materiais possuem propriedades distintas que podem afetar o comportamento de um produto. Por essa razão, a escolha não pode ser feita isoladamente; é essencial considerar aspectos relacionados a toda a cadeia produtiva do material, desde a matéria-prima até os custos atrelados à produção final.

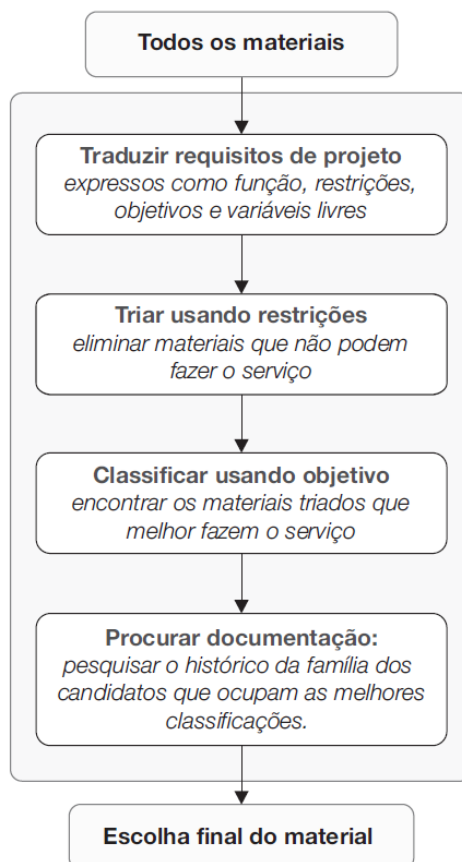
À vista disso, para orientar a seleção de materiais a ser desenvolvida no presente trabalho, optou-se pelo Método de Ashby. Esta metodologia oferece uma abordagem sistemática, fundamentada na correlação entre os requisitos de projeto e propriedades dos materiais. As etapas relativas a esse procedimento serão apresentadas nos tópicos seguintes.

3.5.1 Método de Ashby

O método de Ashby é um procedimento sistemático desenvolvido para viabilizar, de forma consistente, a seleção de materiais. Conforme abordado por Ashby (2011), essa metodologia propicia um arcabouço sólido para a escolha criteriosa de materiais, considerando as necessidades específicas de projetos e condições locais. Dessa forma, é possível explorar a ampla gama de materiais disponíveis e fazer escolhas pertinentes para as mais variadas aplicações.

À vista disso, tem-se que a metodologia proposta por Ashby se pauta em etapas interconectadas, as quais desempenham papéis fundamentais no processo de seleção de materiais. A descrição de cada etapa do método supracitado pode ser visualizada na Figura 8.

Figura 8 – Representação esquemática da metodologia de Ashby para a seleção de materiais.



Fonte: Ashby (2011).

3.5.1.1 Tradução

Inicialmente, o método de Ashby contempla a etapa de Tradução, em que são estipuladas as condições de contorno a serem consideradas na seleção de materiais. Nesta fase, são definidos os requisitos, objetivos e variáveis livres do processo. Esses estão atrelados às propriedades indispensáveis para o material, bem como restrições de custo, durabilidade, desempenho e outros fatores que possam orientar a seleção. Dessa forma, a partir da definição das características mais relevantes, o escopo torna-se tangível e estruturado o suficiente para possibilitar a consulta a bancos de dados de materiais.

3.5.1.2 Triagem

Na etapa de Triagem, os materiais que não atendem aos requisitos previamente estabelecidos são eliminados. Esse processo é fundamental para que o universo de

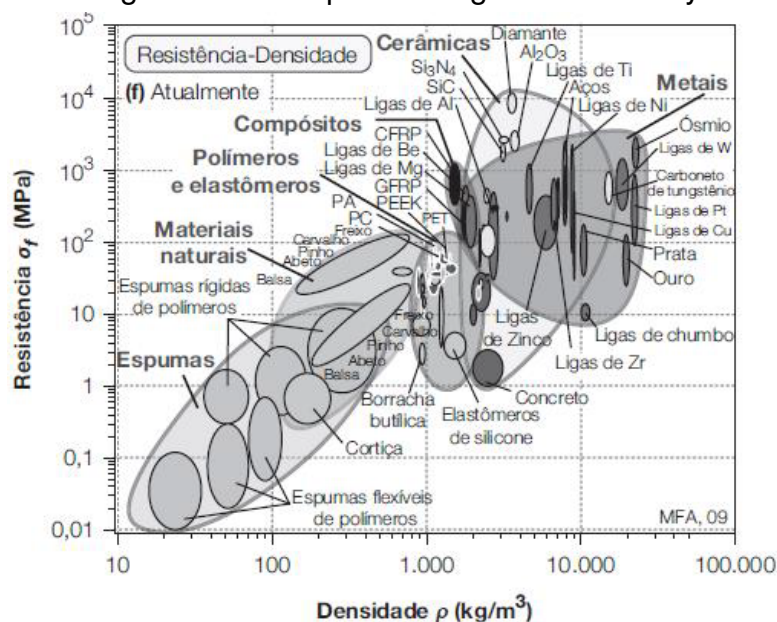
possibilidades seja reduzido, de modo que a escolha seja direcionada para os materiais que têm maior afinidade com as necessidades de projeto.

3.5.1.3 Classificação

Como terceiro passo no método de Ashby, tem-se a Classificação. Nesta etapa, os materiais sobreviventes são elencados mediante à capacidade de atender os critérios de excelência estabelecidos.

Nesse aspecto, a fim de tornar visual a relação entre diferentes propriedades dos materiais e facilitar a interpretação de dados de seleção, é comum utilizar nessa etapa os ditos Diagramas de Ashby, que são gráficos construídos para evidenciar a relação entre grandezas e agrupar materiais de características semelhantes. Um exemplo pode ser visualizado na Figura 9, em que é demonstrada a relação entre resistência à tração e densidade em diversas famílias de materiais.

Figura 9 – Exemplo de Diagrama de Ashby.



Fonte: Ashby (2011).

Além disso, a etapa de Classificação contempla a aplicação de índices de mérito para viabilizar a categorização de materiais com os melhores desempenhos possíveis dentre os requisitos e objetivos estabelecidos para o projeto. Segundo Ashby (2011), os índices de mérito são a representação algébrica das variáveis de interesse

que devem ser maximizadas ou minimizadas, conforme os objetivos estabelecidos na etapa de Tradução.

3.5.1.4 Documentação

Por fim, o método de Ashby propõe uma etapa de Documentação. Nesta fase, as informações acerca dos materiais candidatos são sintetizadas e detalhadas. Esse processo pode incluir estudos de casos, análises de falha, preço, considerações acerca dos processos de fabricação, aspectos de sustentabilidade e outros tópicos relevantes para o contexto. É nessa etapa que a lista de possibilidades é ainda mais afinada, a fim de possibilitar uma escolha consistente do material a ser utilizado na aplicação requerida.

4 METODOLOGIA

Como orientação para a Seleção de Materiais proposta no presente trabalho de conclusão, foi considerado o Método de Ashby. Tal metodologia é pautada em quatro etapas principais, são elas: tradução, triagem, classificação e documentação. Nesse aspecto, para consolidar a etapa de tradução, foi desenvolvida a Tabela 3, a qual contempla a síntese dos objetivos e restrições ponderadas para a aplicação de chapas metálicas na estrutura de painéis elétricos de média tensão. Vale ressaltar que, para as restrições, foram considerados parâmetros estabelecidos pela norma DIN 10346, a qual versa sobre materiais planos de aço baixo carbono conformados a frio, que possuem revestimento feito por galvanização a quente.

Tabela 3 – Tabela de tradução.

Tabela de tradução	
Produto	Chapas de aço para estrutura externa de painéis elétricos de média tensão.
Função	Garantir suporte mecânico e proteção para os equipamentos internos dos painéis elétricos.
Restrições	<ul style="list-style-type: none"> - Limite de escoamento $270 - 500MPa$; ³ - Alongamento $\geq 22\%$; ³ - Propriedades excelentes e aceitáveis para laminação a frio; - Metais ferrosos.
Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> - Maximizar resistência mecânica específica; - Maximizar ductilidade; - Minimizar pegada de carbono na produção primária; - Minimizar custo.
Variáveis livres	Material.

Fonte: Elaborado pela autora.

À vista disso, para viabilizar o processo de seleção, foi utilizado o *software Ansys Granta EduPack 2020*. A ferramenta em questão é amplamente empregada em processos de Seleção de Materiais, uma vez que oferece uma base de dados

³Propriedades determinadas conforme norma DIN 10346.

abrangente com informações detalhadas a respeito de características de diversos materiais e, além disso, possibilita a definição de limites de propriedades e a geração de gráficos comparativos para tornar a análise visual. Adicionalmente, para a etapa de Documentação, foram considerados parâmetros referentes às propriedades obtidas a partir da relação entre composição química dos materiais e tratamentos térmicos aos quais foram submetidos, bem como aspectos dos processos de fabricação das chapas utilizadas para a estrutura externa de painéis elétricos de média tensão.

5 RESULTADOS

5.1 Triagem

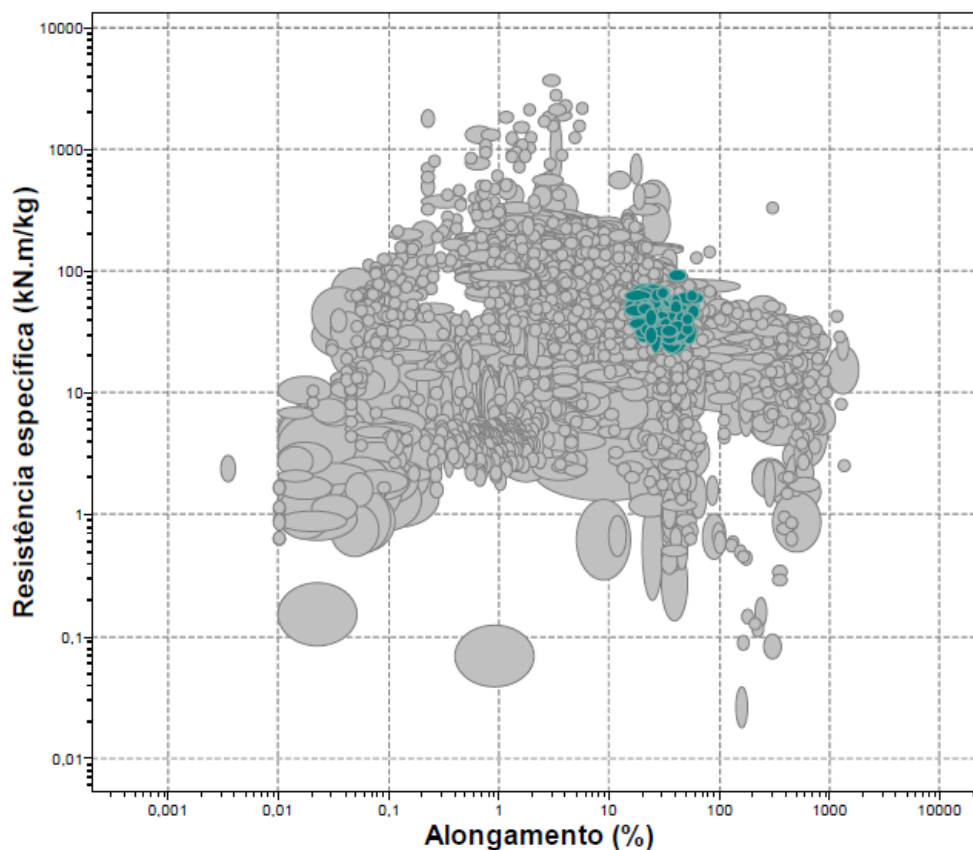
Mediante ao auxílio do *software* Ansys Granta EduPack 2020, foram excluídos da base de dados os materiais cujas propriedades não satisfaziam as restrições elencadas na Tabela 3 de Tradução apresentada no capítulo anterior. Esse processo resultou em 153 sobreviventes, em um universo de 4169 materiais.

5.2 Classificação

Com fundamento na etapa de Triagem realizada previamente, os objetivos especificados na Tabela 3 de Tradução foram utilizados para definir os critérios de excelência a serem maximizados e minimizados na Seleção de Materiais desenvolvida neste trabalho.

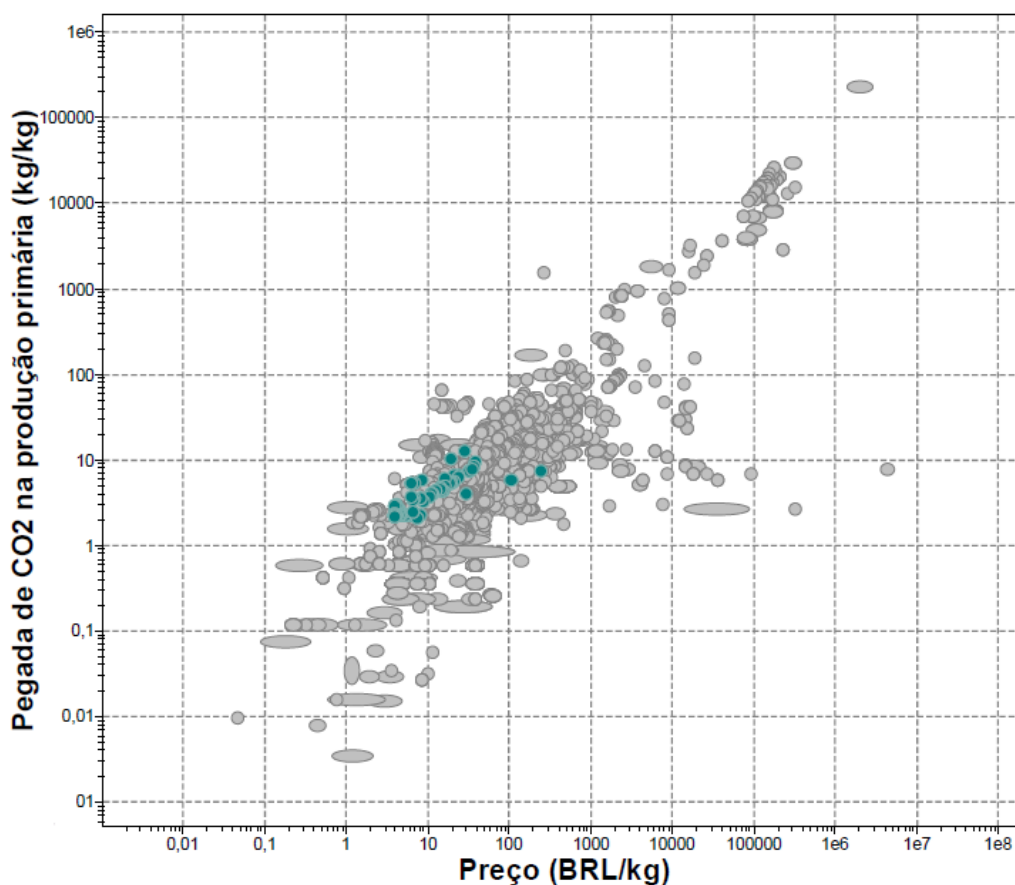
À vista disso, a princípio, foi estabelecida uma correlação entre as propriedades a serem posteriormente maximizadas: resistência mecânica específica e ductilidade. Essas são propriedades cruciais no contexto dos materiais selecionados para a estrutura externa de painéis elétricos de média tensão, uma vez que são determinantes para a integridade e durabilidade da estrutura sob condições operacionais adversas. Nesse aspecto, vale ressaltar que o termo resistência mecânica específica, utilizado, no presente trabalho, para relacionar a tensão limite de escoamento à densidade, é fundamental para garantir que o material escolhido suporte altas cargas sem adicionar peso excessivo à estrutura do painel elétrico. Por outro lado, a ductilidade assegura que o material possa sofrer deformações sem fraturar, proporcionando maior potencial a resistência a falhas e impactos durante a operação. A análise conjunta desses parâmetros é, portanto, essencial para identificar materiais que proporcionem um equilíbrio ideal entre resistência e alongamento. A fim de tornar essa correlação mais evidente, foi construído um mapa de Ashby, disposto na Figura 10, que destaca, em verde, os materiais que passaram pelos requisitos elencados na Tabela 3, tornando-se, assim, candidatos para a seleção frente ao universo de todos os materiais disponíveis.

Figura 10 – Correlação entre Resistência Mecânica Específica e Ductilidade.



Fonte: (GRANTADESIGN, 2020).

Subsequentemente, foram analisadas as variáveis preço e pegada de carbono na produção primária, visando a escolha de materiais que minimizem tais critérios. Em primeiro lugar, é notório que a sustentabilidade tem se tornado prioritária em contextos de Engenharia, haja vista que a utilização de materiais e processos com menor impacto ambiental é essencial para garantir o desenvolvimento de projetos que respeitem os recursos naturais e o meio ambiente. Nesse contexto, a descarbonização dos processos produtivos e a escolha de materiais com baixas emissões de carbono são fundamentais para reduzir o impacto ambiental dos projetos e contribuir para a transição a uma economia mais sustentável. Em contrapartida, é crucial que a viabilidade econômica seja um critério igualmente analisado e priorizado, uma vez que a aplicação de soluções sustentáveis em larga escala no mercado é amplamente influenciada por preços acessíveis. Dessa forma, uma relação entre essas duas propriedades pode ser visualizada na Figura 11, que destaca, na cor verde, as diversas possibilidades no contexto de materiais observados.

Figura 11 – Correlação entre Pegada de CO_2 na produção primária e Preço.

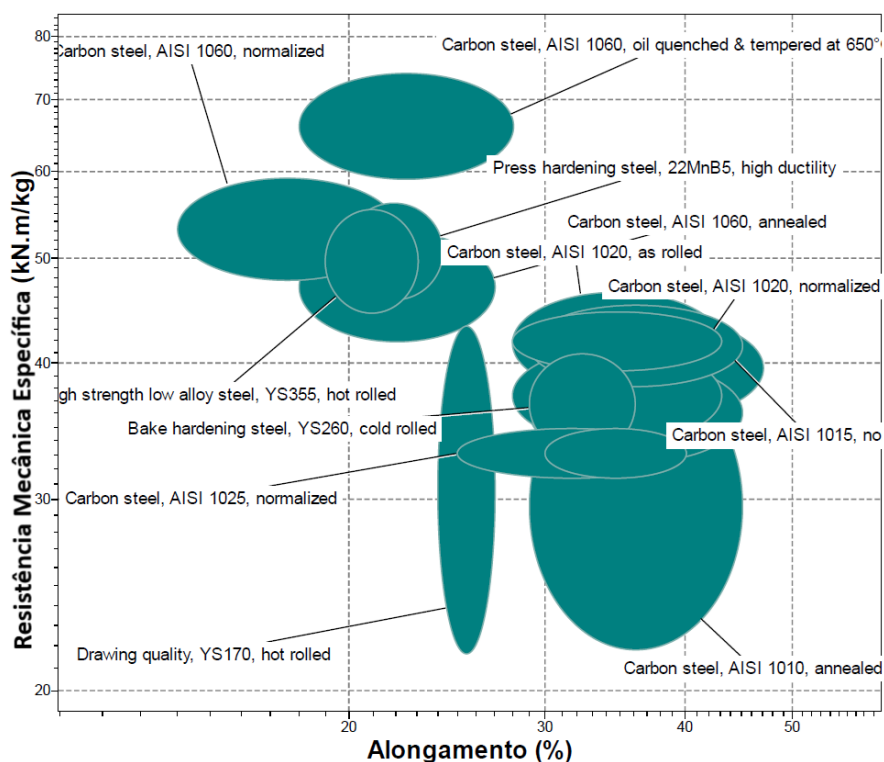
Fonte: (GRANTADESIGN, 2020).

Em seguida, para viabilizar a classificação dos materiais candidatos que passaram pela etapa de Triagem, foi desenvolvido um índice de mérito (IM) com base nos objetivos estabelecidos para as propriedades resistência mecânica específica e alongamento. Vale ressaltar que os índices supracitados são métricas que permitem avaliar o quão bem um material atende os critérios específicos para uma determinada aplicação. Diante disso, uma representação matemática para o IM elaborado pode ser vista na Equação 1.

$$IM_1 = Resistência\ específica \cdot Alongamento = \left[\frac{kN \cdot m \cdot \%}{kg} \right] \quad (1)$$

Dessa forma, em posse das análises realizadas, a princípio, foi possível refinar ainda mais a Seleção obtida via *Ansys Granta EduPack 2020*, obtendo 16 materiais candidatos para o processo, conforme visualizado na Figura 12.

Figura 12 – Materiais candidatos para a Seleção de Materiais a partir do índice de mérito.



Fonte: (GRANTADESIGN, 2020)

À vista disso, como forma de estabelecer uma comparação quantitativa dos dados obtidos a partir dos cálculos do índice de mérito, foi construída a Tabela 4, considerando valores médios para propriedades e parâmetros de cada material candidato, conforme fichas presentes no *software Ansys Granta EduPack 2020*.

Tabela 4 – Tabela de Materiais Candidatos.

Materiais candidatos	Alongamento ⁴	Resist. específica ⁵	CO_2 ⁶	Preço ⁷	IM 1
Aço carbono, AISI 1015, encruado	39	39,85	2,4	3,8	1554,2
Aço carbono, AISI 1015, normalizado	37	41,7	2,4	3,8	1542,9
Aço carbono, AISI 1060, temperado e revenido a 650°C	23	66,55	2,4	3,8	1530,7
Aço carbono, AISI 1020, encruado	35,5	42,05	2,4	3,8	1492,8
Aço carbono, AISI 1020, normalizado	35,5	42,05	2,4	3,8	1492,8
Aço carbono, AISI 1015, recozido	37	36,3	2,4	3,8	1343,1
Aço carbono, AISI 1020, recozido	35,5	37,6	2,4	3,8	1334,8
Aço <i>Bake hardening</i> , YS260, laminado a frio	32,5	36,95	2,3	3,8	1200,9
Aço carbono, AISI 1025, recozido	35	33,2	2,4	3,8	1162,0
Aço carbono, AISI 1010, recozido	37	31	2,4	3,8	1147,0
Aço para endurecimento por prensagem, 22MnB5, alta ductilidade	22	51	2,3	3,9	1122,0
Aço carbono, AISI 1025, normalizado	32,5	33,2	2,4	3,8	1079,0
Aço carbono, AISI 1060, recozido	22,5	47,45	2,4	3,8	1067,6
Aço baixa liga de alta resistência, YS355, laminado a quente	21	50	2,4	3,8	1050,0
Aço carbono, AISI 1060, normalizado	18	53,5	2,4	3,8	963,0
YS170, laminados a quente	25,5	32,5	2,3	3,8	828,8

Fonte: Adaptado de GrantaDesign (2020).

Ao analisar a Tabela 4, foi perceptível que os materiais candidatos apresentaram valores matematicamente iguais para as variáveis preço e pegada de CO_2 na produção primária. Isso pode ser justificado pelo fato de o conjunto observado ser pertencente à família dos aços carbono e, portanto, exibir características semelhantes, sobretudo no que diz respeito à composição química e ao processo de fabricação primário, constatando, assim, a coerência dos resultados obtidos. No entanto, é importante destacar que os tratamentos termomecânicos subsequentes, como o encruamento,

⁴Alongamento medido em %.

⁵Resistência mecânica específica medida em $\frac{kN \cdot m}{kg}$.

⁶Pegada de carbono na produção primária medida em $\frac{kg}{kg}$.

⁷Preço medido em $\frac{BRL}{kg}$.

normalização ou recozimento, podem influenciar significativamente essas variáveis, uma vez que exigem maior consumo de energia, o que aumenta tanto o custo quanto a pegada de carbono dos materiais processados.

Ademais, ao analisar os resultados do cálculo de índice de mérito, notou-se que a diferença percentual entre os cinco primeiros materiais candidatos foi, em média, 2%. Por essa razão, admitiu-se que são comparáveis e, portanto, reúnem características que podem favorecer a aplicabilidade em estruturas externas de painéis elétricos de média tensão. Dessa forma, tais materiais foram priorizados para a etapa de Documentação e Seleção Final subsequente.

5.3 Documentação e Seleção final

Consoante a Rodrigues et al. (2017), o aço é classificado conforme a quantidade de carbono presente em sua composição. São considerados aços baixo carbono aqueles cuja porcentagem de carbono representa, no máximo, 0,3% na composição química do material. Tipicamente, possuem alta tenacidade e ductilidade, além de resistência mecânica e dureza moderadas. Por outro lado, quando a presença do carbono varia entre 0,3% e 0,6% na composição do aço, têm-se os aços de médio carbono. Estes são materiais que apresentam maior resistência e dureza, se comparados aos de baixo de carbono, mas possuem menor tenacidade e ductilidade.

Dessa forma, entre os materiais elegidos para a presente etapa, estão aços de baixo (AISI 1015 e AISI 1020) e médio carbono (AISI 1060), associados a diferentes tratamentos térmicos. Dessa forma, inicialmente, na Tabela 5 é apresentada uma síntese da composição química dos aços destacados, obtida a partir das fichas de material disponíveis no *software Ansys Granta EduPack 2020*.

Tabela 5 – Composição química dos materiais selecionados.

Material	Composição química [% em peso]				
	C	Fe	Mn	P (máx)	S (máx)
Aço carbono, AISI 1015, encruado	0,15	99,35	0,45	0,02	0,025
Aço carbono, AISI 1015, normalizado	0,15	99,35	0,45	0,02	0,025
Aço carbono, AISI 1060, temperado e revenido a 650°C	0,6	98,6	0,75	0,02	0,025
Aço carbono, AISI 1020, encruado	0,2	99,3	0,45	0,02	0,025
Aço carbono, AISI 1020, normalizado	0,2	99,3	0,45	0,02	0,025

Fonte: Adaptado das fichas de material presentes no *software* GrantaDesign (2020).

Além disso, a combinação entre composição química e tratamentos térmicos forneceu as propriedades médias elencadas subsequentemente, na Tabela 6, cujos valores foram determinados conforme fichas de materiais presentes no *software* Ansys Granta EduPack 2020. Vale destacar que as propriedades mecânicas escolhidas para análise foram determinadas com base no proposto pela norma DIN 10346, utilizada, no presente trabalho, como referência para a categorização de chapas de aço empregadas na estrutura externa de painéis elétricos de média tensão. Ademais, outros parâmetros fundamentais para compor a análise final foram afinidade do material com o processo de galvanização a quente e tenacidade à fratura, além de aspectos relacionados a impacto ambiental, sobretudo, pegada de carbono.

Tabela 6 – Propriedades mecânicas e aceitação para laminação a frio dos materiais selecionados.

Material	Limite de escoamento [MPa]	Alongamento [%]	Resistência mecânica específica [$\frac{kN \cdot m}{kg}$]	Tenacidade à fratura [$MPa \cdot \sqrt{m}$] ⁸	Laminação a frio
Aço carbono, AISI 1015, encruado	312,5	39	39,85	54,5	Aceitável
Aço carbono, AISI 1015, normalizado	327,5	37	41,7	52	Aceitável
Aço carbono, AISI 1060, temperado e revenido a 650 °C	522,5	23	66,55	56	Aceitável
Aço carbono, AISI 1020, encruado	330	35,5	42,05	54,5	Aceitável
Aço carbono, AISI 1020, normalizado	330	35,5	42,05	53	Aceitável

Fonte: Adaptado das fichas de material presentes no *software* GrantaDesign (2020).

No que compete à galvanização a quente, sabe-se que esse é um processo amplamente utilizado para viabilizar a proteção contra corrosão em estruturas de aço. De acordo com Pokorny et al. (2016), a composição química do aço, especialmente o teor de silício (Si) e fósforo (P), afeta a espessura e aderência do revestimento de zinco. O silício tem a capacidade de aumentar a solubilidade do ferro no zinco, resultando em revestimentos mais espessos e frágeis. Por outro lado, tem-se que o fósforo, embora menos influente que o silício, também pode contribuir para o aumento da taxa de dissolução do ferro no zinco, o que prejudica a aderência do zinco à superfície do aço e promove a diminuição das propriedades mecânicas do material galvanizado.

Dessa forma, mediante à norma SAE J403, da Society of Automotive Engineers (SAE) (2001), os aços elencados na Tabela 5 possuem teor de silício (Si) entre 0,15% e 0,3%, o que os classifica em "*Sebisty range*", conforme Pokorny et al. (2016). Materiais com tal composição de silício podem gerar revestimentos com espessuras maiores e mais frágeis que os ditos "*killed steels*". No entanto, aços classificados em "*Sebisty*

⁸Parâmetros estimados.

range" ainda permitem bons resultados para a galvanização a quente, desde que haja controle maior sobre os parâmetros do processo, como o tempo de imersão do material em zinco líquido, o qual, segundo a Figura 5, deve ser menor que cinco minutos, preferencialmente.

Adicionalmente, em relação à tenacidade à fratura, tem-se que essa propriedade indica a resistência de um material à ruptura quando há a presença de concentradores de tensão no componente, consoante a Callister e Rethwish (2016). No contexto de aplicação de painéis elétricos de média tensão, em especial, a tenacidade à fratura se torna essencial, uma vez que permite que a estrutura externa desses equipamentos absorva e dissipe a energia gerada por eventuais episódios de arco elétrico, garantindo, assim, a segurança da operação e pessoas ao redor do painel. Por essa razão, tal propriedade foi considerada na presente análise. Dessa forma, em termos numéricos, tem-se que a tenacidade à fratura, de acordo com Ashby (2011), assume valores entre 41 a $82MPa\sqrt{m}$ para aços baixo carbono e, 12 e $92MPa\sqrt{m}$ para aqueles de médio carbono. Nesse contexto, uma vez que a tenacidade à fratura é uma propriedade que se deseja sempre maximizar, a escolha dos materiais dispostos na Tabela 6 se mostrou vantajosa, pelo fato de apresentarem resultados satisfatórios para essa propriedade. Assim, essa característica torna-se um diferencial importante para o contexto estudado, desde que as demais propriedades exigidas sejam igualmente satisfeitas.

No entanto, mediante a análise da Tabela 6, sobretudo em relação ao **Aço carbono, AISI 1060, temperado e revenido a 650 °C**, percebeu-se que, em termos de limite de escoamento, o material apresenta, na faixa obtida pelo *software Ansys Granta EduPack 2020*, ($465MPa - 580MPa$), limite inferior compatível com o máximo proposto pela norma DIN 10346 ($500MPa$). No entanto, o valor médio do limite de escoamento, considerado para os cálculos realizados, ultrapassa a premissa estabelecida pela norma supracitada. Dessa forma, tendo em vista que essa propriedade pode influenciar o processo de dobramento da chapa metálica, uma vez que, quanto maior o limite de escoamento do material, maior é a resistência a deformações plásticas, pode-se dizer que o processo de dobramento, que depende de deformações dessa natureza, exigiria maiores esforços mecânicos caso fosse realizado no aço supracitado. Dessa forma, embora o aço AISI 1060 temperado e revenido apresente bons resultados

para resistência mecânica específica e tenacidade à fratura, constatou-se que não é adequado para a aplicação na estrutura externa de painéis de média tensão.

A partir disso, observou-se que os materiais **Aço carbono, AISI 1015, encruado**; **Aço carbono, AISI 1015, normalizado**; **Aço carbono, AISI 1020, encruado** e **Aço carbono, AISI 1020 normalizado** estão em conformidade tanto com as proposições da norma DIN 10346 para propriedades mecânicas de chapas de aço, quanto com os parâmetros selecionados para compor a presente análise. Esses materiais atendem requisitos de limite de escoamento e alongamento, enunciados na norma DIN 10346, apresentam composição química favorável para galvanização a quente e possuem, ainda, tenacidade à fratura satisfatória, garantindo a resistência necessária para a aplicação.

Em contrapartida, ao considerar a pegada de carbono e o custo dos materiais selecionados, é importante destacar que, embora os aços carbono AISI 1015 e AISI 1020, tanto encruados quanto normalizados, sejam comparáveis em termos de preço e pegada de carbono na produção primária, conforme visto na Tabela 4, os tratamentos termomecânicos desempenham um papel crucial na análise e seleção final. Materiais que necessitam de tratamentos termomecânicos, como a normalização, apresentam uma pegada de carbono final maior em comparação com os materiais apenas encruados. Isso se deve ao fato de que o tratamento realizado requer o aquecimento do material a altas temperaturas, o que, além de consumir mais energia, aumenta a emissão de gases de efeito estufa. Por essa razão, a escolha de materiais que evitam tratamentos térmicos adicionais pode ser vantajosa tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, especialmente quando se busca minimizar o impacto ambiental.

Posto isso, com fundamento na análise desenvolvida, foi perceptível que todos os materiais elencados — Aço carbono AISI 1015 e AISI 1020, tanto encruados quanto normalizados— são aptos para aplicação em estruturas externas de painéis elétricos de média tensão, uma vez que atendem às condições técnicas exigidas, garantindo tanto a segurança quanto a durabilidade do equipamento. No entanto, considerando a questão relacionada à pegada de carbono, é essencial dar preferência a materiais que não requerem tratamentos termomecânicos, uma vez que esses processos aumentam

significativamente o impacto ambiental. Portanto, em termos de sustentabilidade e eficiência, os aços **AISI 1015** e **AISI 1020** encruados se destacaram como as opções mais recomendadas, sendo priorizados na seleção final.

6 CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho, foi realizada uma Seleção de Materiais para a estrutura externa de painéis elétricos de média tensão, com enfoque em parâmetros dos processos de fabricação aos quais esses componentes são submetidos. Como diretriz para as chapas de aço utilizadas nesse contexto, foi utilizada a norma DIN 10346. A partir dessa normativa foi possível estabelecer, para a chapa de aço, referências para o processo de conformação a frio, tratamentos superficiais, composição química e propriedades mecânicas.

Nessa perspectiva, a Seleção de Materiais desenvolvida foi direcionada pelo Método de Ashby, o qual é estruturado em quatro etapas: Tradução, Triagem, Classificação e Documentação. Além disso, para compor a etapa de Classificação, foram aplicados índices de mérito para viabilizar a categorização de materiais com os melhores desempenhos possíveis dentre os requisitos e objetivos estabelecidos para o projeto. Como ferramenta computacional, foi utilizado o *software Ansys Granta Edu-Pack 2020*. Esta ferramenta apresenta uma base de dados robusta, a qual contribuiu significativamente para a identificação eficientes de materiais com potencial para a aplicação.

À vista disso, foram escolhidos materiais da classe dos aços baixo carbono 1015 e 1020 encruados para a aplicação estudada. Esses materiais atenderam requisitos de limite de escoamento (270 a 500MPa) e alongamento mínimo (22%), enunciados na norma DIN 10346, apresentaram composição química favorável para galvanização a quente e, ainda, tenacidade à fratura satisfatória, garantindo a resistência necessária para a aplicação. Ademais, em termos de sustentabilidade, os materiais supracitados se mostraram vantajosos, uma vez que não requerem tratamentos termomecânicos posteriores à fabricação, o que gera menor pegada de carbono. Por essa razão, concluiu-se, a partir da pesquisa desenvolvida no presente trabalho, que os aços carbono 1015 e 1020 encruados estão aptos para a estrutura de painéis elétricos de média tensão, uma vez que garantem aspectos como segurança, durabilidade do equipamento e minimizam impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

- ASHBY, M. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico**. [S.l.]: Elsevier, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 35, 36, 37 e 49.
- BELENTANI, Y. **Estudo de caso de autoprodutores, cogeneradores, em paralelismo momentâneo com o fornecimento de energia elétrica em concessionária**. São Carlos, São Paulo, Brasil: [s.n.], 2011. Citado na página 18.
- BLACK, J. T.; KOHSER, R. A. **DeGarmo's Materials & Processes in Manufacturing**. United States of America: John Wiley & Sons, Inc, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2016. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 49.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo - SP: Blucher, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 19, 20, 21, 22 e 23.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 10346:2009 - Continuously hot-dip coated steel flat products**: Technical delivery conditions. [S.l.], 2009. 45 p. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- FILHO, J. M. **Manual de Materiais Elétricos**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 19.
- FONGARO, L. F.; LUDWIG, G. A. Ensaio de tração em chapas finas de aço. **X Congresso de Pesquisa e Extensão da Faculdade da Serra Gaúcha & VIII Salão de Extensão**, 2023. Citado na página 30.
- GALVANIZING Handbook. 7. ed. Stockholm: Nordic Galvanizers, 2019. Digital version. Disponível em: <<https://www.nordicgalvanizers.com>>. Citado na página 32.
- GRANTADESIGN. **Granta Edupack**. 2020. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack>>. Citado 6 vezes nas páginas 42, 43, 44, 45, 47 e 48.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62271-200:2007 - High-voltage switchgear and controlgear**: Part 200: Ac metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kv and up to and including 52 kv. [S.l.], 2007. 89 p. Citado na página 15.
- KANNO, R. **Recuperação cruzada de metais a partir de resíduos provenientes de eletroeletrônicos e da galvanização a fogo**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2021. Citado na página 31.

POKORNY, P. et al. Effect of chemical composition of steel on the structure of hot-dip galvanized coating. **Metalurgija**, Czech Technical University - Klokner Institute, Prague, Czech Republic, v. 55, n. 1, p. 115–118, 2016. ISSN 0543-5846. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 48.

PRITIMA, D. et al. Analysis of spring back behaviour during bending of aisi 1045 sheet metal. **Materials Today: Proceedings** **59**, p. 1575 –1580, 2022. Citado na página 33.

RODRIGUES, L. M. et al. Estudo da microestrutura e da microdureza dos aços 1020 e 1060. **Cadernos UniFOA**, v. 9, n. 2 esp, p. 39–44, 2017. Disponível em: <<https://revistas.unifoa.edu.br/cadernos/article/view/1182>>. Citado na página 46.

ROSE, A.; WANDERA, C.; FAVOR, E. Parameters influencing the hot dip galvanizing processes of sheet metal. **American Journal of Materials Synthesis and Processing**, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

SIEMENS. **Medium-Voltage Switchgear Type NXAIR up to 17.5 kV, up to 40 kA, Air-Insulated**. [S.l.], 2023. Disponível em: <<http://siemens.com/nxair>>. Citado na página 17.

SIEMENS. **Digital protection relays and control - SIPROTEC 5**. 2024. Disponível em: <<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10233533#More%20information>>. Citado na página 18.

SILVA, A. L. V. da Costa e; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 4. ed. São Paulo - SP: Blucher, 2021. Citado na página 23.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS (SAE). **SAE J403: Chemical Compositions of SAE Carbon Steels**. Warrendale, PA, 2001. Superseding J403 JUN2000. Disponível em: <<http://www.sae.org>>. Citado na página 48.