



ENGENHARIA: A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XV

Frederico Celestino Barbosa

Engenharia: a máquina que constrói o futuro

15ª ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

15ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Barbosa, Frederico Celestino
B238E Engenharia: a máquina que constrói o futuro

/ Frederico Celestino Barbosa. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2025

77 f.: il

DOI: 10.37423/2025.edcl1095

ISBN: 978-65-5367-627-5

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. desenvolvimento 2. projeto 3. construção I. Barbosa, Frederico Celestino II. Título

CDU: 620

<https://doi.org/10.37423/2025.edcl1095>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

Dr. Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

Dra. Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Gabriela Cristina Borborema Bozzo

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	5
ENERGIA VERDE: ANÁLISE DAS TIPOLOGIAS DE RASTREADORES SOLARES PARA GERADORES FOTOVOLTAICO	
Viviane Zório Peixoto Arima	
Murilo Macane Arima Zório	
DOI 10.37423/250309746	
CAPÍTULO 2	31
AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRABALHO NA CONSTRUÇÃO CIVIL: ESTUDO DE CASO EM OBRA VERTICAL	
Viviane Zório Peixoto Arima	
Murilo Macane Zório Arima	
DOI 10.37423/250309747	
CAPÍTULO 3	46
INFLUÊNCIA DO ESTADO DE TENSÃO NO MODO DE FALHA EM MATERIAIS DÚCTEIS VIA MODELAGEM COMPUTACIONAL E ANÁLISE EXPERIMENTAL	
Eduardo Atem de Carvalho	
Larissa Gomes Simão	
Fátima Rúbiade Matos Dias Nogueira	
Jefferson da Silva Bueno	
DOI 10.37423/250309810	
CAPÍTULO 4	63
A BRIEF REVIEW ON HARDNESS PREDICTION OF MULTICOMPONENT ALLOYS	
Raphael Basilio Pires Nonato	
Thomaz Augusto Guisard Restivo	
José Carlos Machado Junior	
DOI 10.37423/250309815	

Capítulo 1

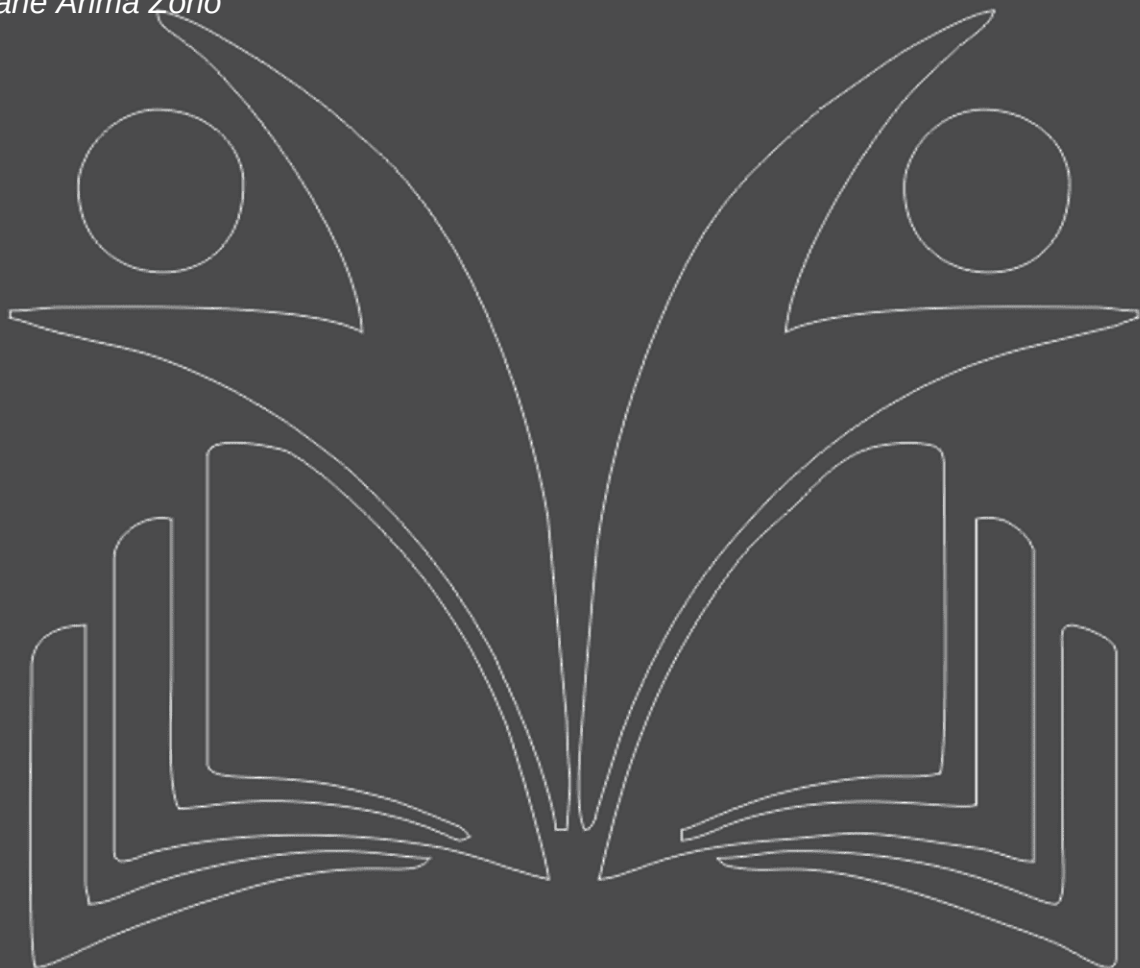


10.37423/250309746

ENERGIA VERDE: ANÁLISE DAS TIPOLOGIAS DE RASTREADORES SOLARES PARA GERADORES FOTOVOLTAICO

Viviane Zório Peixoto Arima

Murilo Macane Arima Zório



Resumo: A energia solar é vital por ser uma fonte de energia renovável, limpa e sustentável, que contribui significativamente para a mitigação das mudanças climáticas, redução da dependência de combustíveis fósseis e promoção de independência energética. Este estudo se propõe a realizar uma análise comparativa das principais estruturas de rastreadores solares disponíveis no mercado. Seu objetivo geral foi analisar as principais diferenças de eficiência e viabilidade econômica entre diferentes tipos de estruturas de rastreadores solares na otimização do desempenho de painéis fotovoltaicos. A metodologia empregada constou na revisão bibliográfica entre estudos nacionais e internacionais entre os anos de 2013 a 2023. Foi observado que a análise comparou diferentes rastreadores solares, evidenciando como as suas características técnicas e funcionais impactam a eficiência de painéis fotovoltaicos, com sistemas de dois eixos e de um eixo apresentando distintas vantagens e desvantagens. A viabilidade econômica dos rastreadores foi avaliada, constatando-se que, apesar de custos iniciais e de manutenção mais elevados, o aumento significativo na geração de energia pode compensar esses gastos a longo prazo. As condições climáticas e geográficas afetam a eficiência dos rastreadores, com regiões de maior irradiação solar e variação diurna de ângulo de incidência beneficiando-se mais deles; a escolha do rastreador deve ser baseada na análise dessas condições, bem como em um estudo de viabilidade econômica detalhado.

Palavras-chave: Energia Fotovoltaica. Escolha de sistemas. Energia Verde.

1 INTRODUÇÃO

Em uma era de conscientização ambiental e necessidade de sustentabilidade energética, o mundo encontra-se em uma busca crescente por fontes de energia limpas e renováveis. As preocupações com a mudança climática, os efeitos negativos das emissões de poluentes e a dependência de combustíveis fósseis têm impulsionado essa busca, evidenciando a necessidade de diversificação das fontes energéticas.

A crescente preocupação com o meio ambiente e a necessidade de diversificação das fontes de energia têm impulsionado a busca por alternativas limpas e renováveis. Dentre elas, a energia solar fotovoltaica vem ganhando destaque devido à sua capacidade de converter diretamente a luz solar em eletricidade, sem emissões de poluentes e com custos de produção decrescentes. A eficiência dos painéis solares é um aspecto fundamental para a viabilidade e competitividade dessa fonte energética em comparação com alternativas disponíveis.

A energia solar fotovoltaica emerge como uma das soluções mais promissoras. Ela possui a notável capacidade de converter diretamente a luz solar em eletricidade de maneira limpa, eficiente e com custos de produção progressivamente mais competitivos. No entanto, a eficiência desta tecnologia não é inerente apenas ao uso dos painéis solares, mas também à sua configuração e otimização. Os rastreadores solares, ou trackers, são estruturas que movem os painéis solares para acompanhar a trajetória do sol durante o dia, maximizando assim a exposição à luz solar e, por consequência, a produção de energia. Porém, a escolha de qual estrutura de rastreador solar utilizar não é trivial, pois diferentes tipos apresentam distintas eficiências e viabilidades econômicas (SILVA; GOUVEIA; URBANETZ JUNIOR, 2020).

Dessa forma, questiona-se: quais as principais diferenças de eficiência e viabilidade econômica de diferentes tipos de estruturas de rastreadores solares, também conhecidos como trackers, na otimização do desempenho de painéis fotovoltaicos?

A energia solar fotovoltaica é uma fonte de energia limpa e renovável que tem ganhado grande relevância devido à necessidade de reduzir as emissões de gases poluentes e a dependência de combustíveis fósseis (OLIVEIRA; VILARINHO; MARQUES, 2023). Neste contexto, o uso de rastreadores solares para otimizar a eficiência de painéis fotovoltaicos torna-se uma questão estratégica. No entanto, a escolha do tipo de rastreador solar deve ser informada não apenas por critérios de

eficiência, mas também de viabilidade econômica, uma vez que diferentes estruturas apresentam variações de custos e benefícios.

Neste sentido, este estudo se propõe a realizar uma análise comparativa das principais estruturas de rastreadores solares disponíveis no mercado. A proposta é identificar e comparar suas características técnicas e funcionais que impactam na eficiência dos painéis fotovoltaicos, avaliando também a viabilidade econômica de cada tipo de rastreador. Este aspecto levará em conta os custos de instalação, manutenção e depreciação, bem como os benefícios em termos de economia de energia e redução de emissões de gases poluentes.

Adicionalmente, considera-se fundamental investigar o impacto das condições climáticas e geográficas na eficiência e viabilidade econômica dos diferentes tipos de rastreadores solares. Este componente é crucial, pois as condições ambientais podem influenciar significativamente o desempenho e a eficiência dos rastreadores, determinando assim a sua aplicabilidade em diferentes regiões. A partir dos resultados obtidos nesta análise, o artigo buscará fornecer recomendações para a escolha e implementação de rastreadores solares em projetos de energia fotovoltaica. A ideia é gerar um direcionamento informado que contribua para o desenvolvimento de projetos de energia solar mais eficientes e economicamente viáveis, considerando os diferentes contextos e necessidades.

Portanto, este estudo é relevante tanto para o campo acadêmico, contribuindo para o aprofundamento da pesquisa e do conhecimento na área de energia solar, quanto para o setor industrial, auxiliando empresas e profissionais na tomada de decisões mais eficientes e economicamente sustentáveis em relação ao uso de rastreadores solares.

Assim, o objetivo geral deste artigo foi analisar as principais diferenças de eficiência e viabilidade econômica entre diferentes tipos de estruturas de rastreadores solares na otimização do desempenho de painéis fotovoltaicos. Os objetivos específicos foram identificar e comparar os principais tipos de rastreadores solares disponíveis no mercado, destacando suas características técnicas e funcionais que impactam na eficiência dos painéis fotovoltaicos; avaliar a viabilidade econômica de cada tipo de rastreador solar considerando custos de instalação, manutenção e depreciação, bem como os benefícios gerados em termos de economia de energia e redução de emissões de gases poluentes; investigar o impacto das condições climáticas e geográficas na eficiência e viabilidade econômica dos diferentes tipos de rastreadores solares, a fim de determinar a sua aplicabilidade em diferentes regiões e contextos ambientais e propor recomendações para a escolha e implementação de

rastreadores solares em projetos de energia fotovoltaica, levando em conta os resultados obtidos em relação à eficiência e viabilidade econômica das diferentes estruturas analisadas.

Este trabalho foi uma revisão bibliográfica, logo, um conjunto de referências de impacto ao desenvolvimento temático. Contudo, alguns autores trouxeram contribuições mais diretas ao tema, sendo eles: Agnew (2020), com *Time Marks em Clock Corretions: a century os seismological timekeeping*, para a compreensão da hora solar e como ela é utilizada; Fouad, Shihata e Morgan (2017), com *A Integrated Review of Factors Influencing the Performance of Photovoltaic Panels*, uma revisão bastante completa acerca dos fatores que se envolvem no desempenho dos painéis fotovoltaicos; Kalougirou (2014), com um estudo significativo a respeito do desempenho e resultados do uso da energia solar, intitulado *Solar Energy Engineering: processes and systems*, um livro que oferece diferentes abordagens ao tema e Sing (2013), com *Solar Power Generation by PV (Photovoltaic) Techonology: a review*, um artigo amplo sobre os processos e fatores específicos da geração de energia solar. O resultados do processo de desenvolvimento encontra-se em sequência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em um mundo cada vez mais consciente da importância da transição para fontes de energia sustentáveis, a busca por alternativas aos combustíveis fósseis tem sido uma prioridade. A necessidade de preservar os recursos naturais, reduzir os custos e mitigar os impactos ambientais negativos impulsionou a exploração de fontes de energia alternativas. De acordo com Silva (2022), dentre as opções disponíveis, a energia solar desponta como uma das alternativas mais viáveis e promissoras. Sua característica fundamental é o fato de ser uma fonte de energia inesgotável em nossa escala de tempo. A energia solar é responsável por alimentar processos vitais no planeta, como a fotossíntese nas plantas e a formação de correntes de ar e água. Além disso, é a força motriz por trás da origem de recursos como o petróleo.

Do ponto de vista técnico, a energia solar pode ser aproveitada de duas formas principais: térmica e fotovoltaica. A energia solar térmica utiliza o calor do Sol para aquecer fluidos ou produzir vapor, que são utilizados para gerar energia mecânica ou elétrica. Por seu turno, a energia solar fotovoltaica tem conversão direta da luz vinda do sol em eletricidade, utilizando painéis fotovoltaicos compostos por células de silício. Uma área de pesquisa em constante evolução nesse campo é o desenvolvimento de estruturas de rastreamento solar. Esses dispositivos permitem que os painéis solares acompanhem o movimento do Sol ao longo do dia, maximizando assim a captação da luz solar incidente. A eficiência

dos sistemas fotovoltaicos pode ser significativamente aumentada com a utilização de rastreadores solares, que garantem um posicionamento ideal dos painéis em relação aos raios solares (SINGH, 2013).

No entanto, é importante considerar que a implementação de rastreadores solares implica em custos adicionais de investimento, consumo e manutenção. Portanto, é necessário avaliar cuidadosamente a viabilidade econômica dessas instalações, levando em conta os diferentes tipos de estruturas, custos envolvidos e métodos de rastreamento disponíveis. De acordo com Zilles (2016), para realizar essa avaliação, é comum recorrer a ferramentas econômicas como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o período de retorno do investimento (ou payback). Essas métricas fornecem uma análise objetiva e quantitativa, permitindo a comparação entre sistemas com e sem rastreadores solares, a fim de determinar a viabilidade financeira desses investimentos.

Assim, a energia solar se destaca como uma fonte alternativa altamente promissora e sustentável. Os rastreadores solares representam uma tecnologia em ascensão, capaz de aumentar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos (SINGH, 2013). No entanto, é fundamental realizar estudos detalhados de viabilidade econômica, considerando os custos e benefícios envolvidos, a fim de tomar decisões informadas sobre a adoção dessas estruturas de rastreamento.

A crescente demanda por energia renovável tem impulsionado o desenvolvimento e a implementação de fontes de energia limpas em todo o mundo. A capacidade de geração anual mundial de fontes renováveis de energia teve um salto positivo de 7,4% em 2019, o que significa uma transição de 2.361 GW para 2.537 GW (CHAI et al., 2021). Conforme Aized et al. (2018), as energias renováveis já representavam 26,3% (6.523 TWh) de toda a eletricidade gerada mundialmente. Esses números demonstram a importância e a viabilidade das fontes de energia renovável como uma solução para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e mitigar os impactos negativos das fontes tradicionais de energia no meio ambiente. Além disso, a adoção de energias renováveis contribui para a diversificação da matriz energética, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis finitos.

O interesse pela tecnologia de energia solar no Brasil registrou um aumento significativo a partir do ano de 2013. Esse crescimento pode ser atribuído, em parte, à Resolução Normativa nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que permitiu aos consumidores gerarem sua própria energia por meio de fontes renováveis. Posteriormente, a Resolução Normativa nº 687/2015 estabeleceu as diretrizes para a micro e minigeração distribuída, além de ampliar o prazo de créditos de 36 para 60 meses para o excedente de energia gerada. Essas medidas e outras facilidades

contribuíram para incentivar a instalação de sistemas fotovoltaicos no país (IZIDORO; ORSI; CORDEIRO, 2014).

Essas resoluções da ANEE, ainda conforme Izidoro, Orsi e Cordeiro (2014), tiveram um impacto significativo no desenvolvimento do setor de energia solar no Brasil. Ao permitir que os consumidores produzam sua própria eletricidade por meio de fontes renováveis, as resoluções promoveram a independência energética e a redução das contas de energia. Além disso, ao ampliar o prazo para o uso dos créditos de energia excedente, as resoluções proporcionaram maior flexibilidade aos consumidores que optam pela geração distribuída.

A localização geográfica do Brasil é um fator que contribui significativamente para a utilização da tecnologia solar. Segundo Zilles et al. (2016), o país está situado em uma região com altos índices de irradiação solar, o que significa que recebe uma quantidade abundante de luz solar ao longo do ano. Essa geografia favorável ao sol faz com que o Brasil possua um imenso potencial para a geração de energia solar. As regiões próximas à linha do Equador, como o Nordeste, apresentam condições especialmente propícias para o aproveitamento da energia solar devido à intensidade e regularidade da radiação solar recebida. Os altos índices de irradiação solar do Brasil são um recurso valioso para impulsionar o crescimento do setor de energia solar no país. Essa abundância de luz solar oferece uma fonte de energia limpa e renovável, capaz de suprir parte significativa das necessidades energéticas da população e das indústrias.

Nos últimos anos, ocorrem avanços notáveis nas tecnologias de energia fotovoltaica, impulsionando a sua eficiência e acessibilidade. Uma das principais evoluções ocorreu no campo dos materiais utilizados nas células solares. O uso de novos materiais condutores, a exemplo do silício cristalino de alta pureza, entre outros, aumenta a eficiência na conversão da luz solar em eletricidade. Entre as células solares de terceira geração, têm destaque diferentes materiais, sobretudo aqueles baseados em perovskita e células solares orgânicas, têm mostrado um potencial significativo para melhorar ainda mais a eficiência e reduzir os custos de produção. Outro avanço tecnológico importante na energia fotovoltaica está relacionado ao desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia. A capacidade de armazenar a energia gerada pelos painéis solares é fundamental para superar a intermitência da luz solar e fornecer energia quando a demanda é maior. Nesse sentido, baterias de íons de lítio e outras tecnologias de armazenamento têm se destacado, permitindo que a eletricidade seja armazenada durante o dia e utilizada à noite ou em períodos de baixa irradiação solar. Isso

aumenta a autonomia dos sistemas fotovoltaicos e torna a energia solar mais confiável e flexível (VITORETI et al., 2017).

Além disso, o desenvolvimento de técnicas de integração arquitetônica tem possibilitado a incorporação de painéis solares em estruturas construídas, como fachadas de edifícios e coberturas. Essa abordagem de design integrado oferece uma solução esteticamente agradável e funcional para a geração de energia solar, permitindo que os edifícios se tornem autossuficientes em termos energéticos. A tecnologia de energia fotovoltaica tem evoluído para se tornar cada vez mais integrada ao ambiente construído, transformando a maneira como aproveitamos e nos beneficiamos do sol como uma fonte de energia limpa e sustentável (SHUKLA; SUDHAKAR; BAREDAR, 2016).

Com isso, as evoluções tecnológicas na energia fotovoltaica nas últimas décadas têm sido notáveis. O aprimoramento dos materiais das células solares, o desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia e a integração arquitetônica são apenas alguns exemplos dos avanços que estão impulsionando a eficiência, a confiabilidade e a acessibilidade da energia solar. Essas inovações têm contribuído para a crescente adoção da energia fotovoltaica como uma solução viável e sustentável para atender às demandas energéticas e reduzir nosso impacto ambiental (SING, 2013). Para compreender esses avanços, é interessante identificar a progressão da energia fotovoltaica.

3 METODOLOGIA

Para a construção deste estudo, foi adotada a metodologia de pesquisa bibliográfica. Primeiramente, realizou-se uma ampla revisão da literatura nas principais bases de dados acadêmicas, como Web of Science, Scopus, ScienceDirect e Portal Periódicos Capes, com o objetivo de identificar e selecionar estudos relacionados às estruturas de rastreadores solares e seu impacto na eficiência dos painéis fotovoltaicos. Os critérios para inclusão dos artigos foram:

- (1) publicações em periódicos científicos indexados; (2) artigos que discutem especificamente diferentes tipos de rastreadores solares e sua influência na eficiência de painéis fotovoltaicos;
- (3) estudos que apresentam análise de viabilidade econômica dessas estruturas e (4) publicação no corte cronológico de 2013 a 2023. Artigos que não atendiam a esses critérios foram excluídos da revisão.

Após a seleção dos estudos, procedeu-se com a leitura minuciosa de cada artigo, registrando os principais pontos relacionados aos objetivos específicos da pesquisa. Foi dada atenção especial às características técnicas e funcionais dos diferentes tipos de rastreadores solares, os métodos de

análise de viabilidade econômica empregados, bem como a influência das condições climáticas e geográficas na eficiência e viabilidade econômica dessas estruturas.

Os resultados foram, então, sintetizados, comparados e discutidos, buscando identificar tendências, semelhanças e diferenças nos estudos analisados. A partir dessas análises, foram formuladas recomendações para a escolha e implementação de rastreadores solares em projetos de energia fotovoltaica.

Vale ressaltar que, segundo Treinta et al. (2014), apesar de a pesquisa bibliográfica ser uma excelente ferramenta para a construção de conhecimento sobre o tema, ela apresenta limitações, pois depende dos estudos já publicados. Por isso, ressalta-se a importância de estudos empíricos futuros para confirmar e expandir os achados desta pesquisa.

4 RESULTADOS

Nos últimos anos, a energia fotovoltaica passou por uma série de avanços tecnológicos significativos, impulsionando sua eficiência e viabilidade como fonte de energia renovável. Um marco importante foi a descoberta do efeito fotovoltaico por Edmond Becquerel em 1839. No entanto, apenas em 1956, começou-se a produção industrial dessa tecnologia, impulsionada por uma série de fatores, como as necessidades decorrentes de diferentes interesses, como competitividade comunicacional e corretos, bem como, mais recentemente, o crescente interesse em fontes de energia limpa e sustentável (LINCOT, 2017).

A energia fotovoltaica é baseada na conversão direta da luz solar em eletricidade, utilizando células fotovoltaicas compostas de materiais semicondutores, como o silício. Nas últimas décadas, houve um foco significativo no aprimoramento desses materiais e na fabricação de células solares mais eficientes. O silício monocristalino e o policristalino são as tecnologias mais comuns, representando a maioria do mercado, mas também houve avanços em outras tecnologias, como as células de filme fino, as células solares orgânicas e as células solares de perovskita (BAGHER; VAHIA; MOHSEN, 2015).

Uma das vantagens da energia fotovoltaica é a baixa manutenção dos sistemas fotovoltaicos, uma vez que os módulos solares são dispositivos de estado sólido, sem partes móveis. Além disso, eles têm uma longa vida útil e não geram gases poluentes durante a produção de eletricidade. Os módulos fotovoltaicos são compostos por camadas de material semicondutor, muito frequentemente o silício, que, quando dopadas com diferentes elementos, criam camadas de polaridade positiva e negativa,

formando uma junção conhecida como junção PN. Quando a luz solar incide sobre essa junção, ocorre a geração de uma corrente elétrica, permitindo a produção de eletricidade (SICA et al., 2018).

Além disso, a integração da energia fotovoltaica com sistemas de armazenamento de energia tem sido uma área de desenvolvimento importante. As baterias de íons de lítio, assim como outras tecnologias similares de maior duração, possibilitam que a energia solar gerada durante o dia seja armazenada para uso posterior, aumentando a autonomia e a confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos (ZSIBORÁCS et al., 2021).

Assim, conforme Sica et al. (2018), as evoluções tecnológicas na energia fotovoltaica nas últimas décadas têm sido fundamentais para aprimorar a eficiência e a viabilidade dessa fonte de energia renovável. O desenvolvimento de materiais semicondutores avançados, a diversificação das tecnologias de células solares e a integração com sistemas de armazenamento de energia têm impulsionado o crescimento da energia fotovoltaica como uma opção limpa e sustentável para a geração de eletricidade. Essas evoluções tecnológicas têm levado a uma maior eficiência na conversão da luz solar em eletricidade, tornando a energia fotovoltaica uma opção cada vez mais atrativa em termos de custo e desempenho.

Uma das áreas de avanço na tecnologia fotovoltaica tem sido o desenvolvimento de células solares de alta eficiência. Pesquisadores e cientistas estão constantemente explorando novos materiais e técnicas para maximizar a absorção da luz solar e aumentar a eficiência de conversão. Isso inclui o uso de materiais de perovskita, células solares multiunijunção e células solares de filme fino, que prometem melhorar ainda mais a eficiência dos sistemas fotovoltaicos (VITORETI et al., 2017).

Além disso, o aprimoramento dos processos de fabricação e produção em larga escala tem permitido uma redução nos custos dos sistemas fotovoltaicos. Avanços na tecnologia de deposição de materiais, técnicas de encapsulamento e automação têm contribuído para tornar os painéis solares mais acessíveis e competitivos em relação às fontes de energia convencionais. Outro aspecto importante é a evolução dos sistemas de monitoramento e controle de energia fotovoltaica. O desenvolvimento de sistemas de monitoramento avançados, sensores inteligentes e algoritmos de otimização tem permitido um gerenciamento mais eficiente e seguro dos sistemas fotovoltaicos. Isso resulta em maior confiabilidade, detecção rápida de falhas e maximização do desempenho dos sistemas (ZILES et al., 2016).

Além disso, o aumento da integração de sistemas fotovoltaicos em redes inteligentes e a implementação de tecnologias de armazenamento de energia, como baterias de íons de lítio e

sistemas de armazenamento em larga escala, têm contribuído para uma maior flexibilidade e estabilidade da energia fotovoltaica. Essas evoluções tecnológicas têm impulsionado a adoção da energia fotovoltaica em diferentes setores, desde residências e edifícios comerciais até parques solares de grande escala. Com a contínua pesquisa e inovação nessa área, é possível vislumbrar um futuro em que a energia fotovoltaica desempenhará um papel ainda mais importante na matriz energética global, fornecendo uma fonte de energia limpa, sustentável e economicamente viável para atender às crescentes demandas energéticas do mundo (ZSIBORÁCS et al., 2021).

O funcionamento destes sistemas depende de elementos como rastreamento solar e ângulo horário. Assim, a Terra realiza dois movimentos fundamentais para a sua dinâmica: a translação, em que orbita ao redor do Sol, e a rotação, em que gira em torno de seu próprio eixo. Esses movimentos têm um impacto significativo na posição do Sol em relação à Terra (STEINKE, 2016).

Para Duran (2013), a órbita terrestre apresenta uma excentricidade baixa, com um valor de aproximadamente 0,01673, o que a torna praticamente circular. Além disso, a Terra possui um ângulo de inclinação de aproximadamente 23,45° em relação ao plano de sua órbita, o que resulta em um dia com cerca de 24 horas. Portanto, a posição do Sol em relação à Terra depende do horário, do dia do ano e das coordenadas geográficas, como a latitude e a longitude do local. Para compreender melhor essas relações, é possível recorrer às equações que descrevem de forma matemática a posição do Sol no plano terrestre, considerando esses diversos fatores, e que corroboram com estudos e cálculos relacionados à energia solar, permitindo uma melhor compreensão da disponibilidade e da incidência da luz solar em diferentes regiões e momentos do ano.

O ângulo horário é um parâmetro fundamental para determinar a posição do Sol em relação a um determinado local na Terra. Ele representa a diferença angular entre a direção do Sol e um ponto de referência, normalmente medido a partir do meridiano local. O ângulo horário, denotado como ω , é calculado levando em consideração um dia de 24 horas, em que às 12h00 o Sol está posicionado a 0°. A cada hora que passa, o ângulo horário do Sol varia 15°. O ângulo horário é determinado por uma equação em que a Hora Solar (HS) é medida em horas de 0 a 24. Essa equação permite calcular o ângulo horário em qualquer momento ao longo do dia, fornecendo uma referência para a posição angular do Sol em relação ao meridiano local (ZHANG; ZHOJUN; PIN, 2019).

Segundo Nussenzveig (2013), o ângulo horário é um conceito central em diversos campos, incluindo a astronomia, a navegação e a energia solar. Ele desempenha um papel fundamental no cálculo da trajetória aparente do Sol no céu ao longo do dia, permitindo determinar os períodos de nascer e pôr

do Sol, bem como a altura solar em um determinado instante. Além disso, o ângulo horário é utilizado para orientar sistemas fotovoltaicos e painéis solares, garantindo que estejam voltados para o Sol de forma mais eficiente e obtenham o máximo aproveitamento da luz solar. O ângulo horário é uma medida que representa a posição angular do Sol em relação a um ponto de referência na Terra. Ele varia ao longo do dia, sendo calculado com base em um dia de 24 horas, e nesse esquema, ao meio-dia o sol se encontra em 0º, avançando por hora 15º. Essa medida é de grande importância em diversas aplicações, como determinar os períodos de nascer e pôr do Sol, calcular a altura solar e orientar sistemas fotovoltaicos para otimizar a captura de energia solar.

Ainda conforme Nussenzveig (2013), ao longo do ano, ocorre uma discrepância entre a hora solar média e a hora solar real. Essa diferença pode variar cerca de ± 17 minutos ao longo do ano, resultando em variações na medida do tempo solar ao longo do dia. Essa diferença é conhecida como a Equação do Tempo. A Equação do Tempo descreve matematicamente essa diferença existente entre a hora solar média e a real. Nessa equação, x é um ângulo expresso em graus, e sua magnitude depende do dia do ano, indo, assim, de 1 a 365. Ela relaciona o ângulo x com o dia do ano. Essa discrepância entre a hora solar média e a hora solar real ocorre devido a diversos fatores, como a inclinação do eixo da Terra em relação ao plano de sua órbita, a excentricidade da órbita terrestre e outros efeitos astronômicos. Essas variações resultam em diferentes velocidades aparentes de movimento do Sol ao longo do ano, afetando o tempo solar observado.

A Equação do Tempo é uma ferramenta importante para o ajuste e a correção das medidas de tempo solar, permitindo uma melhor sincronização com os relógios e sistemas de tempo convencionais. Essa correção é especialmente relevante em aplicações que dependem de uma medida precisa do tempo solar, como a navegação, a astronomia e a geração de energia solar. A equação representa a diferença entre a hora solar média e a hora solar real ao longo do ano. Essa diferença é influenciada por fatores astronômicos e variações na velocidade aparente de movimento do Sol. O uso dessa equação permite ajustar e corrigir as medidas de tempo solar, garantindo uma sincronização precisa com os relógios e sistemas de tempo convencionais. A conversão entre a hora solar e o relógio local pode ser realizada por meio da aplicação da equação. Essa equação permite obter o valor correspondente da hora do relógio local, levando em consideração a equação do tempo, a correção da longitude e o ajuste para o horário de verão (GILES et al., 2019).

A equação relaciona todos esses elementos, permitindo calcular a hora do relógio local com base na hora solar e nas correções necessárias. A hora solar é expressa em horas e a equação do tempo é

considerada para corrigir a diferença entre a hora solar média e a hora solar real, conforme mencionado anteriormente. A correção da longitude, expressa em horas, é calculada pela equação que considera a longitude do local e a longitude do meridiano do fuso horário local (AGNEW, 2020).

Ainda conforme Agnew (2020), essa conversão entre a hora solar e o relógio local é importante para sincronizar as atividades cotidianas com base no tempo convencional utilizado em cada região. Com o uso dessas equações e correções adequadas, é possível ajustar o relógio local para garantir que as atividades ocorram de acordo com a programação estabelecida para cada localidade. A equação permite a conversão entre a hora solar e o relógio local, considerando a equação do tempo, a correção da longitude e o ajuste para o horário de verão. Essa conversão é essencial para sincronizar as atividades diárias com base no tempo convencional utilizado em cada região, garantindo que o relógio local esteja de acordo com as necessidades e o contexto específico de cada localidade.

O ângulo de declinação é um parâmetro importante para entender a posição do Sol em relação à Terra durante o ano. Esse ângulo é formado entre a linha imaginária que conecta o centro da Terra ao Sol e o plano equatorial. A Terra possui um ângulo de inclinação de aproximadamente $23,45^\circ$ entre o eixo de rotação e o eixo da eclíptica. À medida que a Terra orbita o Sol ao longo do ano, o ângulo de declinação varia de $-23,45^\circ$ a $23,45^\circ$. Esse valor é determinado pelo dia do ano, representado pela variável N na expressão voltada a compreender esse ângulo. Essa variação angular da declinação retrata a mudança da posição do Sol em relação ao plano equatorial terrestre. O ângulo de declinação desempenha um papel fundamental em várias áreas, como a astronomia e a geração de energia solar (YAMASOE; CORRÊA, 2016).

Esse ângulo age diretamente na recepção solar regional, uma vez que a inclinação dos raios solares varia conforme a declinação solar. Isso afeta a quantidade e a intensidade da luz solar que atinge a superfície terrestre em diferentes épocas do ano e em diferentes latitudes. Ao compreender o ângulo de declinação e suas variações ao longo do ano, é possível realizar estudos mais precisos sobre a disponibilidade de luz solar em determinadas regiões. Essas informações são fundamentais para dimensionar sistemas de energia solar, calcular a posição do Sol em um determinado momento e planejar a orientação adequada de painéis solares para capturar a maior quantidade de energia possível (NOVAIS, 2017).

Na posição do Sol, um dos ângulos essenciais a ser considerado é o ângulo de altitude. Esse ângulo é formado entre os raios solares e o plano horizontal, em uma equação de identificação que relaciona o ângulo de altitude com a latitude local. A latitude local, identificada por L , indica a posição geográfica

de um determinado local em relação à linha do equador. Essa latitude é fundamental na determinação do ângulo de altitude solar. Conforme a latitude aumenta em direção aos polos, o ângulo de altitude tende a diminuir. Isso resulta em uma trajetória solar mais inclinada em relação ao plano horizontal. Assim, o ângulo de altitude solar é uma medida relevante para determinar a quantidade de radiação solar que atinge um local específico. À medida que o ângulo de altitude aumenta, a intensidade da luz solar recebida também aumenta (YAMASOE; CORRÊA, 2016).

De acordo com Steinke (2016), isso ocorre porque os raios solares incidem de maneira mais perpendicular ao plano horizontal, o que resulta em uma maior concentração de energia solar. Esse ângulo possui uma influência significativa na geração de energia solar. Sistemas fotovoltaicos são projetados para capturar a máxima quantidade possível de luz solar. Para alcançar isso, os painéis solares são ajustados para um ângulo de inclinação ideal, de forma a coincidir com o ângulo de altitude solar específico para determinada localização.

Conforme Yamasoe e Corrêa (2016), o ângulo de Azimute é formado entre o Sul ou o Norte (dependendo do hemisfério em que o local está localizado) e o Sol. Esse ângulo representa o componente horizontal dos raios solares no plano e é igual a 0° ao meio-dia. Esse ângulo é uma medida fundamental para determinar a direção em que o Sol está localizado em relação a um determinado local. Ele fornece informações sobre a orientação dos raios solares em relação aos pontos cardeais, o que é importante para a determinação da trajetória e da incidência da luz solar em uma superfície específica. Esse ângulo de incidência tem um impacto direto na quantidade de energia solar captada e na eficiência dos sistemas fotovoltaicos. A utilização das equações e dos algoritmos adequados possibilita um melhor direcionamento dos painéis solares em direção ao Sol, garantindo a otimização da captação de energia solar. Isso resulta em um aproveitamento mais eficiente da energia renovável e contribui para a sustentabilidade e a redução do impacto ambiental.

Os sistemas rastreadores solares são dispositivos projetados para acompanhar e rastrear a posição do Sol ao longo do dia e ao longo do ano. Esses sistemas têm como objetivo maximizar a eficiência na captação de energia solar, mantendo os painéis solares sempre direcionados de forma perpendicular aos raios solares. Existem diferentes métodos utilizados para o rastreamento solar. Um dos métodos comuns é o uso de sensores, como o Resistor Dependente de Luz (LDR), que detectam a luminosidade e orientam o movimento dos painéis solares em direção à maior intensidade de luz. Outro método é o uso de algoritmos baseados nas equações anteriormente mencionadas, que calculam a posição do Sol em relação ao local e determinam a movimentação necessária dos painéis. Os sistemas

rastreadores solares são equipados com motores responsáveis por movimentar a estrutura do rastreador em intervalos de tempo específicos (HOFFMANN et al., 2018). Essa movimentação permite que os painéis solares acompanhem a trajetória do Sol ao longo do dia, ajustando-se continuamente para manter a posição mais adequada em relação aos raios solares.

Existem diferentes tipos de sistemas rastreadores solares. O rastreamento pode ser realizado em dois eixos, conhecido como rastreamento total, em que os painéis solares seguem o Sol em todas as direções, mantendo uma perpendicularidade constante com os raios solares. Além disso, existem sistemas de rastreamento em um eixo, que diferem na posição do eixo ou no sentido de movimentação dos painéis solares. Alguns exemplos são o rastreamento N-S horizontal, L-O horizontal ou N-S polar. Os sistemas rastreadores solares são uma solução avançada e eficiente para melhorar o desempenho da captação de energia solar. Ao acompanhar o movimento do Sol, esses sistemas maximizam a exposição dos painéis solares à radiação solar direta, aumentando a produção de energia e otimizando a eficiência dos sistemas fotovoltaicos (ABDOLLAHPOUR et al., 2018).

Em uma comparação entre diferentes sistemas de rastreadores solares em relação à energia recebida em uma latitude de 35° N, mostra que o sistema de dois eixos, também conhecido como rastreamento total, alcança um aproveitamento de 100% da irradiação solar. Entre as estruturas de um eixo, observou-se que o sistema N-S polar (ou E-W polar em relação ao sentido de rastreamento) é o mais eficiente, com a inclinação do painel fixada na latitude do local (KALOGIROU, 2014).

Há estudos como os realizados por Gutierrez et al. (2020) que comparam diferentes estruturas de rastreadores solares com um sistema fixo, e no caso dos autores citados, foram comparados os ganhos percentuais com cada sistema. O de dois eixos revelou no estudo um ganho de 33,8% em relação ao sistema fixo. A estrutura north-south tilted single axis (de acordo com a orientação do seu eixo) demonstrou maior eficiência entre as estruturas de um eixo, com um ganho de 27,7% em relação à estrutura fixa. O autor também investigou um modelo diferente chamado azimutal (vertical tilted single axis), no qual a base gira para acompanhar o ângulo azimutal do Sol enquanto um painel inclinado à latitude é mantido.

Os resultados de Gutierrez et al. (2020) e de Kalogirou (2014) indicaram que os sistemas de duplo eixo apresentaram um ganho de 38,16%, enquanto as estruturas de único eixo alcançaram um ganho médio de 13,58%. Esses resultados evidenciam a importância dos sistemas rastreadores solares na maximização da captação de energia solar. Os sistemas de dois eixos e a estrutura N-S polar demonstraram ser os mais eficientes em termos de aproveitamento energético. O rastreamento solar

permite que os painéis solares acompanhem o movimento do Sol ao longo do dia, otimizando a exposição à radiação solar direta e, conseqüentemente, aumentando a produção de energia. Essas informações são essenciais para a seleção e o dimensionamento adequado dos rastreadores solares, levando em consideração os ganhos de eficiência proporcionados por cada tipo de estrutura.

Os preços de sistemas rastreadores solares, a média de aumento de preço para os sistemas de dois eixos tende a ser de cerca de 61%, enquanto para os sistemas de um eixo é de cerca de 38%. Esses dados destacam um importante aspecto a ser considerado ao optar por sistemas rastreadores solares: o custo adicional associado a essas estruturas. Embora ofereçam ganhos significativos em eficiência e aproveitamento da energia solar, é importante levar em conta o investimento financeiro necessário para a implementação desses sistemas. É fundamental realizar uma análise detalhada dos custos e benefícios antes de tomar a decisão de utilizar um sistema rastreador solar. Embora o aumento de preço seja um fator a ser considerado, é importante ponderar os ganhos em termos de maior produção de energia e maior eficiência na captação solar. Cada projeto terá suas particularidades e exigirá uma avaliação cuidadosa dos aspectos financeiros, considerando a viabilidade econômica e os objetivos específicos de cada empreendimento (AL GARNI; AWASTI; RAMLI, 2018; NAVAL; YUSTA, 2022).

Assim, Al Garni, Awasti e Ramli (2018) reforçam que os custos associados aos sistemas rastreadores solares devem ser avaliados juntamente com os benefícios em termos de maior eficiência energética. Embora haja um aumento de preço ao optar por essas estruturas, é necessário considerar o retorno potencial em termos de maior geração de energia solar. Uma análise criteriosa dos aspectos financeiros e técnicos é essencial para determinar a viabilidade econômica e garantir a melhor solução para cada projeto.

Em geral, Naval e Yusta (2022) reforçam que os sistemas rastreadores solares requerem um investimento adicional não apenas na aquisição e instalação, mas também na manutenção ao longo do tempo. É importante considerar esses custos na avaliação da viabilidade econômica e a rentabilidade dos sistemas rastreadores solares. Ainda, os rastreadores solares tendem a ter um custo maior de manutenção em comparação com as estruturas fixas. Essa diferença pode ser atribuída aos componentes móveis e ao maior nível de complexidade desses sistemas. É fundamental realizar uma análise cuidadosa dos custos de manutenção, levando em conta as projeções de gastos ao longo da vida útil dos sistemas, a fim de garantir a eficiência operacional contínua e maximizar o retorno do investimento.

Assim, a leitura de Al Garni, Awasti e Ramli (2018) e Naval e Yusta (2022) revelam que os aspectos relacionados à manutenção dos sistemas rastreadores solares envolvem custos adicionais que devem ser considerados ao avaliar a viabilidade econômica desses sistemas. Embora os rastreadores solares possam proporcionar ganhos em eficiência e aproveitamento da energia solar, é fundamental levar em conta os custos de manutenção ao longo do tempo para garantir a sustentabilidade financeira e o retorno do investimento.

Quanto ao consumo, em geral, sistemas de dois eixos apresentaram consumos que variam de 0,00274 KWh/dia a 1,50000 KWh/dia, enquanto os sistemas de um eixo tiveram consumos estimados entre 0,00300 KWh/dia (Ferreira, 2017) e 5,00000 KWh/dia (AYABE; SILVA JUNIOR; LOVATO, 2017). De acordo com as práticas realizadas por estes autores, essa porcentagem de consumo decorre do cálculo quanto a potência de geração do sistema. Com base nos valores apresentados, e resultou em uma média de 0,4379% para sistemas de dois eixos e 0,1594% para sistemas de um eixo. Com isso, relação à geração total de energia solar, o consumo dos sistemas rastreadores solares é relativamente baixo. As porcentagens obtidas indicam que o consumo desses sistemas representa apenas uma fração pequena da energia gerada.

É importante considerar esses aspectos relacionados ao consumo ao avaliar a eficiência e o desempenho dos sistemas rastreadores solares. Embora haja um consumo adicional de energia para o funcionamento dos rastreadores, é fundamental lembrar que a geração de energia por meio dos painéis fotovoltaicos supera significativamente o consumo desses sistemas. Ao considerar os custos e benefícios desses sistemas, é importante ponderar não apenas a eficiência de geração, mas também o consumo associado. Uma abordagem equilibrada é essencial para garantir a sustentabilidade energética e financeira desses projetos (BALALI et al., 2017).

O estudo de viabilidade e comparação entre os investimentos em rastreadores de duplo e único eixo é de extrema importância para auxiliar na tomada de decisão. Nesse contexto, é possível utilizar técnicas como o VPL, a TIR e o Payback para avaliar os retornos financeiros e determinar a atratividade de cada opção. O VPL oferece informações sobre como o investimento retornará para a data zero, tendo por orientação uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA). O VPL considera o capital de retorno, o capital de investimento, a TMA e o período. Quando o VPL é igual a zero, os retornos do investimento são iguais à TMA. Valores positivos indicam que a taxa de retorno é maior que a TMA (CORTI; SALVADOR; SAURIN, 2014).

A TIR é outra técnica utilizada para avaliar a atratividade do investimento. É a taxa de retorno que faz com que o investimento inicial retorne, trazendo os valores futuros para o presente. Um investimento é considerado atrativo quando sua TIR é maior que a TMA. A fórmula para o cálculo da TIR utiliza as mesmas variáveis da fórmula do VPL. Além disso, o Payback é uma técnica que determina o tempo necessário para que o investimento seja pago através dos retornos financeiros. O payback mais curto indica que o investimento será recuperado mais rapidamente (GREMONINI, 2016).

A análise dessas técnicas deve ser orientada para a obtenção de um VPL e TIR maiores e um payback mais curto, o que justificaria a escolha de uma opção em detrimento da outra. No entanto, é importante ressaltar que as técnicas mencionadas têm suas limitações e não devem ser utilizadas como critério único para a tomada de decisão. Elas fornecem informações valiosas, mas é necessário considerar outros aspectos, como os custos operacionais, a vida útil dos equipamentos, as variações nos preços dos componentes e a manutenção necessária ao longo do tempo. A decisão final deve ser baseada em uma análise completa e criteriosa, levando em consideração todos os aspectos técnicos, financeiros e operacionais. É fundamental buscar uma visão holística e considerar também os objetivos e estratégias da empresa ou do investidor (TAO; FINENKO, 2016).

Ainda conforme Tao e Finenko (2016), é preciso considerar, na análise e escolha de um sistema, um dos pontos críticos ocorrem quando o payback do tracker se torna o mesmo presente no sistema fixo. Esse é um aspecto relevante para a tomada de decisão, pois indica que, a partir desse ponto, não há ganho adicional com a utilização do rastreador. A partir do momento em que o payback do tracker se torna menor que o da estrutura fixa, o projeto se torna mais interessante, pois diminui o tempo de retorno do investimento total.

É importante considerar todos os fatores que podem intervir e gerar a redução do payback de um rastreador, a exemplo da eficiência, do custo de investimento, custos de manutenção e o consumo. Esses fatores são cruciais para a viabilidade econômica do projeto. Além disso, o tamanho do projeto também influencia nos custos, com uma tendência de queda nos preços à medida que a potência instalada aumenta. Existe ainda uma tendência de que os rastreadores de único eixo sejam mais viáveis do que os de dois eixos. Essa informação é relevante para a escolha da estrutura, pois indica que, na maioria dos casos, os rastreadores de único eixo são mais vantajosos, apesar de apresentarem eficiência menor. Essa constatação pode ser importante para orientar as decisões de investimento em rastreadores solares (FOUAD; SHIHATA; MORGAN, 2017).

Elucidam ainda Tao e Finenko (2016) que é válido ressaltar que os preços dos painéis solares tendem a diminuir ao longo do tempo, tornando-os cada vez mais acessíveis. No entanto, é necessário considerar que os preços das estruturas dos rastreadores podem não acompanhar essa tendência de redução de custos. Isso pode impactar a viabilidade dos investimentos em rastreadores solares, tornando-os menos atrativos em comparação com os sistemas fixos.

Portanto, é fundamental realizar análises individualizadas em cada caso, levando em conta as variações nos preços e eficiências ao longo do tempo.

Assim, Fouad, Shihata e Morgan (2017) mostram que embora existam casos em que os rastreadores solares se mostram viáveis, é necessário avaliar cuidadosamente os fatores que influenciam na viabilidade econômica dos projetos. Os custos, eficiências, tamanhos e tendências devem ser considerados para uma tomada de decisão informada. A análise crítica desses dados é fundamental para determinar a viabilidade dos investimentos em rastreadores solares e sua relevância em um cenário de constante evolução tecnológica e redução de custos.

5 DISCUSSÃO

O avanço da energia fotovoltaica não é apenas fruto do acaso, mas de um contexto histórico que combinou fatores socioeconômicos e avanços científicos (LINKOT, 2017). O desenvolvimento de diferentes tipos de células solares aumentou a eficiência das células solares, mas também apresentou desafios como a necessidade de materiais raros e processos de fabricação complexos e caros (BAGHER; VAHIA; MOHSEN, 2015). Os sistemas de armazenamento de energia desempenham um papel crucial na viabilidade da energia fotovoltaica, mas o acesso a essas tecnologias é um desafio em muitas regiões e o descarte de baterias apresenta desafios ambientais (SICA et al., 2018; ZSIBORÁCS et al., 2021).

A pesquisa contínua busca aprimorar a eficiência das células solares, considerando também o custo, a sustentabilidade dos materiais e a facilidade de implantação das tecnologias (VITORETTI et al., 2017). Avanços na produção em larga escala e no monitoramento dos sistemas fotovoltaicos são cruciais para garantir que a energia fotovoltaica beneficie a todos, não apenas aqueles com acesso privilegiado (ZILES et al., 2016). A energia fotovoltaica requer uma abordagem holística, considerando aspectos socioeconômicos e ambientais para atender às necessidades energéticas globais de maneira justa e sustentável.

No campo da energia solar, compreender o movimento aparente do Sol é fundamental (DURAN, 2013; STEINKE, 2016; ZHANG et al., 2019). Os movimentos de rotação e translação da Terra têm um impacto significativo na posição do Sol em relação à nossa perspectiva (STEINKE, 2016). A circularidade da órbita da Terra e seu ângulo de inclinação desempenham um papel crucial na incidência da luz solar em diferentes regiões e momentos do ano (DURAN, 2013).

A localização e o momento são fatores-chave na captação de energia solar (DURAN, 2013; STEINKE, 2016). O ângulo horário varia a cada hora, o que é relevante para a orientação dos painéis solares (ZHANG et al., 2019). A Equação do Tempo é importante para ajustar a diferença entre a hora solar real e a hora solar média, afetando a eficiência da captação de energia solar (NUSSENZVEIG, 2013; GIES et al., 2019).

Os ângulos de declinação e altitude são essenciais para determinar a quantidade de luz solar que atinge diferentes regiões. O ângulo de Azimute fornece a orientação horizontal dos raios solares (NOVAIS, 2017; YAMASOE; CORRÊA, 2016).

Para Nussenzveig, 2013 e Giles et al., 2019), essas considerações relacionadas ao movimento aparente do Sol são cruciais para otimizar a captação de energia solar, permitindo uma maior eficiência na geração de energia.

Os sistemas rastreadores solares têm se mostrado uma opção cada vez mais atraente na busca por maior eficiência na captação de energia solar. Hoffmann et al. (2018) destacam os métodos de rastreamento solar com base em sensores e algoritmos, permitindo que os painéis se orientem em direção à maior intensidade de luz. Abdollahpour et al. (2018) realçam a eficiência dos sistemas rastreadores solares na maximização da exposição dos painéis à radiação solar direta. No entanto, como apontado por Kalogirou (2014), a eficácia destes sistemas varia de acordo com seu tipo, com os rastreadores de dois eixos e o sistema N-S polar mostrando maior eficiência energética.

As pesquisas de Gutierrez et al. (2020) corroboram essas observações, mostrando um ganho de eficiência significativo com o uso de rastreadores solares em comparação com sistemas fixos. Embora o estudo de Gutierrez et al. (2020) revele um ganho percentual expressivo com os rastreadores de dois eixos, ainda é importante considerar o investimento financeiro associado a essas estruturas. Como apontado por Al Garni, Awasti e Ramli (2018), é crucial ponderar não apenas os benefícios em termos de maior produção de energia, mas também os custos adicionais de implementação e manutenção desses sistemas.

Naval e Yusta (2022) reforçam ainda a importância de considerar os custos de manutenção ao longo do tempo ao avaliar a viabilidade econômica dos sistemas rastreadores solares. Embora esses sistemas possam oferecer ganhos significativos em eficiência e aproveitamento de energia solar, os custos de manutenção podem ser mais altos em comparação com sistemas fixos. É fundamental, portanto, levar em conta todas as variáveis na avaliação da rentabilidade desses sistemas.

Em termos de consumo, estudos de Ferreira (2017) e Ayabe, Silva Junior e Lovato (2017) mostram que, apesar do consumo adicional de energia para o funcionamento dos rastreadores, a geração de energia supera significativamente esse consumo. Balali et al. (2017) reiteram que, ao avaliar a eficiência e o desempenho dos sistemas rastreadores solares, é essencial ponderar não apenas a eficiência de geração, mas também o consumo associado.

A decisão de investir em sistemas rastreadores solares envolve uma análise cuidadosa dos retornos financeiros esperados. Corti, Salvador e Saurin (2014) apresentam o Valor Presente Líquido (VPL) como uma medida para avaliar a atratividade do investimento, enquanto Gremonini (2016) sugere o uso da Taxa Interna de Retorno (TIR) e do Payback para determinar o período de recuperação do investimento. Estas técnicas, combinadas com uma análise cuidadosa dos custos e benefícios associados aos sistemas rastreadores solares, podem auxiliar na tomada de decisão mais informada.

A discussão crítica que se apresenta sobre a análise das técnicas de Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e payback, proposta por Tao e Finenko (2016), destaca uma necessidade de diversificar a abordagem de avaliação. Considerando a contribuição de Damodaran (2009), o uso dessas técnicas é fundamental em análises financeiras, contudo, um foco restrito nesses indicadores pode proporcionar uma visão estreita, ignorando fatores extrínsecos que podem ter um impacto significativo nos resultados financeiros.

O enfoque na equalização do payback do rastreador com o do sistema fixo é uma vertente estratégica relevante, contudo, seu uso exclusivo pode não ser o mais recomendado. Partindo do princípio de que a gestão eficiente de um projeto requer uma visão ampla dos aspectos econômicos, técnicos e operacionais, conforme discutido por Kerzner (2017), a análise do payback deve ser integrada com outras técnicas de avaliação para proporcionar uma compreensão mais abrangente do projeto.

A importância dos rastreadores de único eixo serem mais viáveis do que os de dois eixos, como apontado por Fouad, Shihata e Morgan (2017), é uma perspectiva interessante que leva em consideração os aspectos práticos da implementação. Todavia, em vista da observação de Meinel e Wittmer (2012) sobre a importância de avaliar também a eficiência da captação solar, é necessário

ponderar a relação custo-benefício entre os dois tipos de rastreadores. Isso sugere a necessidade de uma análise mais profunda que integre a economia de custos e a eficiência energética.

No que tange à diminuição dos preços dos painéis solares com o tempo, destacada por Tao e Finenko (2016), é importante ponderar também sobre a viabilidade de investimentos a longo prazo. A perspectiva de Previsic et al. (2012) sobre a importância de se considerar a evolução tecnológica e a capacidade de inovação na análise financeira, deve ser aplicada aqui para garantir uma avaliação mais completa.

Fouad, Shihata e Morgan (2017) apontam corretamente para a necessidade de uma avaliação cuidadosa dos fatores que influenciam na viabilidade econômica dos projetos. No entanto, em adição, como levantado por Giebel et al. (2011), é também importante considerar fatores de incerteza e riscos associados à tecnologia, como a performance sob diferentes condições climáticas e o ciclo de vida da tecnologia. Essa consideração pode ajudar a fortalecer a avaliação da viabilidade dos rastreadores solares.

6 CONCLUSÕES

Nesta análise das principais diferenças de eficiência e viabilidade econômica entre diferentes tipos de estruturas de rastreadores solares na otimização do desempenho de painéis fotovoltaicos, foram alcançados os objetivos específicos propostos.

Primeiramente, foram identificados e comparados os principais tipos de rastreadores solares disponíveis no mercado, destacando suas características técnicas e funcionais que impactam na eficiência dos painéis fotovoltaicos. Observamos que existem sistemas de rastreamento de dois eixos (full tracking) e de um eixo, com diferentes orientações e modos de movimentação. Cada tipo apresenta vantagens e desvantagens em relação à capacidade de seguir o movimento do sol e maximizar a geração de energia.

Em seguida, foi avaliada a viabilidade econômica de cada tipo de rastreador solar considerando os custos de instalação, manutenção e depreciação, bem como os benefícios gerados em termos de economia de energia e redução de emissões de gases poluentes. Como retorno, foi identificado que, em geral, os rastreadores solares implicam em maiores custos de investimento e manutenção em comparação com sistemas fixos. No entanto, esses custos adicionais podem ser compensados por um aumento significativo na geração de energia elétrica, resultando em economia de longo prazo e redução do tempo de retorno do investimento.

Também foi investigado o impacto das condições climáticas e geográficas na eficiência e viabilidade econômica dos diferentes tipos de rastreadores solares. Foi constatado que a eficiência dos rastreadores solares está diretamente relacionada à disponibilidade de irradiação solar e à latitude do local de instalação. Regiões com maior variação diurna de ângulo de incidência solar e maior intensidade de radiação solar ao longo do ano tendem a se beneficiar mais dos rastreadores solares.

Com base nos resultados obtidos, é importante considerar a relação entre eficiência e viabilidade econômica, levando em conta o custo inicial, o potencial de geração de energia adicional, os custos de manutenção e as condições climáticas e geográficas do local. Como recomendação, consta que antes de optar por um sistema de rastreamento solar, seja realizado um estudo detalhado de viabilidade, considerando as particularidades de cada projeto e suas metas financeiras e ambientais.

Em conclusão, as diferenças de eficiência e viabilidade econômica entre os diferentes tipos de estruturas de rastreadores solares têm um impacto significativo na otimização do desempenho de painéis fotovoltaicos. A escolha correta do tipo de rastreador solar pode resultar em maior geração de energia elétrica e retorno financeiro mais rápido. No entanto, é necessário considerar cuidadosamente os custos adicionais envolvidos e a adequação do sistema às condições específicas do local. Com base nos resultados e recomendações deste estudo, os tomadores de decisão podem realizar uma escolha informada e eficiente na implementação de rastreadores solares em projetos de energia.

REFERÊNCIAS

- AGNEW, D. C. Time marks and clock corrections: A century of seismological timekeeping. *Seismological Research Letters*, v. 91, n. 3, p. 1417-1429, 2020.
- AIZED, T. et al. Energy security and renewable energy policy analysis of Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 84, p. 155-169, 2018.
- AL GARNI, H. Z.; AWASTHI, A.; RAMLI, M. A. M. Optimal design and analysis of grid- connected photovoltaic under different tracking systems using Homer. *Energy conversion and management*, v. 155, p. 42-57, 2018.
- AYABE, M. S.; SILVA JUNIOR, S. A. da; LOVATO, T. G. Análise de desempenho de um gerador fotovoltaico dotado de um seguidor solar de eixo polar. 2017. 142 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica ênfase Eletrotécnica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- BAGHER, A. M.; VAHID, M. M.; MOHSEN, M. Types of solar cells and application. *American Journal of optics and Photonics*, v. 3, n. 5, p. 94-113, 2015.
- BALALI, M. H. et al. An overview of the environmental, economic, and material developments of the solar and wind sources coupled with the energy storage systems. *International Journal of Energy Research*, v. 41, n. 14, p. 1948-1962, 2017.
- CHAI, Y. H. et al. Technologies in Industry 5.0. *The Prospect of Industry 5.0 in Biomanufacturing*, p. 257, 2021.
- CORTI, S.; SALVADOR, L.; SAURIN, G. Viabilidade econômico-financeira: estudo para instalação de energia solar. 12º Encontro Científico Cultural Interinstitucional. Anais [...]. Cascavel, PR, 2014. Disponível em: <https://www.fag.edu.br/upload/ecci/anais/55953aeabba79.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- DURAN, P. G. Diseño de un parque termosolar. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Universitat Politècnica de Catalunya. Disponível em: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/19210>. Acesso em: 12 mar. 2023.
- FERREIRA, T. E. Análises de custos e de viabilidade econômica para sistemas fotovoltaicos: painéis fixos e painéis móveis. 37 p. Monografia (Especialização em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos. – Universidade Federal de Santa Maria, Novo Hamburgo, 2017.
- FOUAD, M. M.; SHIHATA, Lamia A.; MORGAN, ElSayed I. An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, p. 1499-1511, 2017.
- GILES, D. M. et al. Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database—automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 12, n. 1, p. 169-209, 2019.

GREMONINI, L. Contribuição ao estudo de sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica de consumidores residenciais. 2016. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.

GUTIERREZ, S. et al. Development and testing of a single-axis photovoltaic sun tracker through the internet of things. *Energies*, v. 13, n. 2547, 2020.

HOFFMANN, F. M. et al. Monthly profile analysis based on a two-axis solar tracker proposal for photovoltaic panels. *Renewable energy*, v. 115, p. 750-759, 2018.

IZIDORO, B. C.; ORSI, G. C.; CORDEIRO, L. R. Estudo do panorama nacional para sistemas fotovoltaicos conectados à rede após a resolução 482/2012 da ANEEL. 2014. 174

f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

KALOGIROU, S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. 2. ed., Kidlington: Academic Press, 2014.

LINCOT, D. The new paradigm of photovoltaics: From powering satellites to powering humanity. *Comptes Rendus Physique*, v. 18, n. 7-8, p. 381-390, 2017.

NAVAL, N.; YUSTA, J. M. Comparative assessment of different solar tracking systems in the optimal management of PV-operated pumping stations. *Renewable Energy*, v. 200, p. 931-941, 2022.

NOVAIS, G. T. Distribuição média dos Climas Zonais no Globo: estudos preliminares de uma nova classificação climática. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 10, n. 5, p. 1614-1623, 2017.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica: Mecânica*. Rio de Janeiro: Editora Blucher, 2013.

OLIVEIRA, G. R.; VILARINHO, M. E. A.; MARQUES, E. M. Energias limpas e renováveis como vantagem competitiva na gestão das organizações. *Revista Científica Mais Pontal*, v. 2, n. 1, p. 1-13, 2023.

SHUKLA, A. K.; SUDHAKAR, K.; BAREDAR, P. A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system. *Energy and Buildings*, v. 128, p. 99-110, 2016.

SICA, D. et al. Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 2934-2945, 2018.

SILVA, F. B. F.; GOUVEIA, D. C.; URBANETZ JUNIOR, J. Análise da demanda de potência consumida por rastreadores solares automatizados. *Brazilian Journal of Business*,

v. 2, n. 3, p. 2616-2627, 2020.

SILVA, W. C. A geração de energia solar como fator de desenvolvimento econômico sustentável: aspectos jurídicos, econômicos e perspectivas para seu incentivo. Editora Dialética, 2022.

SINGH, G. K. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: A review. *Energy*, v. 53, p. 1-13, 2013.

STEINKE, E. T. *Climatologia fácil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

TAO, J. Y.; FINENKO, A. Moving beyond LCOE: impact of various financing methods on PV profitability for SIDS. *Energy Policy*, v. 98, p. 749-758, 2016.

TREINTA, F. T. et al. Metodologia de pesquisa bibliográfica com a utilização de método multicritério de apoio à decisão. *Production*, v. 24, p. 508-520, 2014.

VITORETI, A. B. F. et al. Células solares sensibilizadas por pontos quânticos. *Química Nova*, v. 40, p. 436-446, 2017.

YAMASOE, M. A.; CORRÊA, M. P. *Processos radiativos na atmosfera*. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

ZHANG, J.; YIN, Z.; JIN, P. Error analysis and auto correction of hybrid solar tracking system using photo sensors and orientation algorithm. *Energy*, v. 182, p. 585-593, 2019.

ZILLES, R. et al. *Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica*. São Paulo: Oficina de textos, 2016

ZSIBORÁCS, H. et al. Grid balancing challenges illustrated by two European examples: Interactions of electric grids, photovoltaic power generation, energy storage and power generation forecasting. *Energy Reports*, v. 7, p. 3805-3818, 2021.

Capítulo 2

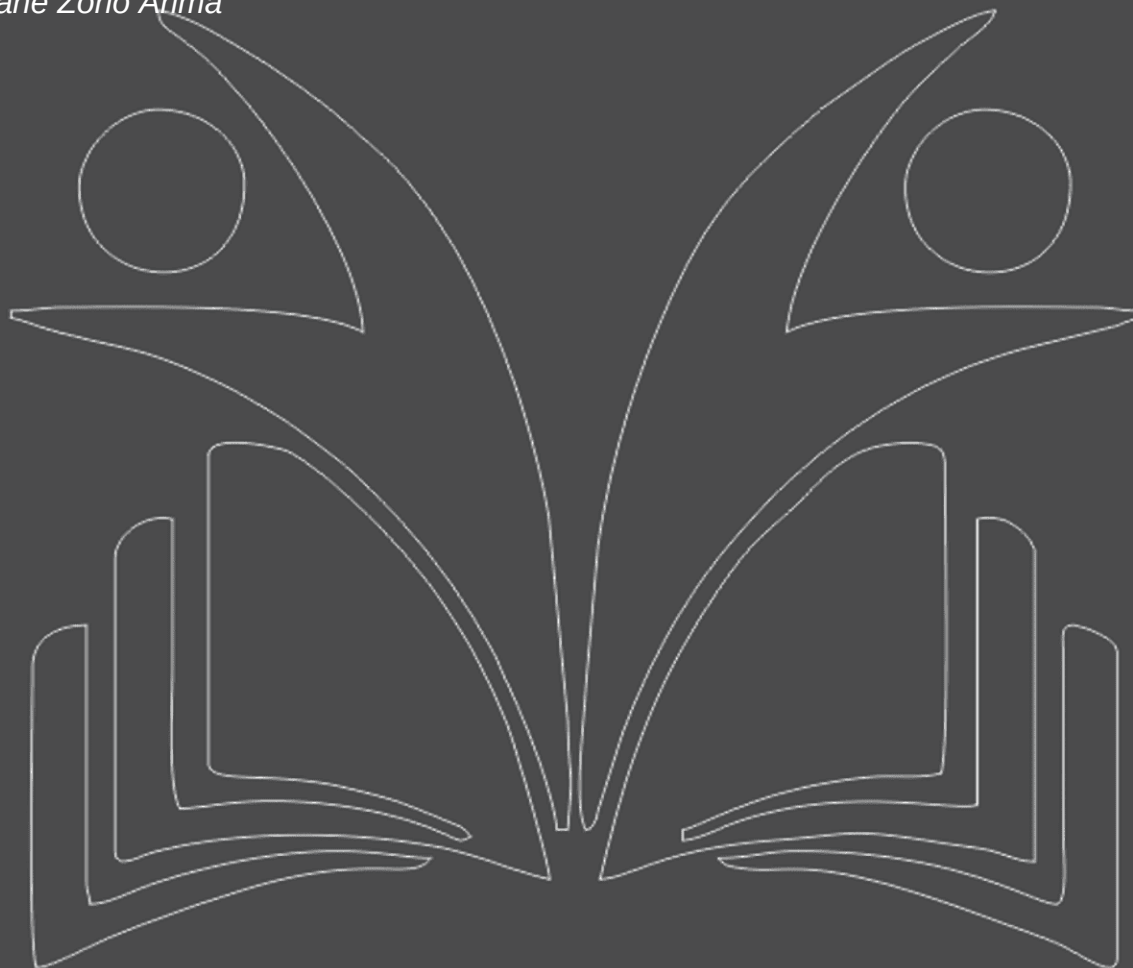


10.37423/250309747

AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TRABALHO NA CONSTRUÇÃO CIVIL: ESTUDO DE CASO EM OBRA VERTICAL

Viviane Zório Peixoto Arima

Murilo Macane Zório Arima



Resumo: O setor da construção civil é uma atividade significativa na economia do país. Entretanto, apresenta características próprias como o alto número de acidentes, e baixa qualificação de mão-de-obra. A psicologia do trabalho e das organizações é um estudo que apresenta a visão aprofundada dos diversos fatores envolvidos na gestão e organização das empresas. Como forma de avaliar as condições de saúde e segurança do trabalho na construção civil, o artigo teve como principal objetivo utilizar um questionário como ferramenta de análise da percepção dos funcionários de uma empresa de construção na cidade de Campo Grande/MS. Foi feita uma análise de correlação entre as diversas categorias dos questionários afim de observar de maneira abrangente a relação entre as variáveis. Entre os principais resultados obtidos, percebeu-se de modo geral, que na empresa estudada, a percepção dos funcionários é boa em relação a segurança, fatores de risco e a visão do ambiente sociogerencial. Em relação as características do trabalho como por exemplo, responsabilidades, organização de tarefas, entre outros, a análise de correlação mostrou resultados piores quando comparado aos outros.

Palavras-chaves: psicologia do trabalho, segurança na construção civil, saúde do trabalho.

1. INTRODUÇÃO

O progresso intenso do setor construção civil, que vem acontecendo nos últimos anos em todo o Brasil, está também acompanhado do aumento do número de acidentes de trabalho e de morte dos funcionários. A quantidade de trabalhadores que sofrem acidentes fatais nessa área representa números expressivos.

O expressivo número apontado se dá principalmente à natureza das atividades realizadas pelos profissionais. Entre elas pode-se citar o trabalho em altura, em locais instáveis, contato com equipamentos, maquinário, materiais pesados e produtos químicos, exposição em excesso à ruídos entre outros riscos. Tal fato exige métodos de organização de todas as etapas e recursos em uma obra, a partir da qualificação dos operários até o mantimento dos equipamentos.

Em vista desse cenário, surge a psicologia do trabalho e das organizações, que possui como principal finalidade a compreensão da interação entre os diversos fatores que envolvem as organizações, gestores, trabalhadores e poder público (GONDIM, BORGES-ANDRADE, e BASTOS, 2010).

É essencial ao profissional de engenharia civil o conhecimento técnico dos aspectos que envolvem a saúde e condições de trabalho dos funcionários da categoria da construção, uma vez que se torna um dos principais responsáveis por garantir a qualidade de serviço e eficácia dos resultados.

Em face disso, o trabalho tem como objetivo principal abordar elementos envolvidos nas condições de trabalho do setor da construção civil, por meio da aplicação de um questionário validado, baseado em Borges *et al* (2013). Assim, como estudo de caso, o instrumento foi utilizado em uma obra de edificações verticais no município de Campo Grande

2. SAÚDE E SEGURANÇA DO TRABALHO

A saúde e a segurança ocupacional, uma área de interesse relativamente recente e moderna. Surgiram de muitos movimentos trabalhistas há cerca de duzentos anos, quando o trabalho diário era muito diferente. Com o passar dos anos, e a chegada da Revolução Industrial no fim do século XVIII, o advento das primeiras máquinas não levava em consideração as limitações dos trabalhadores. Nesse cenário, houve um aumento na mortalidade de trabalhadores em decorrência de acidentes e doenças de trabalho (PINTO, 2017). O autor coloca que, a partir dessa situação, o governo e autoridades responsáveis começaram a tomar providencias no sentido de melhorar a qualidade de trabalho.

Para Vasconcelos, (2014) quando alguém menciona saúde e segurança ao longo da história, a primeira imagem que vem à mente é a do início do século XIX, uma época povoada por pequenas varreduras de chaminés e operários empregados por magnatas da indústria têxtil. Embora a realidade fosse menos dramática, é fato que havia um completo desinteresse pelas condições de trabalho dos trabalhadores e uma ignorância em relação à identificação de perigos e prejuízos à avaliação do risco.

Grande parte da legislação brasileira demonstra preocupação com as condições dos trabalhadores. Em 1988 após o fim da ditadura militar, o Brasil adotou diversas medidas de proteção que, em outros países, seriam tratadas apenas por meio de estatutos ou regulamentos. A Constituição especificava o máximo de horas semanais e proibição de trabalhos perigosos para menor de 18 anos e foram um marco inicial para os trabalhadores (SANTOS, 2011). Estas disposições refletem o envolvimento íntimo do governo nas relações de trabalho. A lei brasileira também estipula o número de profissionais da segurança e saúde que dependendo do tamanho dos estabelecimentos, a indústria é obrigada a contratar. Esses requisitos de pessoal aplicam-se apenas a estabelecimentos maiores e somente àqueles setores formais (INSS, 2013).

De acordo com Lima Jr et al (1995), as legislações que começaram a abordar a questão de segurança no trabalho só surgiram no início da década de 40 no Brasil. Em 1978 foram introduzidas as vinte e oito normas regulamentadoras. A Portaria nº 3.214 de 1978 (BRASIL, 1978) publicada pelo Ministério do Trabalho aprova 28 Normas Regulamentadoras da CLT (Consolidação das Leis do Trabalho) com revisões visando sua modernização contendo desde diretrizes relacionadas a medicina do trabalho, até prevenção de acidentes, uso de equipamentos de proteção individual, riscos ambientais, obras de construção civil, ergonomia, condições de trabalho entre outras.

3. CONDIÇÕES DE TRABALHO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Ao longo da década de 90 o tema da teoria das organizações ganhou espaço e aprofundamentos nas pesquisas. Lansley (1994) foi um dos primeiros a se destacar, com seu estudo focado na aplicação dos conceitos da Teoria das Organizações, na análise do funcionamento de empresas da construção civil. O autor estuda o impacto dos estilos de liderança e da estrutura organizacional no desempenho global da empresa.

O setor da construção civil é de grande importância para a economia e desenvolvimento do país. Além disso, o setor se destaca devido à grande quantidade de etapas pertencentes ao seu ciclo produtivo, e este fato se traduz no grande número de bens e serviços que esta consome de outros setores. E, em

termos de mercado de trabalho, absorve uma parcela significativa da mão-de-obra (BARZELLAY e LONGO, 2011). Ao analisar o processo de trabalho na construção civil, Souza (1999) e Singer (1998) chegaram à conclusão que o trabalho por produção atua como uma modalidade de exploração do trabalho de forma intensiva, que conduz a um esgotamento físico e mental dos trabalhadores.

Medeiros e Rodrigues (2009) apontam que a construção civil é um setor que necessita de atenção quanto a qualidade do trabalho, segurança, gestão e respeito ao meio ambiente. Os trabalhadores desta área geralmente realizam sua atividade laboral em ambiente insalubre e de modo arriscado. De maneira geral são atendidos inadequadamente em relação aos salários, alimentação e transporte, possuem pequena capacidade reivindicatória e, possivelmente, reduzida conscientização sobre os riscos aos quais estão submetidos. Assim, acabam ignorando, de forma inconsciente, seus direitos e deveres.

De acordo com Barzellay e Longo (2011), a construção civil possui algumas características que dificultam uma adequada gestão do trabalho, como por exemplo:

- a) Produtos únicos e não seriados;
- b) Utilização significativa de insumos, materiais e componentes;
- c) Alta contratação de mão-de-obra não qualificada;
- d) Formada em grande número por pequenas empresas;
- e) Alta rotatividade de mão-de-obra;
- f) Condições precárias de trabalho;
- g) Grande número de acidentes e de doenças ocupacionais;
- h) É um setor tradicional, sem grande impulso para alterações;
- i) O grau de precisão é em geral muito menor que o das outras indústrias, independentemente do parâmetro que se contemple (orçamento, prazo ou resistência mecânica);
- j) As responsabilidades são dispersas e pouco definidas.

De modo a proporcionar condições melhores afim de serem alcançados resultados mais eficientes pelas organizações, os funcionários necessitam de uma melhor qualidade de vida no trabalho. Tal

objetivo, por sua vez, somente é obtido quando as principais dimensões da vida são atendidas, sejam elas econômicas, pessoais, sociais, psicológicas ou organizacionais (MEDEIROS, 2002).

No Brasil, a NR 18 tratava das obras de construção civil, porém foi alterada pela Portaria da Secretaria de Segurança e Saúde do Trabalho (SSST) nº 04/1995 que regulamentou as Condições e Meio Ambiente do Trabalho na Indústria da Construção, instituindo o PCMAT (PROGRAMA DE CONDIÇÕES E MEIO AMBIENTE DE TRABALHO NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO) (BRASIL, 2011). O PCMAT aponta alguns itens que devem ser respeitados afim de garantir boas condições de trabalho aos funcionários, no âmbito administrativo, de planejamento e de organização. Constitui em uma série de medidas preventivas de segurança que devem ser adotadas durante o desenvolvimento da obra, no ambiente de trabalho da indústria da construção (CARMO, 2017).

4. A PSICOLOGIA DO TRABALHO E DAS ORGANIZAÇÕES

No mundo globalizado atual, as empresas exigem cada vez mais competência, competitividade, polivalência e criatividade por parte dos profissionais, mas nem sempre fornecem um suporte organizacional que promova a saúde no trabalho. A partir disso existe uma distância entre o que a organização espera e o que o trabalhador realiza. A mediação dessa discrepância implica um custo humano que abarca as dimensões física, psíquica e cognitiva (BARROS e MENDES, 2003).

As condições de trabalho possuem elementos de caráter multi e interdisciplinar. A psicologia do trabalho e das organizações (PTO) surge então com objetivo de atender as demandas do setor industrial que necessitava de respostas acerca de como escolher e adaptar o ser humano às condições organizacionais (Martin- Baró, 1988). Tratava mais dos atributos pessoais do que os aspectos do entorno e do conteúdo do trabalho.

A PTO pode ser entendida como uma perspectiva evolutiva na qual cada face se agrega as demais. A primeira face diz respeito a uma psicologia aplicada ao trabalho voltada a busca da eficiência e aplicação dos conhecimentos psicológicos à lógica da produção industrial e da racionalidade instrumental. Assim, teria como finalidade a proposição de medidas psicológicas e ergonômicas para garantir a saúde e qualidade de vida do trabalhador (GONDIM, BORGES-ANDRADE e BASTOS, 2010).

A segunda visão, conforme os autores, abrange a estrutura das organizações, que passou a se tornar ponto importante na compreensão do comportamento humano no trabalho. Desse modo, o desenvolvimento organizacional e gerencial e mudanças organizacionais passaram a ocupar um lugar de destaque na psicologia das organizações. Já a terceira face trata o trabalho como um fenômeno

psicossocial não circunscrito somente às organizações de trabalho. Os significados e sentidos do trabalho adquirem importância: por que se trabalha, como se trabalha e para quem se trabalha.

Borges-Andrade e Zanelli (2004) trazem outra classificação do campo mais vasto da psicologia do trabalho, em três subdomínios:

- i) o ser humano e suas ações em situações de trabalho (psicologia do trabalho) e em contextos organizacionais (psicologia organizacional e comportamento organizacional); ii) os antecedentes e consequentes destas ações para a pessoa, os grupos e a organização; e iii) as contribuições da psicologia e de outras ciências que fornecem ferramentas conceituais e metodológicas para a psicologia organizacional e do trabalho.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Com a finalidade de avaliar as condições de trabalho na construção civil, a pesquisa foi baseada no método proposto por Borges *et al* (2013). Os autores propuseram um questionário sobre as condições de trabalho, explorando sua consistência e validade de construto, bem como se as estruturas fatoriais variam por ocupações, aplicando – o em duas áreas distintas: saúde e construção civil. No presente trabalho, o questionário foi aplicado na área da construção civil.

Os dados foram coletados na obra de um condomínio fechado localizado na cidade de Campo Grande/MS. A estrutura conta com 160 apartamentos, 5 torres com térreos e sete andares cada. A área total de cada bloco é de 65,97m² (54,45 m² do apartamento e 11,25m² da garagem coberta). Em média conta com uma variação de cerca de 20 a 60 funcionários na execução da obra. O prazo para entrega previsto é de 18 meses.

Na etapa de coleta de dados, foi feito um contato com o engenheiro responsável pela obra, agendamento da visita para entrega e assinatura do Formulário de Consentimento do Entrevistado. Ao todo, 27 trabalhadores responderam ao questionário, preservando a manutenção do anonimato.

5. ANÁLISE DOS DADOS

A Tabela 1 mostra uma síntese de pesquisas a respeito dos fatores que influenciam nas condições de trabalho e nas quais os autores se basearam para a elaboração do questionário.

Tabela 1. As principais categorias relativas às condições de trabalho.

Categorias	Conceitos
Condições jurídicas e contratuais	Conjunto de aspectos jurídicos (autônomo versus emprego), contratuais no caso de emprego (formal ou informal), estabilidade (estável ou instável) e às modalidades (temporário, por tempo indefinido. Além disso envolve aspectos como o sistema de incentivo e tempo de dedicação ao trabalho
Condições físicas e materiais	Referem-se ao entorno das atividades de trabalho em relação às condições físicas, espaço arquitetônico e instalações, às condições de segurança física e/ou material e as formas em que se lida com o impacto do espaço geográfico e condições climáticas.
Processos e características das atividades	Diz respeito aos elementos do conteúdo das atividades de trabalho, à organização e divisão do trabalho, às demandas do posto de trabalho, aos modos de execução das atividades, ao desempenho e espaços de autonomia e ação.
Condições do ambiente sociogerencial	Relaciona-se às interações interpessoais (horizontais e verticais), às práticas sociais relativas à gerência ou gestão e práticas sociais decorrentes da inserção no mercado de trabalho.

Fonte: Borges et al (2015).

O questionário desenvolvido e utilizado nessa pesquisa é composto de 35 questões, algumas divididas em subitens, envolvendo as quatro grandes categorias das condições de trabalho. Ao todo, são 18 questões relacionadas às condições contratuais e jurídicas, 1 questão com 44 subitens sobre condições físicas e materiais, 11 questões e seus respectivos subitens a respeito dos processos e características das atividades, finalizando com 5 questões e subitens sobre as condições do ambiente sociogerencial (BORGES et al, 2013).

Algumas perguntas contidas no questionário estavam em conformidade com uma escala Likert, (1 = nunca; 2 = raramente, 3 = algumas vezes; 4 = muitas vezes; 5 = Sempre), o restante eram de múltipla escolha ou exigiam respostas dicotômicas (sim e não).

Assim como no trabalho de Borges et al (2013) as questões sobre condições contratuais e jurídicas não utilizaram análise de frequência, portanto não farão parte das discussões aqui apresentadas.

Para cada uma das três categorias que restaram, foi feita uma análise fatorial que permitiram identificar os fatores empíricos, gerando um indicador de consistência. Os resultados iniciais basearam-se na média aritmética e desvio padrão, como segue.

$$\text{Desvio padrão} = \frac{\sum (xi - \bar{x}^2)}{n} \quad \text{Eq 1}$$

$$\text{Média} = \frac{\sum n}{n} \quad \text{Eq 2}$$

A etapa seguinte foi a obtenção de um coeficiente, e foi calculado conforme equação abaixo.

$$\text{Coeficiente} = \frac{\text{valor da escala} - \text{média}}{\text{desvio padrão}} \quad \text{Eq 3}$$

Com base nisso, foi calculado o índice, a partir das média aritméticas dos coeficiente obtidos. A fim de padronizar o resultado para que este atingisse valores entre 0 e 1, foi feita uma padronização por meio da seguinte equação. Os resultados são considerados melhores quanto mais se aproximarem de 0.

$$\text{Índice padronizado bruto} = \frac{\text{índice} - \text{menor valor}}{\text{maior valor} - \text{menor valor}} \quad \text{Eq 4}$$

De posse do Índice Bruto padronizado, para todas as categorias do questionário, foi calculado o índice geral, baseado no coeficiente obtido no artigo de Borges et al (2013). Assim, chegou-se ao chamado Índice Geral, que representa o resultado final da análise de correlação. Para todas as análises foi utilizado como software de apoio, o Microsoft Excel.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação ao perfil dos trabalhadores entrevistados, a maioria são homens (96,4%) com faixa etária predominante entre 38 e 42 anos. Em seu trabalho Cunha (2015) também aponta que tradicionalmente a idade do trabalhador da construção civil é na maior parte de 30 a 39 anos. A maior parte dos entrevistados, cerca de 19,2% passou em média 20 anos trabalhando. Em relação ao nível de instrução, a maioria, representando 28,6% possui ensino médio incompleto, e quando questionados se ainda estudam atualmente, 89,3% responderam negativamente. Em relação ao perfil profissional, 64,3% dos trabalhadores apontaram que o trabalho atual é seu único trabalho remunerado, sendo que 63,0% estão na condição de empregado com carteira de trabalho assinada e temporário. A ocupação da maioria dos trabalhadores entrevistados (35,7%) na obra é de servente, com uma jornada de trabalho predominante de 44 horas semanais.

Em relação ao perfil do empregado da construção civil, Gomes (2011) aponta que o setor está em constante crescimento, entretanto tal situação não corresponde à melhor qualificação dos trabalhadores deste setor, principalmente devido ao fato de que muitos trabalhadores são terceirizados ou não são contratados apenas prestando serviços, o que faz com que sua saúde não

seja objeto de interesse direto das empresas. Por outro lado, o autor constata que essa rotatividade do trabalhador, e falta de estabilidade, em muitos casos, o leva a não ter condições para exigir que seus direitos em relação à saúde e à segurança sejam cumpridos.

Quando se trata da situação dos trabalhadores, estes celebram contratos por obra e, quando está é finalizada, ele é demitido, podendo ser ou não contratado novamente pela mesma empresa em outro canteiro de obras. O setor, juntamente com o emprego agrícola e doméstico, é responsável pela maior parcela da informalidade da economia do país. Estas informações sugerem o quanto é instável a situação de grande parte dos trabalhadores no setor (CUNHA, 2015).

Em relação as questões que tratavam do ambiente sociogerencial, condições físicas e materiais e processos e características do trabalho, foram aplicadas as análises de correlação conforme descritas na metodologia. As tabelas 2, 3 e 4, apontam os valores dos índices obtidos.

Tabela 2. Correlação dos índices referentes a fatores de condições físicas e materiais.

Falta de Segurança	Exposição a Situações Adversas	Situações Desgastantes	Movimentos Repetitivos	Mudanças Físicas Naturais	Riscos de Acidentes de Trabalho	Exposição a Substâncias	Índice Geral
0,070	0,997	0,276	0,671	0,118	0,136	0,059	0,294
0,299	0,761	0,083	0,744	0,000	0,461	0,000	0,347
0,000	0,122	0,276	0,000	0,298	0,325	0,245	0,121
0,135	0,761	0,456	0,500	0,396	0,640	0,369	0,378
0,420	0,589	0,092	1,000	0,646	0,130	0,969	0,495
0,878	0,568	0,548	0,677	0,494	0,651	0,745	0,710
0,788	0,568	0,728	0,584	0,560	0,628	0,512	0,677
0,783	0,756	0,713	0,669	1,000	0,605	0,643	0,758
0,825	0,572	0,820	0,750	0,958	0,492	0,631	0,756
0,335	0,639	0,280	0,500	0,274	0,644	0,369	0,408
0,209	0,452	0,000	0,084	0,274	0,000	0,233	0,197
0,697	1,000	0,364	0,834	0,584	0,899	0,000	0,676
0,926	0,559	0,552	0,584	0,457	0,492	0,592	0,694
0,490	0,000	0,552	0,750	0,638	0,492	0,555	0,474
0,124	0,137	0,269	0,671	0,156	0,000	0,186	0,195
0,915	0,131	0,526	1,000	0,651	0,823	0,869	0,730
0,449	0,310	1,000	1,000	0,526	1,000	0,148	0,585
0,678	0,000	0,540	1,000	0,663	0,385	0,233	0,547
0,363	0,589	0,540	0,500	0,354	0,249	0,381	0,421
0,351	0,751	0,713	0,750	0,377	0,203	1,000	0,520
1,000	0,437	0,534	0,750	0,340	0,498	0,407	0,698
0,665	0,310	0,820	0,500	0,607	0,498	0,321	0,578
0,575	0,310	0,713	1,000	0,651	0,864	0,321	0,612
0,816	0,316	0,803	0,834	0,597	0,226	0,174	0,639
0,363	0,179	0,728	0,834	0,513	0,621	0,059	0,446
0,346	0,179	0,988	0,826	0,545	0,492	0,059	0,462
0,681	0,244	0,436	0,834	0,391	0,930	0,272	0,572

Fonte: Elaborada pela autora

Em relação as condições de segurança, as a maioria das correlações ficou abaixo ou próxima de 0,5, indicando um bom resultado e que diante de todas as categorias avaliadas na percepção dos entrevistados, a empresa em questão apresenta um bom desempenho. A indústria da construção civil é um dos setores da economia que mais registra acidentes de trabalho. É de responsabilidade das empresas, a capacitação dos funcionários, com noções de segurança, a fiscalização no uso de equipamentos de proteção individual e das condições de trabalho no controle de fatores externos que podem prejudicar a saúde e segurança do trabalhador.

Tabela 3. Correlação dos índices referentes a processos e características do trabalho

Rapidez e Complexidade	Interação no Trabalho	Exigência de Qualificação	Autonomia (jornada e escolha de colegas)	Trabalho em Equipe	Autonomia no Modo do Trabalho	Definição das Atividades	Responsabilidade	Índice Geral
0,306	0,504	0,805	0,615	0,417	0,017	0,011	0,626	0,478
0,243	0,464	0,923	1,000	0,491	0,940	0,937	0,611	0,686
0,000	0,000	0,155	0,664	0,404	0,378	0,374	0,328	0,242
0,819	0,113	0,683	0,446	0,773	0,147	0,142	0,066	0,516
0,547	0,149	0,776	0,322	0,700	0,653	0,652	0,755	0,581
0,616	0,213	0,910	0,704	0,807	0,582	0,581	1,000	0,704
0,506	0,045	0,761	0,322	0,935	0,884	0,884	0,333	0,573
0,760	0,392	0,638	0,098	0,781	0,769	0,768	0,678	0,646
0,864	0,633	0,476	0,481	0,717	1,000	1,000	0,297	0,743
0,334	0,145	0,000	0,488	0,313	0,358	0,356	0,119	0,280
0,527	0,890	0,787	0,746	0,434	0,630	0,627	0,814	0,738
0,646	0,319	0,835	0,314	0,289	0,488	0,486	0,522	0,564
0,612	0,071	0,755	0,366	0,000	0,358	0,356	0,814	0,486
0,695	0,317	0,569	0,387	0,636	1,000	1,000	0,641	0,667
0,902	0,321	0,865	0,495	0,336	0,733	0,733	0,000	0,667
1,000	0,470	0,401	0,256	0,935	0,482	0,483	0,194	0,633
0,713	0,541	0,198	0,308	0,936	0,426	0,430	0,418	0,548
0,615	0,316	0,326	0,267	0,871	0,713	0,715	0,653	0,561
0,662	1,000	1,000	0,687	0,361	0,000	0,000	0,695	0,701
0,564	0,226	0,410	0,595	0,790	0,267	0,267	0,742	0,517
0,581	0,085	0,420	0,218	0,790	0,418	0,419	0,851	0,482
0,740	0,340	0,592	0,283	0,936	0,488	0,317	0,814	0,613
0,739	0,470	0,770	0,326	0,888	0,829	0,831	0,593	0,719
0,581	0,388	0,632	0,111	0,918	0,583	0,585	0,742	0,583
0,616	0,485	0,854	0,328	0,692	0,316	0,317	0,814	0,618
0,422	0,390	0,255	0,000	0,936	0,482	0,483	0,814	0,451
0,824	0,329	0,584	0,042	1,000	0,207	0,205	0,450	0,542

Fonte: Elaborado pela autora

A maioria dos resultados referentes aos processos e características do trabalho situaram-se próximo ou acima da faixa de 0,5, indicando a possibilidade de existência de conflitos em alguns pontos relativos a categoria. Ao trabalhador da construção civil, exige-se muito em termos de esforço físico e mental. Entretanto, a qualificação da mão-de-obra no setor é baixa. As atividades, são por muitas

vezes repetitivas e cansativas, o que por sua vez pode influenciar na relação pessoal entre os trabalhadores do mesmo setor ou superiores.

A gestão administrativa da empresa deve sempre prezar pela organização das atividades, definição de funções e responsabilidades entre outros aspectos. Daí resulta uma melhor eficiência e produtividade no serviço, garantindo a qualidade necessária tanto aos produtos finais, quanto as condições de saúde do funcionário.

Tabela 4. Correlação dos índices referentes ao ambiente sócio gerencial

Falta de Apoio na Execução das Tarefas	Discriminação Social	Gestão do Desempenho Profissional	Discriminação Sexual	Exposição a Violência	Índice Geral
0,314	0,000	0,076	0,000	0,277	0,175
0,721	0,000	1,000	0,000	0,277	0,479
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,896	0,000	0,552	0,000	1,000	0,574
0,580	0,000	0,234	0,000	0,000	0,275
0,709	0,000	0,541	0,000	0,429	0,426
0,814	0,000	0,486	0,000	0,277	0,443
0,719	0,000	0,390	0,000	0,403	0,404
0,824	0,000	0,448	0,000	0,251	0,438
0,102	0,000	0,000	0,000	0,374	0,088
0,652	0,000	0,407	0,000	0,152	0,348
0,774	0,000	0,351	0,000	0,277	0,406
0,567	0,000	0,351	0,000	0,126	0,302
0,964	0,000	0,252	0,000	0,251	0,467
0,663	0,000	0,386	0,000	0,152	0,350
0,735	0,000	0,631	0,000	0,126	0,412
1,000	0,000	0,513	0,000	0,126	0,505
0,546	0,000	0,541	0,000	0,126	0,321
0,801	0,000	0,617	0,000	0,303	0,460
0,080	0,000	0,365	0,000	0,152	0,105
0,790	0,000	0,421	0,000	0,152	0,408
0,860	0,000	0,372	0,000	0,277	0,445
0,329	0,000	0,310	0,000	0,152	0,200
0,326	0,000	0,114	0,000	0,403	0,201
0,047	0,000	0,000	0,000	0,152	0,038
0,000	0,000	0,000	0,000	0,152	0,018
0,326	0,000	0,614	0,000	0,277	0,259

Fonte: Elaborado pela autora

No que tange ao ambiente sociogerencial, o resultando predominante no valor dos índices foi próximo ou abaixo de 0,5, indicando um bom desempenho das respostas. Quanto as questões de apoio as tarefas, discriminação, violência e gestão de desempenho, a opinião dos entrevistados foi, no geral, boa, pois os valores obtidos foram baixos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia utilizada nesse trabalho se mostrou uma ferramenta bastante útil no conhecimento das condições de saúde e segurança do trabalhador na construção civil. As respostas obtidas representam uma fonte de informações bastante úteis aos processos de gerenciamento e gestão das empresas.

A empresa pesquisada apresentou bons resultados no que tange as condições no ambiente sociogerencial e fatores de condições físicas e materiais, relacionada a segurança, acidentes, exposição a fatores de risco. Apenas na categoria relacionada a processos e características do trabalho, os resultados da correlação foram mais próximos a 1, o que pode indicar uma visão pior dos trabalhadores quanto a essa condição. A empresa analisada é renomada no ramo da construção civil, então espera-se da mesma que ofereça condições condizentes com os serviços e produtos que gera.

O setor da construção civil, é reconhecidamente um dos que mais registra acidentes de trabalho, e um dos que mais apresenta condições adversas de trabalho. Instrumentos como esse são úteis na visualização das condições do trabalho em diversos setores de atividades. A saúde e segurança do trabalhador quando são de qualidade trazem benefícios individuais e pessoais, bem como eficiência e produtividade nas atividades.

6. REFERENCIAS

BARROS, Paloma Castro da Rocha; MENDES, Ana Magnólia Bezerra. Sofrimento psíquico no trabalho e estratégias defensivas dos operários terceirizados da construção civil. *PsicoUSF*, v. 8, n. 1, p. 63-70, 2003.

BARZELLAY, BF da C.; LONGO, O. O. SINAPI como instrumento balizador de custos para a contratação de obras e serviços de engenharia realizados com recursos públicos. In: Congresso Nacional de Excelência em Gestão. Anais... Niterói. 2011.

BORGES, Livia Oliveira et al. Questionário de condições de trabalho:: reelaboração e estruturas fatoriais em grupos ocupacionais. *Avaliação Psicológica: Interamerican Journal of Psychological Assessment*, v. 12, n. 2, p. 213-225, 2013.

BORGES-ANDRADE, Jairo Eduardo; ZANELLI, José Carlos. Psicologia e produção de conhecimento em organizações e trabalho. *Psicologia, organizações e trabalho no Brasil*, p. 492-517, 2004.

BRASIL. Portaria nº 3.214, 08 de junho de 1978. Aprova as Normas Regulamentadoras - NR - do Capítulo V, Título II, da Consolidação das Leis do Trabalho, relativas a Segurança e Medicina do Trabalho. 1978.

CUNHA, Sebastião Ferreira da. Perfil do mercado de trabalho brasileiro e dos trabalhadores na construção civil. In: FILGUEIRAS, Vitor Araújo (Org.). Saúde e segurança do trabalho na construção civil brasileira. Aracaju: Ministério Público do Trabalho, 2015. p. 41-60.

GOMES, H. P. Construção civil e saúde do trabalhador: um olhar sobre as pequenas obras. 2011. 2011. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado) __Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca-FIOCRUZ, Rio de Janeiro.

GONDIM, Sonia Maria Guedes; BORGES-ANDRADE, Jairo Eduardo; BASTOS, Antônio Virgílio Bittencourt. Psicologia do Trabalho e das Organizações: Produção científica e desafios metodológicos. *Revista Psicologia em Pesquisa*, v. 4, n. 2, 2010.

INSS. Instituto Nacional do Seguro Social Ministério do Previdência Social. Anuário Estatístico da Previdência Social 2012. Brasília, 2013.

LANSLEY, Peter. Analysing construction organizations. *Construction Management and Economics*, v. 12, n. 4, p. 337-348, 1994.

LIMA JUNIOR, Jófilo Moreira; VALCÁRCEL, Alberto López; DIAS, Luiz Alves. Segurança e Saúde no Trabalho: Experiência Brasileira e Panorama Internacional. Secretaria Internacional do Trabalho – OIT, 1995.

MARTIN-BARÓ, I. (1998). Hacia una psicologia de la liberacion. In: *Psicologia de la liberacion*. Portugal: Ed. Rotta

MEDEIROS, Elisa Girardi. Análise da qualidade de vida no trabalho: um estudo de caso na área da construção civil. 2002. 137 f. 2002. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Administração)-Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre..

MEDEIROS, José Alysson Dehon Moraes; RODRIGUES, Celso Luiz Pereira. A existência de riscos na indústria da construção civil e sua relação com o saber operário. Paraíba: PPGEP/UFPB, 2009

PINTO, Abel. Sistemas de gestão da segurança e saúde no trabalho. Guia para a sua implementação (3.ª ed). Edições Sílabo Ltda, 2017.

Singer, P. Globalização e desemprego – diagnóstico e alternativas. São Paulo: Contexto. 1998.

SANTOS, Adolfo Roberto Moreira, “o ministério do trabalho e emprego e a saúde e segurança no trabalho,” Chapter 1 in Saúde e segurança no trabalho no Brasil : aspectos institucionais, sistemas de informação e indicadores. Eds. Ana Maria de Resende Chagas, Celso Amorim Salim, Luciana Mendes Santos Servo. (Brasília : Ipea, 2011).

SOUSA, N. H. Bicalho de. Gestão do trabalho na indústria da construção civil: práticas tradicionais e perspectivas futuras. Ser Social, 5, 159-188, 1999.

VASCONCELOS, Anselmo Ferreira et al. Qualidade de vida no trabalho: origem, evolução e perspectivas. Caderno de pesquisas em Administração, v. 8, n. 1, p. 23-35, 2001.

Capítulo 3



10.37423/250309810

INFLUÊNCIA DO ESTADO DE TENSÃO NO MODO DE FALHA EM MATERIAIS DÚCTEIS VIA MODELAGEM COMPUTACIONAL E ANÁLISE EXPERIMENTAL

Eduardo Atem de Carvalho

*Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro*

Larissa Gomes Simão

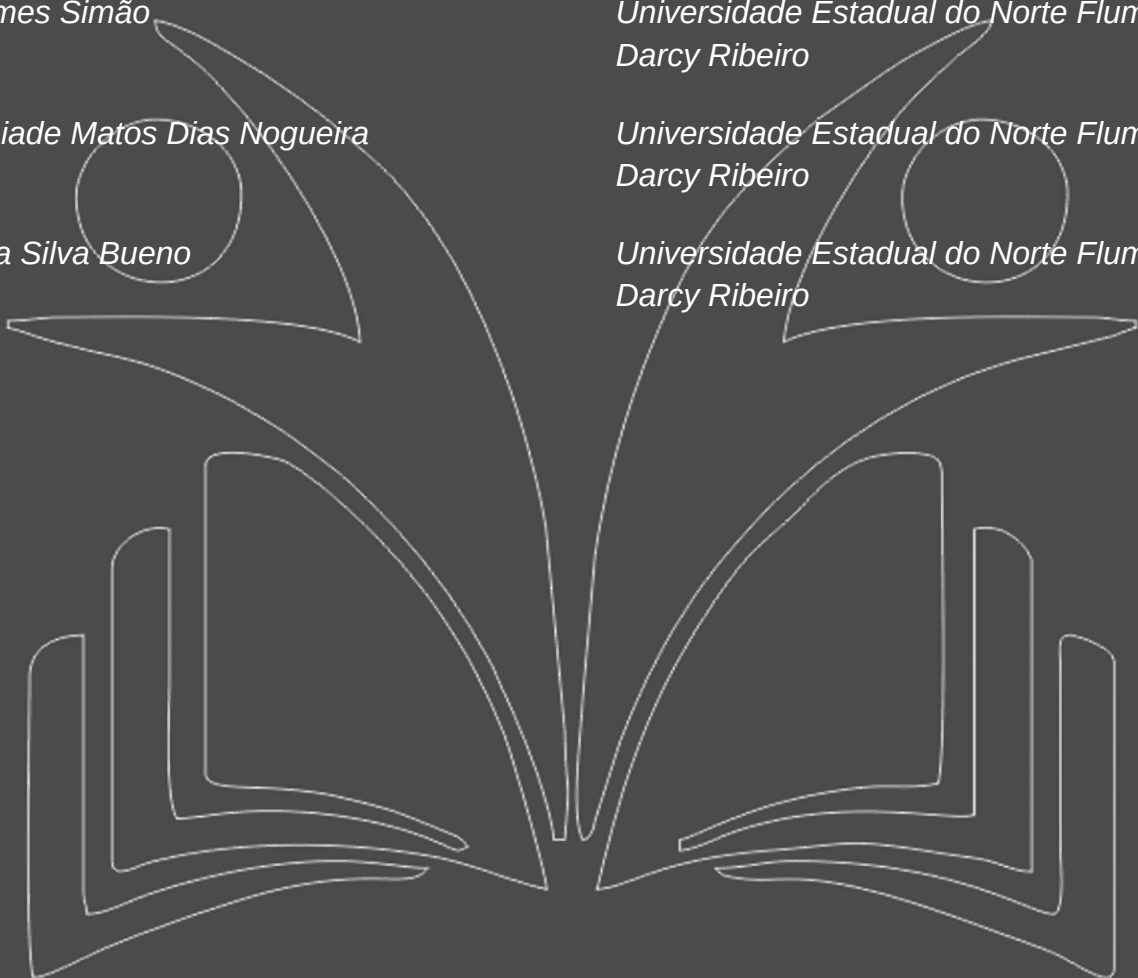
*Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro*

Fátima Rúbiade Matos Dias Nogueira

*Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro*

Jefferson da Silva Bueno

*Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro*



Resumo: Os materiais frágeis e semifrágeis obedecem bem às formulações de falha feitas pela Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) bem como a Elasticidade Clássica (EC). Para os materiais dúcteis, a presença de uma região plástica antes da falha do corpo torna a análise complexa e requer o uso da abordagem da Mecânica da Fratura Elasto Plástica (MFEP) para o caso onde existe uma falha singular ou sob condições que gerem um campo de tensões similares. Em contrapartida, para entalhes não singulares, o modo correto de falha bem como os limites tolerados pela peça antes que a falha ocorra precisam ser bem estabelecidos. A determinação de parâmetros iniciais para análise numérica é obtida através de ensaios de tração convencionais. Para a liga de alumínio AA7075-T6 foram simulados entalhes e raios cujos parâmetros obedecem às relações $0.1 \leq d/D \leq 0.9$ e $0.0017 \leq p/D \leq 0.1333$, respectivamente. São apresentadas formulações desenvolvidas a partir das equações de Tada et al. (2000) e Anderson (2005), permitindo o emprego dos valores de NMOD (Notch Mouth Opening Displacement) para avaliação de K_{Ic} .

Palavras-chave: Análise numérica de Tensões, Fratura, Ruptura.

1. INTRODUÇÃO

Estruturas reais estão sujeitas a estados de tensão multiaxiais que podem influenciar suas respostas às solicitações externas. Particularmente no caso de materiais dúcteis, extensivos esforços por parte dos pesquisadores têm estabelecido que a fratura sofre uma forte dependência do estado de tensão. Comportamento tipicamente observado em várias ligas comumente empregadas em aplicações industriais (Andrade et al. 2014), a exemplo da liga de alumínio AA7075 T6 usada no presente trabalho.

Os materiais frágeis e semifrágeis obedecem bem às formulações de falha feitas pela Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) bem como a Elasticidade Clássica (EC) (Anderson, 2005) e a presença e formato de descontinuidades determinam se o modo de falha é fratura ou ruptura (Bao, 2004). A ausência de deformação plástica, por sua vez, simplifica a análise. Contudo, para os materiais dúcteis, a presença de uma região plástica antes da falha do corpo torna a análise complexa e requer o uso das formulações da Mecânica da Fratura Elasto Plástica (MFEP) para o caso onde existe uma pré falha singular ou sob condições que gerem um campo de tensões similares (ASTM E1820, 2023). Já para o caso onde existe a presença de um entalhe não singular, surge a necessidade de se determinar o modo correto de falha bem como os limites tolerados pela peça antes que a falha ocorra (Mackenzie *et al.*, 1977; Li, 2017; Powers, 2019). Para esses casos a combinação da análise numérica do Índice de Triaxialidade (η) com o tamanho da zona plástica formada é a maneira abordada neste trabalho para a determinação do modo de falha e da capacidade máxima de um corpo dúctil entalhado de suportar carga sem falhar, a partir de dados fornecidos pelo ensaio de tração clássico (Bridgman, 1952; Choung *et al.*, 2008; Tu *et al.*, 2019).

O emprego do Método de Elementos Finitos (MEF) tem sido uma das principais ferramentas para o correto entendimento do modo de falha do material (Eurocode 9, 2007; Zhao *et al.*, 2017). Uma das formas de se verificar a acurácia da modelagem via MEF é através da comparação dos valores do Fator de Concentração de Tensão, K_t , obtido na análise numérica com aqueles determinados pelas formulações clássicas existentes (Pilkey, 1997; Neuber, 1937).

A determinação dos parâmetros do modelo de Ramberg-Osgood se torna necessária para alimentar os modelos de elementos finitos (Ramber & Osgood, 1943; Yun & Gardner, 2021; Kujawski *et al.*, 2020). Por outro lado, o interesse no comportamento das ligas de alumínio para aviação é contínuo (Eurocode 9, 2007; Gadamchetty *et al.*, 2016). Sendo essas de natureza dúctil, para a análise do comportamento em falha desses materiais, se torna necessário o emprego de modelos matemáticos (Tada *et al.*, 2000), analíticos (Wierzbicki & Xue, 2005), além das análises numéricas, já mencionadas.

2. CARACTERÍSTICAS DOS MECANISMOS DE FALHA EM MATERIAIS DÚCTEIS

De forma geral, a falha dúctil em metais tem sido um desafio significativo para a Engenharia. Ao longo das últimas quatro décadas, pesquisadores buscam entender os mecanismos base que governam a fratura dúctil de metais, incluindo a predição do início da fratura como uma função da deformação plástica local e de tensões multiaxiais (Liu et al., 2022).

Embora seja do conhecimento de todos que materiais dúcteis sofrem quantidades altas de deformação plástica antes da falha e que essa em metais e ligas, em geral, resulta da nucleação, crescimento e coalescência de microvazios, alguns aspectos sobre os complexos mecanismos microscópicos da falha dúctil permanecem pouco claros (Yang et al., 2023).

Por outro lado, o efeito da triaxialidade sobre a fratura dúctil é conhecido por décadas. A discussão original sobre essa questão pode ser o trabalho de Bridgman, que considerou a influência da pressão hidrostática sobre as propriedades dos materiais através de ensaios de tração dentro de condições geradas e similares a um vaso de ultra-alta pressão (Li, 2017).

Para avaliar a deformação de fratura de metais dúcteis sob vários estados de tensão, experimentos foram realizados em corpos de prova com diferentes geometrias e consequentemente submetidos a diferentes estados de tensão. Dentre essas geometrias estudadas, estavam os corpos de prova cilíndricos lisos e entalhados para gerar estados de tensão uni e multiaxiais, respectivamente (Liu et al., 2022).

2.1 FALHA DÚCTIL – RUPTURA

No caso de um cilindro entalhado, fabricado com um material dúctil como uma liga de alumínio, a região de início da falha do corpo será controlada por quatro fatores geométricos que atuam em conjunto: a profundidade do entalhe, a , o raio da seção resistente, r , o raio da seção nominal, R e o raio na raiz do entalhe, ρ . Para se determinar os valores limite para fabricação de um dado lote de corpos de prova, deve-se então proceder um conjunto de simulação empregando o Método de Elementos Finitos (MEF). As simulações irão cobrir todos os raios a serem simulados, limite superior e inferior desses, de forma a permitir que as pequenas imperfeições de fabricação sejam acomodadas pelos resultados. A análise via MEF determinará as componentes de tensão de von Mises e as tensões principais atuantes na seção resistente, σ_1 , σ_2 e σ_3 (Li, 2017). De posse dessa análise é necessário determinar o Índice de Triaxialidade (η) atuante em cada ponto da seção analisada. Esse índice é dado pela expressão 1:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{vM}} \quad (1)$$

Onde:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2)$$

$$\sigma_{vM} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3)$$

2.2 FALHA DÚCTIL – FRATURA

A falha por fratura em um material dúctil irá se iniciar em uma região à frente do entalhe, mas não na sua raiz. Devido ao estado de tensões reinante, a região localizada na raiz do entalhe se deforma submetida a um estado de tensão biaxial (caso do cilindro entalhado) que permite o surgimento de deformações plásticas. Na região imediatamente adjacente a essa haverá então a fratura do material. Segundo Irwin, desde que o tamanho da região plastificada não exceda a 5% da seção resistente (neste caso, $r_p \leq 0.05r$), o uso de formulações da MFLE continua válido. A simulação por MEF fornece o tamanho da zona plástica associada com a geometria do corpo. Para tal, é necessário antes realizar ensaios de tração clássicos para se obter as propriedades mecânicas básicas do material. De acordo com Tada *et al.* (2000), é possível se determinar as propriedades de fratura a partir das expressões 4-7 que foram adaptadas para os símbolos utilizados neste trabalho.

$$\sigma_{net} = \frac{P}{\pi r^2} \quad (4)$$

$$K_I = \sigma_{net} \sqrt{\pi r} F_1(r/R) \quad (5)$$

$$G(r/R) = \frac{F_1(r/R)}{\sqrt{1 - \frac{r}{R}}} \quad (6)$$

$$G(r/R) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{r}{R} + \frac{3}{8} \left(\frac{r}{R} \right)^2 - 0.363 \left(\frac{r}{R} \right)^3 + 0.731 \left(\frac{r}{R} \right)^4 \right\} \quad (7)$$

A hipótese assumida é de que para raios de entalhes pequenos o suficiente, o corpo irá se comportar como se contivesse uma trinca anelar externa, dessa forma é possível empregar as expressões 4-7. Para a abertura da boca da trinca (δ) durante o teste de tração, temos as formulações de 8-10 adaptadas de Tada *et al.* (2000):

$$\delta = \frac{4(1-\nu^2)}{E} \sigma a D(a/R) \quad (8)$$

Onde:

a = profundidade da trinca

$$\sigma_{nom} = \frac{P}{\pi R^2} \quad (9)$$

A partir dessas formulações é possível se prever a abertura da boca da trinca.

2.3 ESTADO DE TENSÃO DO ENTALHE ANELAR EM UM CILINDRO

Pontos de fixação de vários componentes para fabricar uma estrutura conjunta geralmente acarretam em concentradores de tensões, cuja presença proporciona um estado de tensão multiaxial. Vários estudiosos já tentaram usar pressão hidrostática para induzir um estado multiaxial de tensões em ligas com memória de forma, por exemplo. No entanto, tais experimentos requerem o uso de equipamento especializado para induzir pressão hidrostática, especialmente se a pressão não for uniforme sobre todas as faces do corpo de prova. Um método alternativo para obter um estado multiaxial de tensões que tem sido utilizado em um número considerável de materiais é o uso de barras cilíndricas entalhadas (Phillips e Lagoudas, 2018).

Ademais, variando o tamanho dos entalhes é possível atingir uma variedade de estados de tensão que podem ser caracterizados, segundo Li (2017), a partir do já citado Índice de Triaxialidade (Equação 1). A vantagem dos ensaios de tração em cilindros entalhados é justamente alcançar diferentes condições de triaxialidade por mera mudança no raio dos entalhes dos corpos de prova.

De acordo com Peterson (Pilkey, 1997) para problemas em 3D a solução será dependente do coeficiente de Poisson. Ao contrário dos concentradores de tensão existentes em placas planas, grossas ou finas, o estado de tensão na raiz do entalhe anelar em um cilindro ($r = \rho/2$) é biaxial por natureza e a própria distribuição de tensões ao longo de r é triaxial, requerendo uma abordagem mais complexa que a tradicional do problema.

3. MATERIAIS E SIMULAÇÕES VIA MEF

3.1 MATERIAIS

Foram fabricados quatro corpos de prova cilíndricos com a liga AA7075-T6 de acordo com a Norma ASTM E8 (2022) conforme consta na Figura 1.

Os parâmetros da formulação de Ramberg & Osgood (1943) e os do Eurocode-9 (2007) foram determinados. O modelo Bi-Linear se baseou na norma europeia “Eurocode 9: Design of aluminium structures”.

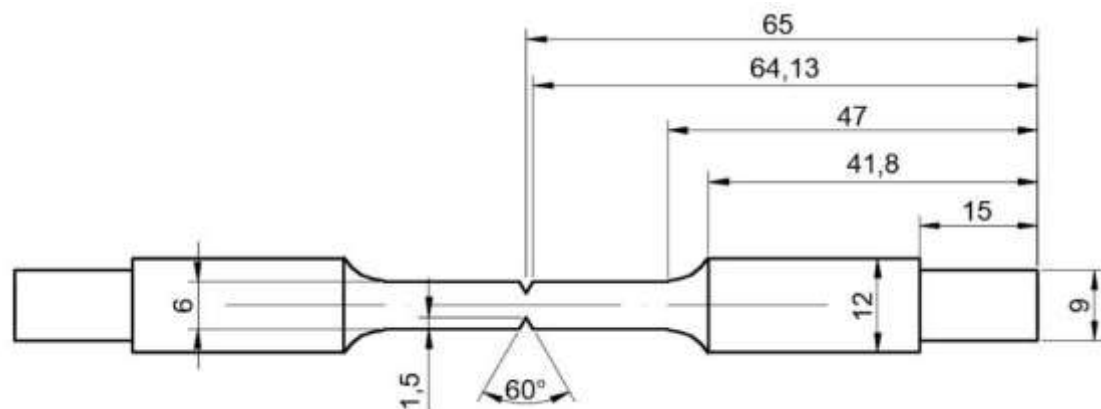


Figura 1 - Corpos de tração segundo a norma ASTM E8 com entalhe. Todas as medidas estão em milímetros (Simão, 2019).

3.2 DETERMINAÇÃO DA GEOMETRIA A SER SIMULADA POR MEF E SUA MALHA

A natureza simétrica do cilindro entalhado permite que apenas $\frac{1}{4}$ da sua seção seja simulada. Essa seção representa uma “fatia” bidimensional e sua análise é axissimétrica. Solução encontrada também por Andrade et al. (2014), Phillips & Lagoudas (2018) e Derpenski (2019).

Foram simulados dois ângulos de abertura do entalhe: 0° e 60° , onde 0° é um entalhe em “U” e 60° , entalhe em “V”. A simulação apresentada na Figura 1 exibe o caso onde a razão entre a profundidade do entalhe, a , e o raio da seção nominal, R , foi $a/R = 0.25$, onde $a = 0.75$ em média e $R = 3$. Já a razão entre os raios na raiz do entalhe, ρ , e o diâmetro da seção nominal, D , variaram da forma $\rho/D = 0.00125, 0.00250, 0.00417, 0.00833, 0.01667, 0.02500, 0.03330, 0.06667, 0.10000$.

Foram simulados também, entalhes obedecendo a clássica relação $a/R = 0.5$ para as razões $\rho/D = 0.02, 0.107$ e 0.217 . Dois materiais foram simulados: Linear e Bi Linear. O primeiro empregou apenas as propriedades elásticas da liga de alumínio (E e ν).

3.3 DIVISÃO DA MALHA

A peça estudada tem regiões onde as tensões variam suavemente e outras onde o gradiente é intenso. Para reduzir o tamanho dos arquivos gerados para processamento, é comum dividir a peça em diferentes regiões de refinamento. Andrade et al. (2014) discretizaram suas amostras com elementos

quadráticos e três refinamentos de malha foram considerados. Já Phillips & Lagoudas (2018) utilizaram dois refinamentos de malha: um mais grosseiro nas regiões mais afastadas do entalhe e uma malha mais refinada próxima a seção reduzida. Para o presente trabalho, decidiu-se dividir a peça em 5 regiões com diferentes graus de refinamento. Esse refinamento foi determinado pelo processo iterativo, sendo considerado como “convergado” quando a diferença entre iterações atingiu valor menor que 0.1%. O refinamento das malhas não foi idêntico, sendo necessário ajustar para os diversos tamanhos do raio do entalhe. O *software* utilizado foi o Adina versão 7 e na geração da malha foram utilizados elementos do tipo Sólidos Axissimétricos 2-D, com 9 nós por elemento e 57592 elementos, em um total de 230605 nós.

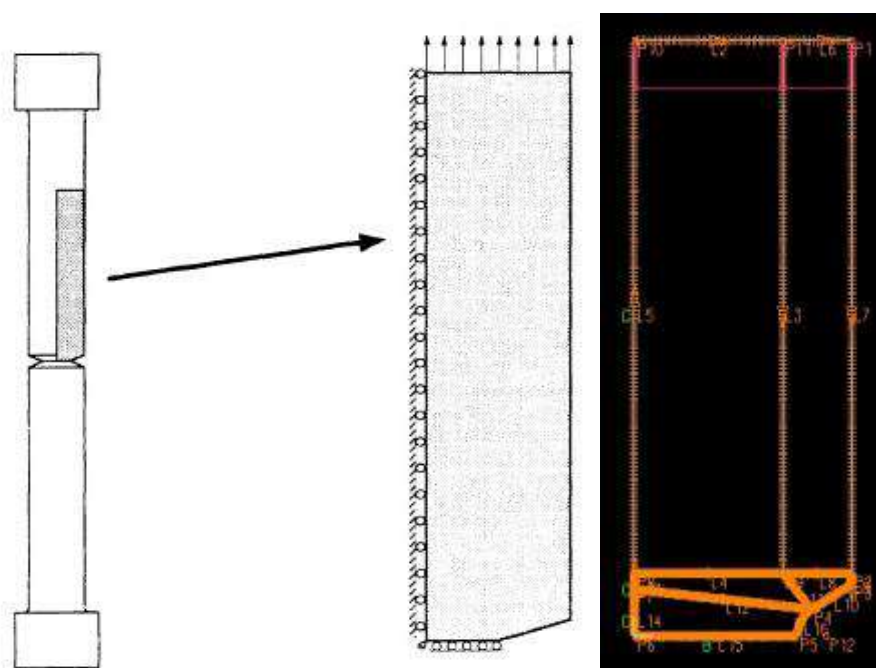


Figura 2 – Seção simulada pelo MEF

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS PARA SIMULAÇÃO

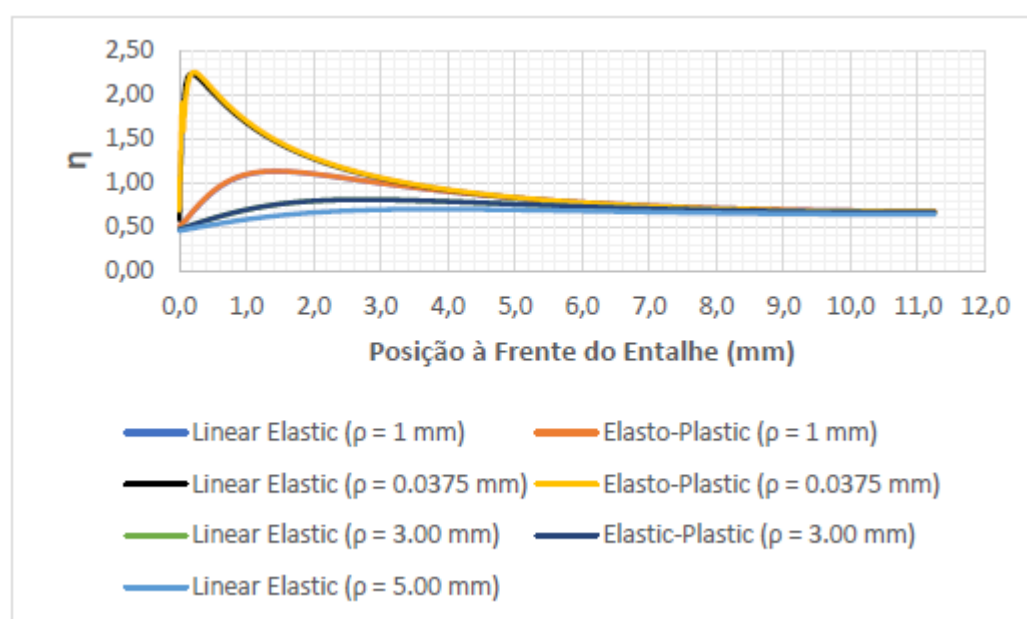
Os parâmetros foram obtidos pelos ensaios de tração e foram listados na Tabela 1. Os valores foram corrigidos (exceto $\sigma_{\max}$ e ν) devido à troca das lâminas de contato existentes no *clip-gage*. O procedimento é descrito no manual da Máquina Universal de Ensaio Instron 8852 (2016). O valor real do comprimento de medida é 25.34 mm e o sensor é programado para entender esse valor como sendo 25.00 mm.

Tabela 1 – Parâmetros do material usados na análise via MEF

Parâmetro	Valor	Valor Corrigido
Módulo de Elasticidade, E (GPa)	68	69
Tensão de Escoamento, σ_{esc} (MPa)	510	517
Tensão Máxima, σ_{max} (MPa)	590	590
Coefficiente de Poisson, ν	0.33	0.33

4.2 MEF E ÍNDICE DE TRIAXIALIDADE

O exemplo a seguir foi extraído de Simão & Carvalho (2023) onde os dados de falha de uma liga de alumínio AA7075-T6 foram obtidos por meio de testes de tração clássicos e a partir de corpos de prova cilíndricos entalhados. A Figura 1 apresenta esse caso, onde $a/R = 0.25$. Os raios estudados estão contidos nos limites dos raios simulados. Foram realizadas duas análises para cada raio de entalhe simulado, inicialmente sendo análise puramente elástica e depois elasto-plástica.

**Figura 1** – Resultado das simulações para relação geométrica $a/R = 0.25$.

Obsevou-se que o Índice de Triaxialidade não é significativamente afetado pela presença de uma zona plástica na raiz do entalhe. Apenas para o menor raio analisado ($\rho = 0.0375$ e $\rho/D = 0.00125$) houve uma variação perceptível no valor do índice de triaxialidade. Mesmo assim essa variação significou um aumento de 1% no valor do índice (η -elástico = 2.2365 e η -elastoplástico = 2.2599). Dessa forma, não se notou ganho de informação ao se adotar o modelo bilinear ou elasto-plástico em termos de acurácia.

Para um material dúctil com coeficiente de Poisson 0.3, Andrade et al. (2014) encontrou $\eta = 0.8$ para um caso de cilindro entalhado com $p = 4$ mm. Índices nessa ordem de grandeza foram encontrado neste trabalho para $p = 1, 3$ e 5 mm. O mesmo autor ressaltou que $\eta > 1/3$ são característicos de falhas em materiais dúcteis empregando a geometria trabalhada neste estudo: corpos cilíndricos com entalhes anelares.

Notou-se que conforme o raio do entalhe aumentou, o pico de triaxialidade se deslocou das proximidades do entalhe para o centro do cilindro. Logo, o raio mínimo necessário para provocar uma falha por fratura, deve ser aquele que move o pico de triaxialidade o mais próximo possível da raiz do entalhe. Por outro lado, para se induzir uma falha por ruptura, deve-se empregar no mínimo um raio que induza o valor máximo da triaxialidade no centro da peça. Na simulação apresentada na Figura 1, um lote de corpos de prova com raios na raiz do entalhe acima de cerca de 4.1 mm irá falhar por ruptura dúctil a partir do centro do cilindro. A evidência do controle sobre a triaxialidade exercido pela razão entre profundidade do entalhe e o raio da seção mínima nominal é apresentado na Figura 2. Apenas o raio menor (0.12 mm) apresentou pico de triaxialidade fora do centro da peça. Os dois raios maiores (0.64 e 1.30 mm) geraram triaxialidade máxima no centro da peça. Ao se comparar a Figura 1 ($a/R = 0.25$) com a Figura 2 ($a/R = 0.5$) notou-se que a profundidade maior do entalhe levou o pico de triaxialidade mais facilmente para centro da peça, porém para indução de falha por fratura, isto irá requerer raios cada vez menores. Assim sendo, é possível afirmar que para estudos sobre falha por ruptura dúctil, deve-se empregar um entalhe mais profundo, enquanto para os estudos sobre fratura, o entalhe deverá ser raso.

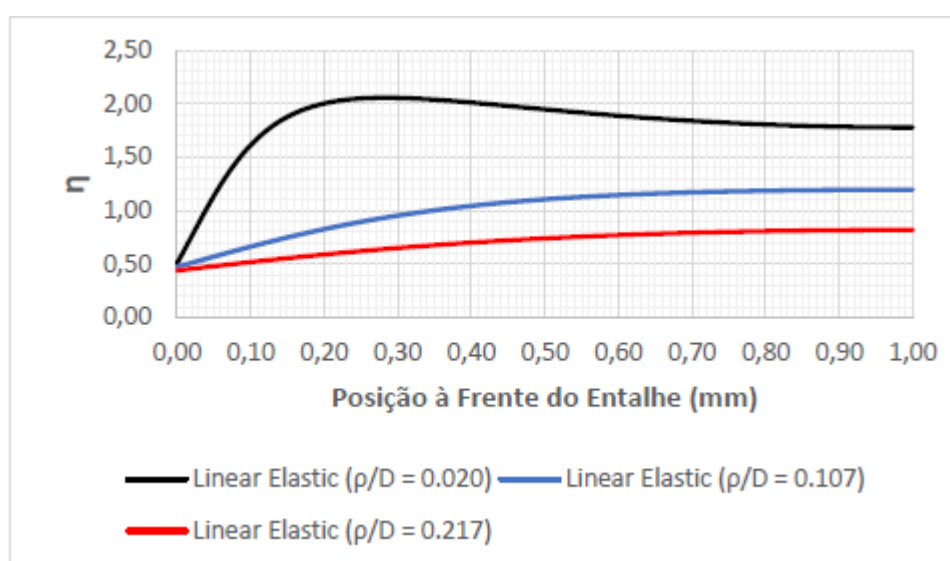


Figura 2 – Resultado das simulações para relação geométrica $a/R = 0.5$.

A presença de um pico de máxima triaxialidade fora do centro não é condição suficiente para garantir que a falha de um corpo de prova possa ser chamada de fratura, no sentido de ser capaz de determinar uma propriedade tal como K_{Ic} . O que será determinado é o K_Q (ASTM E1820, 2023). Esse deve então ser submetido a outros critérios para confirmar ou não sua validade como Tenacidade à Fratura (K_{Ic}). Nas regiões intermediárias da Figura 2, a falha é mista e as características locais do material definirão qual é o modo dominante. Dessa forma essa região intermediária não é recomendada para a realização de ambos os estudos.

A Figura 3 apresenta o caso onde um raio foi fixado ($\rho = 1 \text{ mm}$ e $\rho/D = 0.0167$) e a profundidade foi variada de $d/D = 0.1$ até 0.9 em entalhes em “U”. A tensão trativa empregada no modelo de MEF foi ajustada de forma que em todos os casos simulados a tensão nominal na seção resistente era a mesma, 100 MPa .

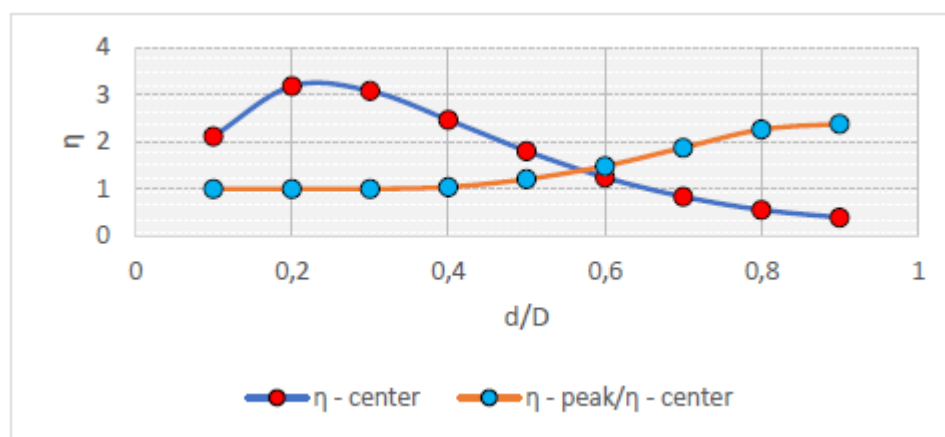


Figura 3 – Variação do Índice de Triaxialidade (η) no centro do cilindro (curva azul) e variação da razão η -peak/ η -center com a seção resistente (curva laranja).

Por meio do *curve-fitting*, obteve-se expressões matemáticas para os valores apresentados na Figura 3 e através do cálculo da derivada primeira pôde-se determinar os máximos de cada função. A partir disso tem-se que o Índice de Triaxialidade atingiu o valor máximo no centro do corpo de prova quando $d/D = 0.2334$, embora a falha pudesse ocorrer no centro da peça a partir de $d/D = 0.1$ até 0.4 . Em contrapartida, caso o desejado seja uma falha por fratura, o mínimo valor para d/D deve ser 0.5 . Nesse caso, o máximo é atingido quando $d/D = 0.8872$, porém, dada a natureza dos testes de fratura, a opção pode ser um valor situado entre 0.45 e 0.55 , que é uma solução de compromisso entre todos os parâmetros já citados. Assim sendo, o raio deverá ser reduzido.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS FATORES DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO, K_t

Os fatores de concentração de tensão, para as geometrias estudadas, foram determinados pela razão entre a tensão tangencial máxima na raiz do entalhe e a tensão nominal (Anderson, 2005) dominante na seção resistente. A Figura 4 apresenta a correlação visual entre os modelos de Elementos Finitos empregados neste trabalho e os valores das formulações de Peterson (Pilkey, 1997) e Neuber (1937) para verificação inicial da acurácia da modelagem acima descrita.

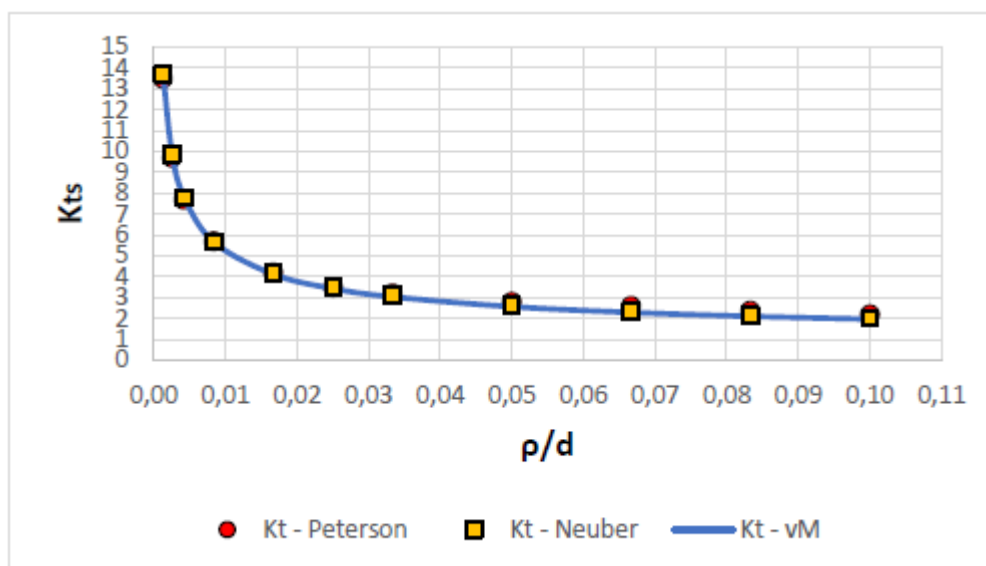


Figura 4 – Comparação entre os diversos valores de K_t obtidos por Peterson (círculo vermelho), Neuber (quadrados amarelos) e MEF (linha azul).

O caso estudado representa um conjunto $0.0013 \leq \rho/D \leq 0.1000$, onde ρ é um entalhe em “U” e D é o diâmetro da seção nominal. É possível perceber que a formulação de Neuber é a que mais se assemelha aos valores obtidos pelo MEF. Em média, os valores de Neuber diferem 2.90% dos valores numéricos, já os valores determinados pelo uso das formulações de Peterson apresentam diferença média de 5.67%. Ambos modelos apresentaram resultados conservadores em relação a análise por Elementos Finitos, mais uma vez confirmando o acerto de ambas. A natureza do material e a geometria do entalhe irão determinar se a falha se dará na região do concentrador de tensão (frágil, semifrágil ou dúctil que sofre fratura) ou na região central (falha dúctil).

4.4 DESLOCAMENTOS E K_I

Tada *et al.* (2000) apresentou uma relação para a abertura da boca de uma trinca (CMOD). Este trabalho simulou 11 geometrias já descritas para cada um dos 2 ângulos de abertura selecionados e

comparou os resultados para abertura do entalhe (NMOD) com a previsão de Tada para uma trinca. O CMOD (δ – Tada) é dado pela equação 11:

$$\delta_{Tada} = \frac{4(1-\nu^2)}{E} \sigma_{nom} a D \left(\frac{a}{R} \right) \quad (11)$$

Onde $D(a/R)$ é dado pela expressão 12:

$$D \left(\frac{a}{R} \right) = \frac{1}{\left(1 - \frac{a}{R}\right)^2} \left\{ 1.454 - 2.49 \left(\frac{a}{R} \right) + 1.155 \left(\frac{a}{R} \right)^2 \right\} \quad (12)$$

Primeiramente, é preciso comparar as previsões feitas pela expressão 11 com os valores obtidos pela análise de Elementos Finitos e estimar a região de validade dessa como capaz também de prever, com erro aceitável, o maior raio tolerável na raiz do entalhe. A comparação entre CMOD e NMOD (Notch Mouth Opening Displacement) foi feita para os dois tipos de entalhes, “U” e “V”, aqui abordados. Os valores que mais se aproximaram da igualdade foram $\rho = 0.25$ mm ($\Delta\% = -0.08\%$) para o entalhe em “U” e 0.50 mm para o entalhe em “V” ($\Delta\% = -0.19\%$). Porém, caso se arbitre que o limite tolerável é de $\pm 5.0\%$, qualquer raio menor ou igual a 1 mm (ΔU e $V\% = -3.23\%$) será aceitável.

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE AS FORMULAÇÕES

Uma vez provada a validade e correlação da equação 11 com NMOD, invoca-se a expressão para intensidade de tensões causadas por uma trinca radial externa:

$$K_I = \sigma_{nom} \sqrt{\pi a} F \left(\frac{a}{R} \right) \quad (13)$$

Combinada com (11), tem-se que:

$$K_I = \frac{E \delta \sqrt{\pi a} F \left(\frac{a}{R} \right)}{4(1-\nu^2) a D \left(\frac{a}{R} \right)} \quad (14)$$

Dessa forma é possível determinar K_{Ic} do material a partir da medida do NMOD usando um *clip-gage*.

4.6 RESULTADOS PARA UMA LIGA DE ALUMINIO AA7075-T6

Para verificação da validade das expressões acima apresentadas, na previsão de K_{Ic}, foram empregadas as proporções básicas utilizadas por Simão & Carvalho (2023). Os resultados da análise de elementos finitos também foram acoplados às expressões e para os seguintes dados hipotéticos,

tem-se que: $E = 64 \text{ GPa}$, $\nu = 0.33$, $R = 15.00$, $r = 11.25 \text{ mm}$, $\rho = 0.125 \text{ mm}$, $\delta\text{MEF ("U")} = 0.07917 \text{ mm}$, $\delta\text{MEF ("V")} = 0.07781 \text{ mm}$, $\sigma_{\text{net}} = 408.89$ $\sigma_{\text{esc}} = 574 \text{ MPa}$, $n_{\text{encrua}} = 70 \text{ MPa}$, $\sigma_{\text{nom}} = 230 \text{ MPa}$, $F(a/R) = 1.3139$, $D(a/R) = 1.6066$. Dessa forma, temos que:

Tabela 2 – Valores obtidos das diversas formulações

Expressão	Geometria	K_{Ic} (MPa $\sqrt{\text{m}}$)
14	Entalhe em "U"	33.6
14	Entalhe em "V"	33.1
13	Trinca	32.8
Cavalcante (2016)	Trinca	32.0

Pôde-se notar pelas simulações que as três formulações indicam resultados semelhantes com os obtidos por Cavalcante (2016) que determinou K_{Ic} por meio de ensaio normatizado segundo a ASTM E399 para a mesma liga e condições de tratamento térmico utilizados neste trabalho.

CONCLUSÕES

Este trabalho buscou criar ferramentas numéricas que permitam fazer a seleção dos parâmetros geométricos para fabricação de corpos de prova otimizados para o estudo de um mecanismo de falha específico, a partir de um corpo de prova cilíndrico e entalhado. Nesse ínterim, observou-se que a determinação de parâmetros iniciais para análise empregando MEF é obtida através de ensaios de tração convencionais cujo *curve-fitting* fornece os valores buscados. Para a liga de alumínio AA7075-T6, usada como exemplo, tanto o modelo de Ramberg-Osgood quanto o proposto do Eurocode-9 revelaram-se bastante satisfatórios.

O emprego do MEF permitiu determinar para os casos apresentados a melhor combinação entre raio e profundidade do entalhe. Para estudos de ruptura dúctil, na qual a falha se inicia no centro do corpo de prova, deve-se optar por grandes profundidades ($a/R \geq 0.7$) e raios maiores ($\rho/D \geq 0.217$). Para casos onde se deseja avaliar parâmetros de fratura, o inverso ocorre e recomenda-se trabalhar com entalhes rasos ($a/R \leq 0.25$) e raios pequenos ($\rho/D \leq 0.00417$). Como normalmente se tem capacidade limitada de produzir raios pequenos, recomenda-se produzir o menor raio possível, medi-lo e então determinar a profundidade ótima de teste.

Ao longo do estudo, chegou-se à conclusão de que o emprego de modelos bilineares ou elasto-plásticos não aumentam a acurácia das análises, já que a variação é mínima e é só sentida nos menores

raios analisados. Essas análises numéricas também permitem determinar o p mínimo para as geometrias disponíveis.

Como forma de avaliar a qualidade das predições feitas via MEF foi estabelecida a comparação com os valores previstos por Neuber e Peterson. Os resultados obtidos apresentaram concordância na faixa de 2.9% para Neuber e 5.7% para Peterson. Considerou-se ambas diferenças aceitáveis, sendo Neuber o que mais concorda com a análise MEF.

O desenvolvimento de uma série de formulações tendo como base o trabalho de Tada e Anderson permitiu o emprego dos valores de NMOD para avaliação de propriedades de fratura como K_{Ic} . A análise MEF comprovou isso, bem como permitiu que os valores assim obtidos sejam conjugados com outros critérios de forma a se confirmar a validade dos resultados.

Por fim, pôde-se concluir que as duas formulações apresentadas e empregadas para determinação de K_I são válidas e apresentaram resultados com variação média de 0.1% entre seus extremos.

REFERÊNCIAS

- Tada H.; Paris P.C.; Irwin, G.R. (2000), "The Stress Analysis of Cracks Handbook", ASME Press, Nova York;
- Anderson T.L. (2005), "Fracture Mechanics", 3ª ed., CRC Press, Boca Raton;
- Andrade, F.X.C.; Sá, J.M.A.C.; Pires, F.M. (2014), Assesment and comparison of non-local integral models for ductile damage. *International Journal of Damage Mechanics*, 23(2), 261-296;
- Bao Y.; Wierzbicki T. (2004), On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46, 81-98;
- American Society for Testing and Materials (2023), E1820-23a: Standard Test for Measurement of Fracture Toughness, ASTM International, United States;
- Mackenzie A.C.; Hancock J.W.; Brown D.K. (1977), On the Influence of State of Stress on Ductile Initiation in High Strength Steels. *Eng. Fract. Mech.*, 9, 167-188;
- Li T. (2017), Fracture Strain of Gun Steel for Ultra-High-Pressure Vessels Considering Triaxiality Effect. *Advances in Mechanical Engineering*, 9, 1-13;
- Powers B.M. (2019), Evaluation of the Bridgman Analysis for Notched Tension Specimens, Army Research Laboratories, Maryland, United States;
- Bridgman P.W. (1952), "Studies in Large Plastic Flow and Fracture with Special Emphasis on the Effects of Hydrostatic Pressure", 1ª ed., McGraw-Hill, New York;
- Choung J.M.; Cho S.R. (2008), Study on True Stress Correction from Tensile Tests. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22, 1039-1051;
- Tu S.; Ren X.; He J.; Zhang Z. (2019), Stress–strain curves of metallic materials and post-necking strain hardening characterization: A review. *Fatigue Fract Eng Mater Struct.*, 43, 1-17;
- The European Union (2007), Eurocode 9: Design of aluminium structures;
- Zhao J.; Kontsevoi O.Y.; Xiong W.; Smith J. (2017), Simulation-aided constitutive law development – Assessment of low triaxiality void nucleation models via extended finite element method. *J. Mechanics and Physics of Solids*, 102, 30-45;
- Pilkey W.D. (1997), Peterson's Stress Concentration Factors, Wiley, New York;
- Neuber H. (1937), "Theory of Notch Stresses", traduzido do alemão por Taylor D. (1946), F.A. Raven, U.S. Navy;
- Ramberg W.; Osgood W.R. (1943), Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters. National Advisory Comitee for Aeronautics, Washington, DC;
- Yun X.; Zhongxing W.; Gardner L. (2021), Full-Range Stress–Strain Curves for Aluminum Alloys. *Journal of Structural Engineering*, 147, 1-15;

Kujawski D.; Patwardhana P.S.; Nalavdea R.A. (2020), An estimation of true Ramberg-Osgood curve parameters for materials with and without Luder's strain using yield and ultimate strengths. *Fatigue & Fracture Eng. Matl. Strucut.*, 43, 2147-2156;

Gadamchetty G.; Pandey A.; Gawture M. (2016), On Practical Implementation of the Ramberg-Osgood Model for FE Simulation. *SAE Int. J. Materials and Manufacturing*, 9, 200-205;

Wierzbicki T.; Xue L. (2005), On the Effect of the Third Invariant of the Stress Deviator on Ductile Fracture. *Impact and Crashworthiness Lab.*, Cambridge;

Liu, X.; Yan, S.; Rasmussen, K. J. R.; Deierlein, G. G. (2022), Verification of void growth-based exponential damage function for ductile crack initiation over the full range of stress triaxialities. *Engineering Fracture Mechanics*, 269;

Yang, X.; Guo, Y.; Li, Y. (2023), A new ductile failure criterion with stress triaxiality and Lode dependence. *Engineering Fracture Mechanics*;

Phillips, R. F.; Lagoudas, C. D. (2018), Effect of stress redistribution during thermal actuation of shape memory alloys in notched bars. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 29(10), 2149-2163;

American Society for Testing and Materials (2022), E8-22, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, United States;

Simão, L.G. (2019), Estudo sobre a previsão de falha de uma liga de alumínio 7075 envelhecido artificialmente. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes;

Derpenski, L. (2019), Ductile Fracture Behavior of Notched Aluminum Alloy Specimens under Complex Non-Proportional Load. *MDPI*;

Instron (2016), Instron Reference Manual 2630-100 Series Clip-On Extensometer, Illinois Tool Works, United States;

Simão, L.G.; Carvalho E.A. (2023), K_{Ic} Determination of a 7075 T6 Aluminum Alloy by Critical Distances Theory and LEFM. *Materials Research*, 26, 1-8.

Cavalcante, F.F. (2016), Comportamento mecânico e tenacidade à fratura de ligas de alumínio 2024 e 7075 submetidas a diferentes tempos de envelhecimento. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte;

American Society for Testing and Materials (2022), E399-22, Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, ASTM International, United States.

Capítulo 4



10.37423/250309815

A BRIEF REVIEW ON HARDNESS PREDICTION OF MULTICOMPONENT ALLOYS

Raphael Basilio Pires Nonato

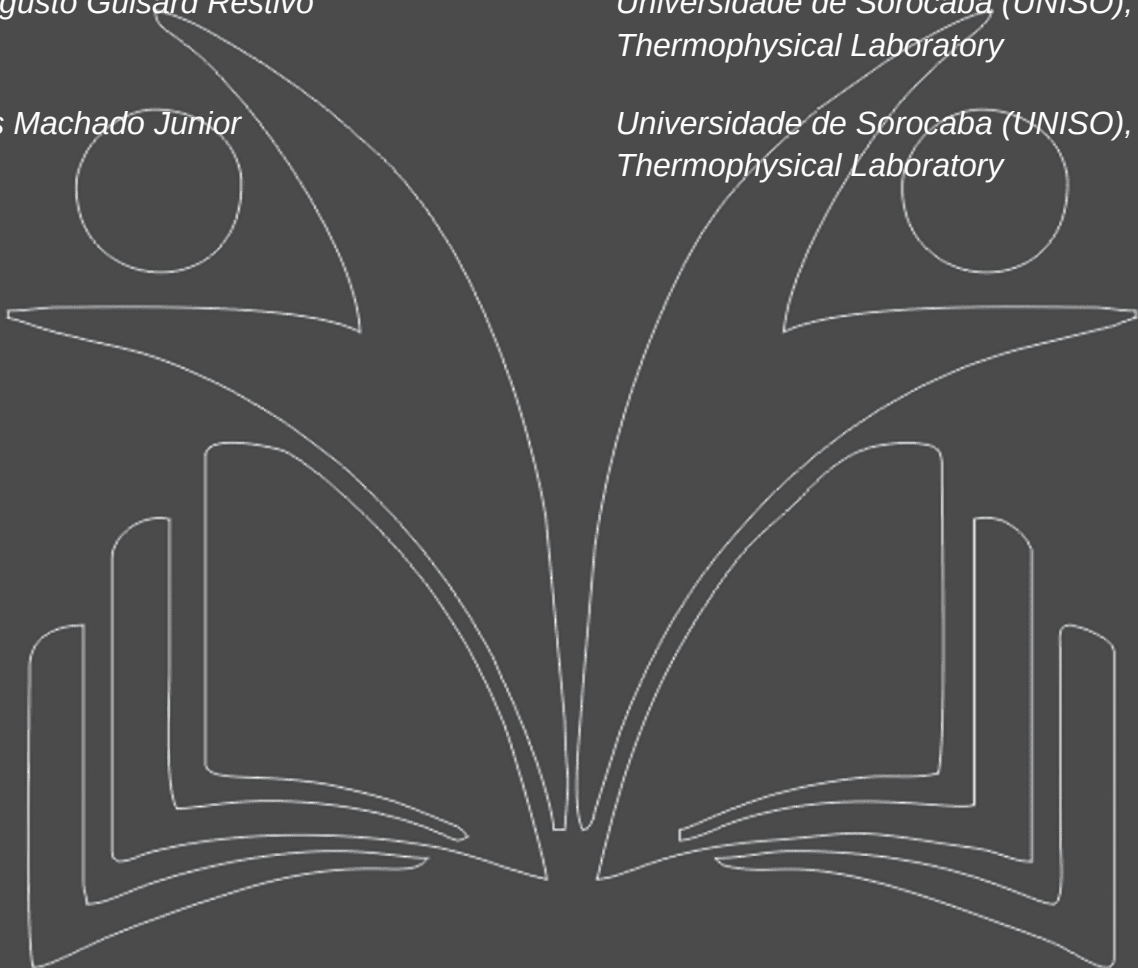
*Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC),
Chapecó*

Thomaz Augusto Guisard Restivo

*Universidade de Sorocaba (UNISO),
Thermophysical Laboratory*

José Carlos Machado Junior

*Universidade de Sorocaba (UNISO),
Thermophysical Laboratory*



Abstract: *The requisite of hardness prediction is increasingly being demanded for materials in general. In view of the vast universe of possible multicomponent alloys, this requisite is even more evident due to the inefficiency of trial-and-error approach. Therefore, this paper presents a brief review on hardness prediction of multicomponent alloys, highlighting the motivation on the subject, recent advances, and possible trends. The bibliographic and bibliometric research were presented in the introduction section. The following sections address the recent progress in this research field, and its background. Thenceforth, a discussion about the potential of this research field is conducted, showing possible related opportunities and trends. Finally, the conclusions are presented.*

Keywords: Hardness, Hardness prediction, Multicomponent alloys, Alloy design.

1 INTRODUCTION

The requirement for enhanced material properties is an ever-growing demand throughout the ages (Nonato *et al.*, 2025). The body of knowledge associated with discoveries in materials area accelerated the development of new materials to fulfill some of the existing requirements. However, much more is yet to be done to increase the capacity to attend the whole sort of needs.

In what refers to materials design, mechanical properties issue is markedly one of its main drivers because in many cases the material is tailored aiming at reaching the properties to accomplish specific tasks (Callister Junior & Rethwisch, 2020).

Under this perspective, the constituent elements of the material, the molar fraction of each element, and the sequence of manufacturing processes affect the microstructure, which impacts the mechanical properties (Restivo *et al.*, 2023). The category of metals is constituted of one or more metals and/or non-metals. Consequently, metals can be split into two major categories: (a) pure metals (one metallic element only); and (b) metal alloys (with at least one metallic element, being a blend of two or more metals and/or non-metals). Considering the limitations of the properties of the pure metals, metal alloys have been introduced as a possible solution by broadening the current properties limits. In other words, the mechanical properties of pure metals can be improved by constituting alloys with other metals and/or non-metals (Razuan *et al.*, 2013). Within the category of alloys, the classification of conventional alloys refers to a maximum of two alloying elements (Shun *et al.*, 2012).

Within the branch of conventional alloys, the principal metal mainly dictates the core properties while having some modified features. To improve the alloy properties, a wide variety of possible combinations of elements can be tested. Among the properties to be improved, some can be mentioned: hardness, ductility, fracture toughness, thermal stability, density, and others. Even though the information related to conventional alloys is relatively more available (mainly by well-defined phase diagrams, and performed experiments), there are certain thresholds in properties that limit their application (Restivo & Restivo, 2021).

Stretched ranges of properties were then reached when the so-called multicomponent alloys (MAs) were created. The MAs address three or more main alloying elements. Consequently, MAs made possible the improvement of materials performance in current applications, and probable new ones. MAs may form solid solutions, metallic glasses, elemental phases or intermetallic compounds. As well

as these microstructures can be predicted through simulation/calculation to prevent unnecessary expenditure with experiments, so can the properties. MAs are commonly classified according to their configurational entropy: (a) low-entropy alloys (LEAs); (b) medium-entropy alloys (MEAs); and (c) high-entropy alloys (HEAs) (Nonato & Restivo, 2024).

HEAs correspond to the most reported category in research due to the higher number of combination possibilities, which implies wider ranges of properties values. The reason for this vast universe of possible combinations comes from their definition. HEAs are based on at least 5 up to 13 major elements (with molar fraction range from 5 to 35% for each element), in addition to minor elements (molar fractions lower than 5%). The effects from high entropy in solidification process contribute to developing random solid solutions, which are advantageous in manufacturing and application.

In what refers to alloy design, four main strategies are commonly applied: (a) CALPHAD, calculation phase diagrams (Zhang *et al.*, 2012) (Zhang *et al.*, 2014); (b) parametric approach, which employs criteria and parameters to predict solid solution formation (Nonato *et al.*, 2024) (Nonato *et al.*, 2025); (c) ML, machine learning, which is a technique applied to predict properties of the materials via simulation software (Butler *et al.*, 2018); and (d) MD, molecular dynamics, which consists of computer simulations that analyze the physical movements of atoms/molecules over time, aiming at checking the dynamic behavior of molecular systems and their interactions (Gao & Alman, 2013) (Xie *et al.*, 2013).

CALPHAD, the former approach, refers to the existing phase diagrams of alloys in thermal equilibrium which present the possible phase transformations based on pressure, temperature, and composition (Li *et al.*, 2020). The research on solidification and crystal formation is mainly based on these diagrams. The governing principle refers to the minimization of the total Gibbs free energy. Thermodynamic data based on available binary and ternary combinations is the background of CALPHAD. In view of the lack of information about some possible combinations, the most evident drawback is the need for large design spaces, which is costly for the mathematical model.

The second approach, parametric, employs the calculation of parameters and verification of criteria that intends to predict the solid solution formation (Nonato & Restivo, 2022) (Nonato & Restivo, 2023). The 29 already reported parameters are backgrounded in quantum physical laws. Each applied research presents a distinct combination of parameters, according to the proposed scope of work. Furthermore, each set of elements may result in a unique prediction, according to the alloy being designed. In consideration of the difficulty in selecting the most adequate combination of parameters

and criteria to a certain design case, the most reported are frequently applied. The high prediction capability is allied with the needless experimental data (Ikeda *et al.*, 2019). Despite that, as one of the greatest drawbacks, a high computational capacity is required to scan the large alloy design space.

The third approach, machine learning, deals with simulations of possible solutions (via statistical techniques) in the alloy design space. Phases, microstructures, and/or properties can be simulated by means of support vector machines (SVMs), artificial neural networks (ANNs), decision trees (DTs), among others (Yang *et al.*, 2022). In this approach, the quality of experimental input data induces prediction accuracy. The accuracy is directly proportional to the number of variables involved. However, higher accuracy implies a higher computational cost. The efficiency of machine learning can be improved if statistically dependent variables (with considerable magnitudes of correlation coefficients) are left in terms of one that represents them.

Molecular dynamics, MD, addresses a tool set to simulate the properties of the proposed alloys. An MD box defines the initial velocities and positions, pressure, boundary conditions, and temperature (Zhou & Liu, 2022). The trajectory of each atom is modeled by Newton's equations of motion when the system achieves the thermal equilibrium stage. The defects and nucleation in lattice are then predicted through the simulated trajectory of the atom (Car *et al.*, 2005). In addition, specific boundary conditions can be imposed on the deformation mechanisms. Furthermore, the relationship between the stacking fault energy and the deformation mechanisms can be established. Although MD simulations correspond to a high computational cost, the time spent may compensate for the accuracy achieved.

The four approaches just described aids in the prediction process since they are directed towards that purpose. The prediction intends at least to prevent unnecessary and/or expensive experiments. In the process of hardness prediction, there are cases where the prediction of the microstructure plays the most important role. However, there are situations in which it is not even necessary to know the microstructure, just the measured hardness of the material sample, for example. Therefore, the next section presents a brief state of the art on hardness prediction, highlighting the discoveries, methodology, and results reported.

STATE OF THE ART ON HARDNESS PREDICTION OF MULTICOMPONENT ALLOYS

Refractory multicomponent alloys (RMCAs) have great potential to stretch the limits for application in high temperature conditions. However, traditional alloy design lacks a robust methodology to predict

the properties of these alloys. Therefore, a design framework that combines ML, CALPHAD, and experiments was developed to the design of six MoNbW BCC alloys by means of the conditional generative adversarial network and manufactured via arc melting. An accurate hardness prediction in the range of 5-6 GPa is reached through a loop between the ML model and the experiments (Li *et al.*, 2024).

There is relative difficulty in hardening Al-Mg alloys via trial-and-error experimentation because of the possible variations in extensive composition and aging conditions. Therefore, ML techniques were proposed to enhance the performance of Al-Mg-X (X = Cu, Zn, etc.) alloys, in which composition, and conditions under which aging occurs, some properties (including hardness) were compiled. Seven distinct ML algorithms were trained based on the referred datasets to predict these alloys with improved hardness. The prediction proved to be effective, when compared to other ML approaches (Jain *et al.*, 2024).

Refractory high-entropy alloys (RHEAs) HfNbTaZr, NbMoTaW, MoNbTaVW, Nb₄₀Ti₂₅Al₁₅V₁₀Ta₅Hf₃W₂, Re_{0.1}Hf_{0.25}NbTaW_{0.4}, Ti_xNbMoTaW (x = 0, 0.25, 0.5, 0.75 and 1), and 3d transition metal HEA Al_{10.3}Co₁₇Cr_{7.5}Fe₉Ni_{48.6}Ti_{5.8}Ta_{0.6}Mo_{0.8}W_{0.4} were proved to be designed to withstand more in high-temperature engine components. However, the most evident drawback of these alloys refers to the utilization of the critical raw materials (CRMs), for example, Hf, Nb, Ta, W, etc. Therefore, a prediction of multicomponent alloys without CRMs (while keeping the hardness levels of the CRMs-containing alloys) is performed via ML model using Thermo-Calc 2024a software. Extra Trees Regressor (ETR) ML model associated with metaheuristic optimization techniques has proven to be the most effective to identify the new alloys. The Ti_{0.01111}NiFe_{0.4}Cu_{0.4} (488 HV) alloy was proposed in substitution to CoCrFeNb_{0.309}Ni (480 HV). The validation of the computational results was made through the experimental synthesis of FCC Al_{6.25}Cu_{18.75}Fe₂₅Co₂₅Ni₂₅. ML and Thermo-Calc predictions of the hardness were compared to the hardness measurements of the samples, showing good agreement between them (Singhi *et al.*, 2025).

High-entropy ceramic coatings are recommended for situations where wear resistance, thermal stability, and corrosion resistance are required. Five or more distinct metal elements are used in the composition of these coatings, which induces complexity in composition. The conjunction of ML and high-throughput experimental methods were the basis to design ultra-hard high-entropy ceramic coatings in a short time. The hardness prediction of coatings is made via random forest algorithm based on processing parameters and composition. Thenceforth, the uncertainty in ML prediction is

reduced by means of active learning. Three iterations were needed to prepare the coating (AlCrNbTaTi)N with a hardness of 40.1 GPa, which is 9% higher than the original alloy. Therefore, this framework accelerated the optimized design of these alloys (Xu *et al.*, 2022).

The interaction of the elements in multicomponent superalloys and the restricted requirement for properties is a challenge in the design of these types of alloys. Thenceforth, a combination of ML models and diffusion multiples is employed to design γ' -strengthened Co-based superalloys with well-balanced properties with more than seven elements. Two types of 9-element alloys are designed out for industrial and aeroengine gas turbine blades based on six- and seven-elements database. The proposed method was proved to be more effective than the CALPHAD in predicting the γ' solvus temperature and phase constituent of the 9-elements multicomponent alloys in the case data related to 6- to 7-multicomponent alloys data were provided. In addition, the hardness and oxidation resistance of polycrystal superalloys are tested, besides the compressive strength of single-crystal superalloys. Prediction process is benefited from the expansion of the compositional range and supplementation of the interaction of data (Lu *et al.*, 2023).

A neural network model is applied to predict the hardness of the RHEA $\text{Co}_{0.1}\text{Cr}_3\text{Mo}_{11.9}\text{Nb}_{20}\text{Re}_{15}\text{Ta}_{30}\text{W}_{20}$ and other alloys. The values of hardness obtained were validated via available experimental data. The proposed model has proved to be an alternative to Vickers hardness measurements (Bhandari *et al.*, 2021).

HEAs have been increasingly fabricated by laser additive manufacturing because of their outstanding properties. Although the processing route plays an important role in the obtainment of the tailored properties, ML models does not clearly distinguish the manufacturing history and its impact on the dataset used to predict the properties. Therefore, the proposed deep neural network architecture includes the manufacturing routes of HEAs as input data. Laser additive manufacturing and as-cast are the proposed manufacturing routes for the ML model, which are transformed into an encoder to provide a more accurate prediction. Some data samples are obtained by conditional generative adversarial networks with a distribution similar to that of the original data. This complimentary data was created to mitigate the lack of original data. The mean absolute error value was around 27% lower than that of traditional neural networks. In view of this, the research provides an alternative method to design HEAs suitable for laser additive manufacturing (Zhu *et al.*, 2023).

To produce relevant results in terms of prediction using ML models, the input datasets must be informational-rich. Therefore, a periodic table representation of physical parameters, processing,

structure, and composition is introduced and tested for hardness prediction of HEAs. The performance of the model based on convolutional neural network was demonstrated via hardness prediction, hardness classification, and alloy system extrapolation. The addition of five possible phases to the model has shown to improve the results of hardness prediction. Furthermore, the accuracy and stability of hardness prediction is improved by using the stacking method. In order to compare the models, the Diebold-Mariano test is performed. The results demonstrated that the improvement in the prediction capacity is statistically reliable (Li *et al.* 2023).

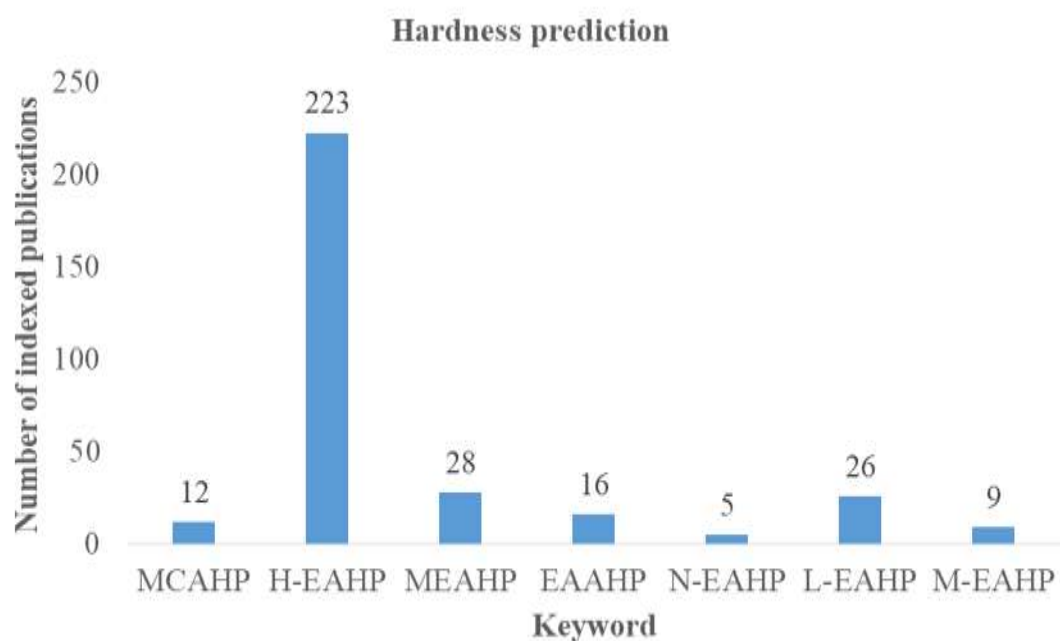
DISCUSSION

This section refers to possible trends and opportunities in the research field of hardness prediction of multicomponent metal alloys based on the bibliometric research performed and on the behavior of the collected data.

To verify the importance of the research words and identify eventual research gaps and opportunities to contribute to the area, the following bibliometric research was performed, which yielded in the next two figures (Fig. 1 and Fig. 2). All plots encompass the entire available registered period (from the first publication up to the date of this publication) and refer to the number of indexed publications corresponding to the keyword in CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, 2025) information repository.

The research words in Fig. 1 are: “multicomponent alloy hardness prediction” (MCAHP), “high-entropy alloy hardness prediction” (H-EAHP), “multielement alloy hardness prediction” (MEAHP), “equiatomic alloy hardness prediction” (EAAHP), “non-equiatomic alloy hardness prediction” (N-EAHP), “low-entropy alloy hardness prediction”, (L-EAHP), and medium-entropy alloy hardness prediction” (M-EAHP).

Figure 1: Number of indexed publications *versus* keywords in the abstract or title fields for hardness prediction.

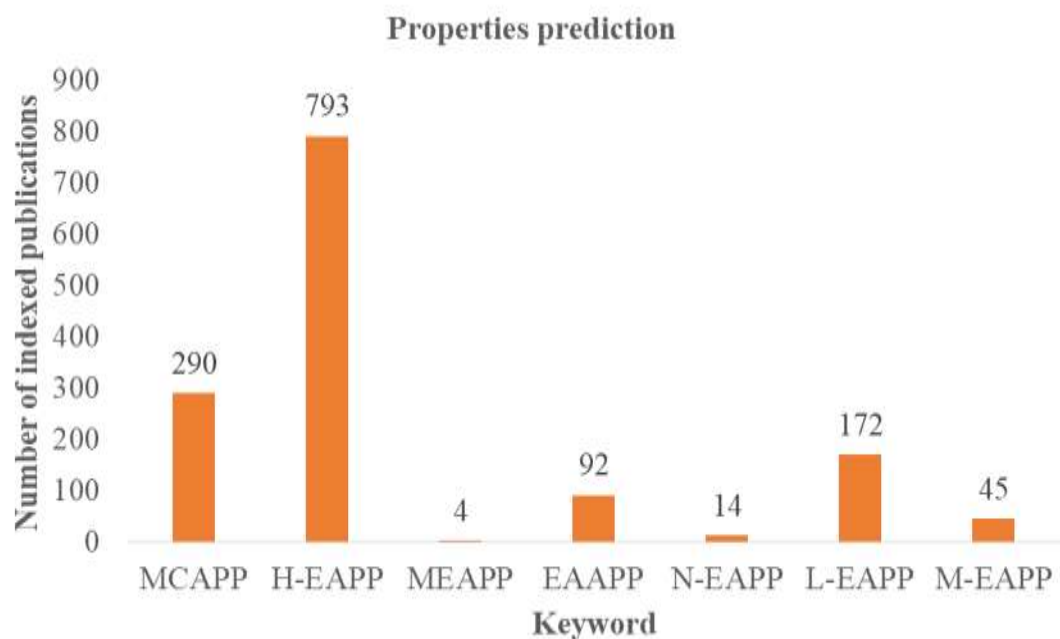


Source: CAPES, 2025.

According to Fig. 1, the greatest part of research on hardness prediction is conducted in the scope of HEAs (H-EAHP) (70% of the total), followed by the multielement alloys denomination (MEAHP) (8.8% of the total). The total number of indexed publications on hardness prediction reaches 319. The least explored nomenclature on hardness prediction corresponds to non-equiatomic alloys (N-EAHP), representing only 1.6%. The term entropy is the most explored, as observed for high-, medium-, and low-entropy alloys altogether representing almost 81% of the research on hardness prediction. Therefore, for example, in the case of publication on hardness prediction of non-equiatomic alloys (N-EAHP), this nomenclature is scarcely applied in title and abstract fields. This may be an advantage because the work can be more promptly found and cited. On the other hand, as this nomenclature is less used in the mentioned research fields, there is more risk of not being even found.

The research words in Fig. 2 are: “multicomponent alloy properties prediction” (MCAPP), “high-entropy alloy properties prediction” (H-EAPP), “multielement alloy properties prediction” (MEAPP), “equiatomic alloy properties prediction” (EAAPP), “non-equiatomic alloy properties prediction” (N-EAPP), “low-entropy alloy properties prediction”, (L-EAPP), and medium-entropy alloy properties prediction” (M-EAPP).

Figure 2: Number of indexed publications *versus* keywords in the abstract or title fields for properties prediction.



Source: CAPES, 2025.

As presented in Fig. 2, the most representative part of research on properties prediction is performed in the subject of HEAs (H-EAPP) (56.2% of the total). The second most important is the multicomponent alloys denomination (MCAPP) (20.6% of the total). The total number of indexed publications on properties prediction corresponds to 1410. The least explored denomination on properties prediction corresponds to multielement alloys (MEAPP), representing only 0.3%. The term entropy is the most addressed: high-, medium-, and low-entropy alloys together represent about 71.6% of the research conducted on properties prediction. As a result, in the case of publication on properties prediction of multielement alloys (MEAPP), this denomination is rarely found in title and abstract fields. From a beneficial perspective, the published work can be more directly found and possibly receive citations. However, as this denomination is rarely applied in the aforementioned research fields, there is a greater risk of not even being found.

CONCLUSIONS

This paper presented a brief review on hardness prediction on multicomponent metal alloys. A brief presentation of the state of the art in this research area was reported. In addition, the progress undertaken, trends, and opportunities. As shown, the fundamental background addresses the

configurational entropy of formation of these alloys, the molar fraction of each alloying element, and the selected processing route.

The definition of multicomponent metal alloys was addressed, and the prediction of hardness was explored as a research field. Different methodologies were applied to predict the hardness of these alloys, but predominantly machine learning as the core method. In several cases, machine learning was associated with at least one technique to improve accuracy, reduce the time to accomplish the computational routine, and explore most of the possibilities in the vast design space.

The number of indexed publications from CAPES until the publication date of this paper was reported, corresponding to the most probable research terms related to hardness prediction, and properties prediction, allowing the analysis of trends, opportunities, possibilities, and perspectives of each research word. According to the data presented and discussed in this paper, despite the low number of published works because of its intrinsic specificity, this research area is yet in its infant stage in the context that it is within one of the most promising research fields: multicomponent alloys. Therefore, hardness prediction of multicomponent alloys has proven to have a great potential for growth due to its vast universe of possible combinations of alloying elements to achieve a wider range of hardness

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would acknowledge the book organizers for the opportunity to share this work. The authors also acknowledge the research councils CNPq (proj. 408406/2021-6), CatalisaICT Sebrae (proj. 29083*128) and FAPESP (proj. 2023/09818-8) for financial support.

REFERENCES

- Bhandari, U.; Zhang, C.; Zeng, C.; Guo, S.; Adhikari, A.; Yang, S. (2021), Deep learning-based hardness prediction of novel refractory high-entropy alloys with experimental validation. *Crystals*, 11, 46. <https://doi.org/10.3390/cryst11010046>.
- Butler, K.T.; Davies, D.W.; Cartwright, H.; Isayev, O.; Walsh, A. (2018), Machine learning for molecular and materials science. *Nature*, 559, 547-555. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0337-2>.
- Callister Junior, W.D.; Rethwisch, D.G. (2020), "Callister's Materials Science and Engineering", 10 ed., Wiley, Hoboken.
- Car, R.; De Angelis, F.; Giannozzi, P.; Marzari, N. (2005), First-principles molecular dynamics. In: Yip S, editor. *Handbook of Materials Modeling*, Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3286-8_5.
- Gao, M.C.; Alman, D.E. (2013), Searching for next single-phase high-entropy alloy compositions. *Entropy*, 15, 4504-4519. <http://dx.doi.org/10.3390/e15104504>.
- Ikeda, Y.; Grabowski, B.; Körmann, F. (2019), Ab initio phase stabilities and mechanical properties of multicomponent alloys: a comprehensive review for high entropy alloys and compositionally complex alloys. *Mater Charact*, 147, 464-511. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.06.019>.
- Jain, S.; Jain, R.; Dewangan, S.; Bhowmik, A. (2024), A machine learning perspective on hardness prediction in multicomponent Al-Mg based lightweight alloy. *Materials Letters*, 365:136473, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136473>.
- Li, R.; Xie, L.; Wang, W.Y.; Liaw, P.K.; Zhang, Y. (2020), High-throughput calculations for high-entropy alloys: a brief review. *Front Mater.*, 7, 290, 1-12. <http://dx.doi.org/10.3389/fmats.2020.00290>.
- Li, S.; Li, S.; Liu, D.; Yang, J.; Zhang, M. (2023), Hardness prediction of high entropy alloys with periodic table representation of composition, processing, structure, and physical parameters. *Journal of Alloys and Compounds*, 967:171735. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171735>.
- Li, W.; Raman, L.; Debnath, A.; Ahn, M.; Lin, S.; Krajewsky, A.M.; Shang, S.; Priya, S.; Reinhart, W.F.; Liu, Z.-K.; Beese, A.L. 2024, Design and validation of refractory alloys using machine learning, CALPHAD, and experiments. *International Journal of Refractory and Hard Materials*, 121:106673. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2024.106673>.
- Lu, S.; Zou, M.; Zhang, X.; Antonov, S.; Li, W.; Li, L.; Feng, Q. (2023), Data-driven cross-component design and optimization of γ' -strengthened Co-based superalloys. *Advanced Engineering Materials*, 25:2201257. <https://doi.org/10.1002/adem.202201257>.
- Nonato, R.B.P.; Restivo, T.A.G. (2022), Software Solution for Ultra-hard Metal Alloy Design. *Engenharia, Gestão e Inovação*. 1ed. Belo Horizonte: Editora Poisson, 3, 179-187.
- Nonato, R.B.P.; Restivo, T.A.G. (2023), A multiparametric and multicriteria software to evaluate the design of ultra-hard metal alloys. In: Reinaldo Cardoso; João Batista Quintela. (Org.). *Open Science Research X*. 1ed. Guarujá: Científica Digital, 1, 1464-1483.

Nonato, R.B.P.; Restivo, T.A.G. (2024), A short review on high-entropy alloys (HEAs). In: V Seven International Multidisciplinary Congress, Seven publicações, Itupeva.

Nonato, R.B.P.; Restivo, T.A.G.; Machado Junior, J.C. (2024), Optimization of density and cost in the prediction of solid solution formation of multicomponent metal alloys. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, 22, e7087. <https://doi.org/10.55905/oelv22n10-068>.

Nonato, R.B.P.; Restivo, T.A.G.; Machado Junior, J.C. (2025), Uncertainty quantification in masses of alloy components and atomic radii modification in high-entropy alloys design: thermophysical parameters calculation approach. *Materials Research*, 28, 1-16. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2024-0350>.

Razuan, R.; Jani, N.A.; Harun, M.K.; Talari, M.K. (2013), Microstructure and hardness properties investigation of Ti and Nb added FeNiAlCuCrTi_xNb_y high entropy alloys. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 66, 4, 309-312. <https://doi.org/10.1007/s12666-013-0265-7>.

Restivo, T.A.G.; Nonato, R.B.P.; Figueira, R.R.; Ferreira, O.A.; Padovani, C.; Aranha, N.; Baldo, D.; Silva, C.G.; Durazzo, M. (2023), Sintering of metallic diamond alloy powders. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12260-8>.

Restivo, T.A.G.; Restivo, G.M.G. Development of ultra-hard multicomponent alloys. *Journal of Materials Research*, 1-12, 2021. <http://dx.doi.org/10.1557/s43578-021-00195-5>.

Shun, T.-T.; Chang, L.-Y.; Shiu, M.-H. (2012), Microstructures and mechanical properties of multiprincipal component CoCrFeNiTi_x alloys. *Materials Science & Engineering A*, 556, 170-174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.075>.

Singhi, S.; Bai, M.; Matthews, A.; Goel, S.; Joshi, S.N. (2025), Critical raw material-free multiprincipal alloy design for a net-zero future. *Scientific Reports*, 15:3132, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87784-0>.

Xie, L.; Brault, P.; Thomann, A.-L.; Bauchire, J.-M. (2013), AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy cluster growth and annealing on silicon: A classical molecular dynamics simulation study. *Applied Surface Science*, 285P, 810-816. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.08.133>.

Xu, X.; Wang, X.; Wu, S.; Yan, L.; Guo, T.; Gao, K.; Pang, X.; Volinsky, A.A. (2022), Design of super-hard high-entropy ceramics coatings via machine learning. *Ceramics International*, 48, 32064-32072. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.145>.

Yang, C.; Ren, C.; Jia, Y.; Wang, G.; Li, M.; Lu, W. (2022), A machine learning-based alloy design system to facilitate the rational design of high entropy alloys with enhanced hardness. *Acta Mater.*, 222, 117431, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117431>.

Zhang, C.; Zhang, F.; Chen, S.; Cao, W. (2012), Computational thermodynamics aided high-entropy alloy design. *JOM*, 64, 7, 839-845. <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-012-0365-6>.

Zhang, F.; Zhang, C.; Chen, S.L.; Zhu, J.; Cao, W.S.; Kattner, U.R. (2014), An understanding of high entropy alloys from phase diagram calculations. *CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, 45, 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.calphad.2013.10.00>.

Zhou, K.; Liu, B. (2022), Molecular dynamics simulation: fundamentals and applications, Academic Press, Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04711-0>.

Zhu, W.; Huo, W.; Wang, S.; Kurpaska, L.; Fang, F.; Papanikolaou, S.; Kim, H.S.; Jiang, J. (2023), Machine learning-based hardness prediction of high-entropy alloys for laser additive manufacturing. JOM, 75, 12. <https://doi.org/10.1007/s11837-023-06174-x>.



conhecimentolivre.org/home



contato@conhecimentolivre.org



[editoraconhecimentolivre](https://www.instagram.com/editoraconhecimentolivre)

ENGENHARIA: A MÁQUINA QUE CONSTRÓI O FUTURO

VOLUME XV