

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Soldagem de Ligas de Alta Entropia por TIG

Tiago de Oliveira Lobo

SÃO CARLOS -SP
2024

Soldagem de Ligas de Alta Entropia por TIG

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Carlos Alberto Della Rovere



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Tiago de Oliveira Lobo

RA: 769781

TÍTULO: Soldagem de ligas de alta entropia por TIG

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Carlos Alberto Della Rovere

CO-ORIENTADOR(A):

DATA/HORÁRIO: 02/02/2024, 10h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Carlos Alberto Della Rovere	8,5	9,0
Prof. Dr. Conrado Ramos Moreira Afonso	8,5	8,0
Média	8,5	8,5

BANCA – ASSINATURAS:

Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS ALBERTO DELLA ROVERE
Data: 15/02/2024 13:37:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Alberto Della Rovere

Prof. Dr. Conrado Ramos Moreira Afonso



DEDICATÓRIA

À minha família, que sempre foi meu alicerce, fonte inesgotável de apoio e inspiração. Cada conquista neste percurso é uma celebração compartilhada, e este trabalho é, acima de tudo, uma expressão de gratidão pelo amor incondicional e encorajamento constante que recebi de vocês.

Aos meus colegas, que se tornaram companheiros de jornada, desafios e descobertas. Juntos, enfrentamos os obstáculos, celebramos os triunfos e construímos memórias que enriquecem não apenas este trabalho, mas toda a experiência acadêmica.

AGRADECIMENTO

Gostaria de expressar minha sincera gratidão aos respeitáveis professores do Departamento de Materiais da UFSCar, cuja dedicação ao ensino e à pesquisa proporcionou o ambiente intelectual rico no qual este trabalho foi desenvolvido. Suas valiosas contribuições e inspiração moldaram significativamente minha jornada acadêmica. Um agradecimento especial é dedicado ao meu orientador, Carlos Alberto Della Rovere, cujo conhecimento profundo, orientação sábia e apoio incansável foram fundamentais para o sucesso deste projeto. Sua capacidade de transmitir paixão pelo conhecimento e sua orientação cuidadosa guiaram-me através dos desafios deste trabalho, proporcionando uma experiência de aprendizado enriquecedora. Agradeço a todos os professores que compartilharam seus insights valiosos e conhecimentos especializados, contribuindo para o meu desenvolvimento acadêmico. Cada um de vocês desempenhou um papel crucial na minha formação, e por isso, expressei minha profunda gratidão. Que este trabalho sirva como um testemunho modesto da apreciação que sinto por cada um de vocês.

RESUMO

A soldagem de ligas de alta entropia por TIG (Tungsten Inert Gas) tem sido objeto de extensa pesquisa, explorando tanto aspectos teóricos quanto práticos. A revisão bibliográfica destacou a complexidade dessas ligas, enfatizando a falta de uma definição precisa e discutindo conceitos fundamentais, como alto-entropia, distorção da rede e efeito coquetel. No âmbito da soldagem, a atenção foi direcionada para a aplicação dessas ligas como materiais base e consumíveis, com ênfase na liga $Al_xCoCrFeNi$. Estudos revelaram resultados promissores, mas desafios persistem, como a formação de trincas em ligas com adição de cobre, exigindo tratamentos térmicos para otimizar propriedades. A correlação entre teoria e prática, especialmente em relação à microestrutura, permanece um ponto crítico. Controlar a taxa de resfriamento e a composição química durante o processo de soldagem é vital para garantir resistência à tração, plasticidade e estabilidade estrutural. Desafios técnicos, como a incorporação de ferro e a adição controlada de cobre, são cruciais para viabilizar aplicações práticas, equilibrando desempenho e acessibilidade econômica. Em conclusão, a soldagem de ligas de alta entropia por TIG representa um campo de pesquisa promissor, com ligas demonstrando propriedades notáveis. No entanto, superar desafios técnicos e aprofundar o entendimento teórico-prático são necessários. A busca por estratégias de redução de custos é fundamental para a adoção generalizada desses materiais inovadores.

Palavras-chave: Liga de alta entropia. Liga de multicomponente. Soldagem. Microestrutura. TIG.

RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA

This work provides a comprehensive approach to Tungsten Inert Gas (TIG) welding of high-entropy alloys (HEAs), exploring both theoretical and practical aspects in this emerging field. The literature review highlighted the complexity of HEAs, their diverse nomenclatures, and conceptual challenges related to the lack of a precise definition. The analysis of HEA properties revealed the dynamic interaction between entropy and enthalpy, emphasizing the competition between these factors in determining the predominant phases. Central effects identified by Yeh, such as high entropy, lattice distortion, slow diffusion, and the cocktail effect, were discussed in detail, pointing out some inconsistencies in this concept. It was emphasized that multiple-component alloys cannot be analyzed as a group of steels due to their much broader range of possibilities. In the welding context, the review focused on the application of HEAs as base materials and consumables. Studies showed promising results, with the Al_xCoCrFeNi alloy being widely investigated. Tensile strength, plasticity, and structural stability were analyzed under different welding conditions, highlighting the importance of controlling the cooling rate and chemical composition. However, challenges such as crack formation in copper-added alloys and the need for heat treatments to optimize properties require further attention. The correlation between theory and practice, especially regarding microstructure, remains a significant point, emphasizing the need for additional studies to consolidate relationships between welding parameters and final properties. Moreover, the quest for cost reduction strategies, such as the incorporation of iron and controlled copper addition, proves vital to enable practical applications of these alloys in various sectors. Balancing alloy performance with economic feasibility is a fundamental consideration for widespread adoption. In conclusion, TIG welding of HEAs represents a promising research field due to the existence of alloys demonstrating excellent properties and the potential emergence of more alloys with equally or even better properties. However, it requires overcoming technical challenges and deepening theoretical-practical understanding. The contributions presented in this literature review offer valuable insights for researchers, engineers, and industry professionals seeking to explore and apply these innovative materials.

Keywords: High-entropy alloy, Multicomponent alloy, Welding, Microstructure, TIG.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico de quantidade de artigos vistos no capes sobre soldagem de ligas de alta entropia por ano em que o mesmo foi publicado.....	01
Figura 2 - Análise microestrutural da junta soldada, a)EBDS e b) Mapeamento de fase. (J.G Lopes et. al., 2023, p.4).....	09
Figura 3 - Micrografia eletrônica da amostra soldada, a) ZF, b) MB, ZTA, ZF , c) FZ, d) Difrátograma de raio X da amostra soldada e do metal base. (R. Sokkalingam et. al., 2017, p.2).....	12
Figura 4 - Avaliação de microdureza da junta soldada: a) mapeamento da variação de dureza ao longo da extensão total da solda sobreposto aos resultados microscópicos ópticos $Fe_{50}Mn_{30}Co_{10}Cr_{10}$ e b) evolução representativa da dureza retirada da linha central do mapa. (J.G Lopes et. al., 2023, p.12).....	18
Figura 5 - Comportamento tensão-deformação de: (a) pontos representativos localizados na Zona de Metal Base (BM), Zona Afetada pelo Calor (HAZ) e Zona Fundida (FZ) obtidos com DIC durante ensaios de tração das juntas soldadas e (b) junta soldada e a resposta média do DIC.. (J.G Lopes et. al., 2023, p.13).....	19
Figura 6 - Gráfico de quantidade de vezes que cada elemento de liga apareceu no escopo por elementos de liga que apareceram.....	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição da fração de fase ao longo da microestrutura da solda, calculada utilizando o ImageJ em uma localização representativa de cada região. (J.G Lopes et. al., 2023, p.4).....	10
Tabela 2 - Estrutura cristalina, Fração volumétrica (%), das regiões MB e ZF (R. Sockalingam et. al., 2017, p.2).....	12
Tabela 3 - Tabela dos parâmetros utilizados para soldagem de cada liga visto no estado da arte.....	20

LISTA DE SIGLAS

TIG - Tungsten Inert Gas

MB – Metal Base

ZTA – Zona termicamente afetada

ZF – Zona fundida

SATG – Soldagem em atmosfera gasosa

HEA – High Entropy alloys (Liga de alta entropia)

CAPES –Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior

SIGLA - Nome por extenso

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_y	Limite de escoamento
σ_0	Tensão de atrito
k_y	Parâmetro de bloqueio
d	Diâmetro do grão
N_{het}	Taxa de nucleação heterogenia
f_1	Função que depende frequência de vibrações dos atomos, energia de ativação para difusão no liquido e área do núcleo
C_1	Número de átomos por volume no liquido
A	Coefficiente insensível a variação de temperatura
ΔT	Variação de temperatura
$S(\theta)$	Fator de forma

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	01
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA/PRESSUPOSTOS TEÓRICOS/REVISÃO DE LITERATURA	03
2.1	LIGAS DE ALTA ENTROPIA	03
2.2	SOLDAGEM EM COM LIGAS DE ALTA ENTROPIA	06
2.2.1	AIXCoCrFeNi	11
3	METODOLOGIA DE PESQUISA	15
4	DISCUSSÃO GERAL E RESULTADOS	17
5	CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS	23
	REFERÊNCIAS	25

1 INTRODUÇÃO

Os estudos das ligas de alta entropia começaram por volta de 2004 através dos trabalhos do Cantor e do Yeh, que estudaram respectivamente o desenvolvimento microestrutural de ligas de múltiplos componentes equiatômicos e síntese de filmes de nitreto nanoestruturados de ligas múltiplos componentes de alta entropia por pulverização catódica reativa. Desde de então ambos os artigos tem sido referência na área de estudo que se tratam de ligas de alta entropia, tendo o trabalho de Yeh 421 citações e o de Cantor com 6117, utilizando sciencedirect como banco de dados. Esses mais de 12 mil estudos relacionados as ligas de múltiplos componentes se deve essencialmente as excelentes propriedades que podem ser atingidas por esses materiais, como altas resistência a tração, boa resistência a oxidação e corrosão, e excelente resistência a fratura, devido a tais propriedades essas ligas têm sido cotadas para possível utilização em materiais estruturais (J.P. Oliveira et al., 2023).

Portanto o estudo da soldabilidade das ligas de alta entropia tem aumentado nos últimos anos, forme podemos verificar na figura 1 os estudos presentes na biblioteca do sciencedirect temos que 70% dos estudos se encontram em 2022 e 2023. Nesse presente estudo tem como foco o estudo bibliográfico das principais ligas de alta entropia utilizadas na soldagem por gás inerte de tungstênio e elencar seus principais parâmetros.

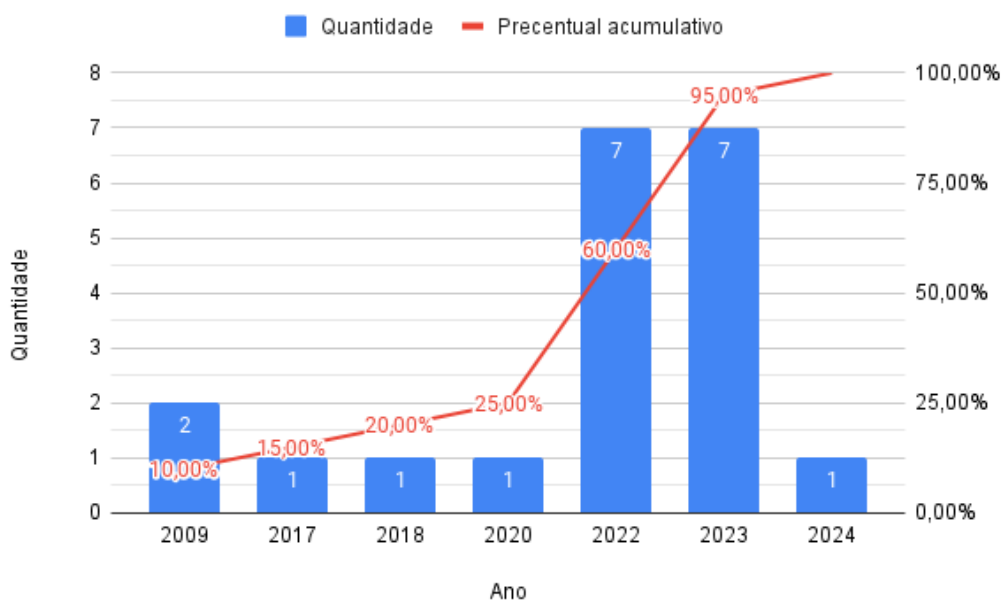


Figura 1. Gráfico de quantidade de artigos vistos no capes sobre soldagem de ligas de alta entropia por ano em que o mesmo foi publicado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA/PRESSUPOSTOS TEÓRICOS/REVISÃO DE LITERATURA

2.1 LIGAS DE ALTA ENTROPIA

Na literatura, depara-se com diversas denominações para ligas de alta entropia, tais como ligas de múltiplos elementos principais (MPEAs), ligas complexas concentradas (CCAs), ligas multicomponentes complexas (CMAs) e ligas complexas em composição (CCAs). A inexistência de uma definição clara para ligas de alta entropia tem suscitado controvérsias e perplexidades, resultado de sua descoberta recente e da limitada exploração no campo científico. À medida que novos artigos são publicados, emergem novos conceitos e considerações. Em geral, duas definições costumam ser identificadas, variando conforme o número de componentes ou o valor de entropia.

Uma alternativa para a definição está associada ao valor de entropia. A entropia, uma propriedade termodinâmica, caracteriza uma medida estática das possíveis configurações da distribuição de átomos em uma estrutura cristalina. Sua interpretação abrange a ideia de desordem ou aleatoriedade molecular, sendo que a entropia aumenta à medida que um sistema se torna mais desorganizado, e as posições das moléculas se tornam menos previsíveis. O princípio das estatísticas termodinâmicas de Boltzmann estabelece a relação entre entropia e aleatoriedade em um sistema, expressa por $\Delta S_{\text{conf}} = R \ln w$, em que R representa a constante universal dos gases e w é o número de estados microscópicos disponíveis, onde dependendo do valor ΔS_{conf} podemos dividir a ligas em 3 tipos, as de baixa, média e alta entropia.

O Professor Yeh formulou quatro "efeitos centrais" que se manifestam em ligas de alta entropia e resultam da estrutura específica que abriga diferentes átomos, afetando significativamente as propriedades dos materiais. Esses efeitos são conhecidos como alto-entropia, distorção da rede, difusão lenta e efeito coquetel. Devido à sua ocorrência em ligas de alta entropia, os princípios da metalurgia física diferem daqueles em ligas clássicas, influenciando as propriedades mecânicas, físicas e químicas, além da termodinâmica, estrutura e microestrutura da liga.

A alta entropia em ligas de múltiplos componentes, especialmente em ligas de alta entropia (HEAs), está intimamente ligada à entropia configuracional, relacionada

à aleatoriedade na disposição atômica desses materiais. O aumento da entropia desempenha um papel crucial na redução da energia livre das fases de solução sólida nas HEAs, favorecendo sua formação, sobretudo em temperaturas elevadas.

A relação entre alta entropia e diminuição da energia livre, conforme expressa pela regra de fase de Gibbs, sugere que ligas com maior entropia tendem a apresentar menor energia livre. Entretanto, é importante notar que a alta entropia não assegura a formação de soluções sólidas simples nas HEAs, sendo outros fatores, como entalpia de mistura, diferença de raio atômico e concentração de elétrons de valência, também determinantes significativos.

A competição entre entropia e entalpia desempenha um papel central na determinação das fases predominantes nas HEAs. Em temperaturas mais elevadas, as fases de solução sólida tornam-se as mais estáveis nesses materiais. Conforme a temperatura aumenta, a ordem nas HEAs diminui, e ligas que inicialmente apresentam fases ordenadas podem se transformar em soluções sólidas aleatórias.

É notável que, em algumas circunstâncias, mesmo quando a entalpia é suficientemente elevada para sobrepujar o efeito da entropia, certos compostos intermetálicos nas HEAs podem permanecer estáveis. Em situações em que a entropia supera a entalpia, as HEAs têm uma propensão a formar estruturas cristalinas mais simples e comuns, como CCC (cúbica de corpo centrado), CFC (cúbica de face centrada) e HCP (hexagonal compacta).

Porém muito vem sendo discutido a princípio sobre a alta entropia dessas ligas, apesar de as mesmas possuírem valores absolutos altos de entropia o nome de liga de alta entropia pode acabar levando ao um engano, pois a energia não rege sozinha a formação de fases de uma solução. De forma resumida para que ocorra a solidificação de uma fase n em uma solução temos que a força motriz regente sendo a energia livre de Gibbs onde a fase com menor ΔG se estabiliza e solidifica, portanto chamar essas ligas pelo nome de ligas de alta entropia sendo que a entropia não domina o processo de estabilização das fase, mas sim a diferença entre a entalpia e entropia do processo, sendo assim o nome ligas de alta entropia podem levar a um equívoco.

O fenômeno conhecido como "efeito de difusão lenta" refere-se à constatação de que a difusão em ligas de alta entropia é mais lenta do que em ligas convencionais. Esse comportamento peculiar confere às ligas de alta entropia (HEAs) uma

resistência excepcional em altas temperaturas, uma notável estabilidade estrutural em condições térmicas elevadas e uma propensão à formação de nanoestruturas.

Nos HEAs, a diferença notável na diversidade dos átomos ao redor de cada sítio de rede nas fases de solução sólida é resultado da ausência de um componente solvente dominante e da presença de, no mínimo, cinco elementos constituintes. Cada sítio é circundado por átomos diferentes e possui uma configuração de ligação distinta, resultando em uma energia potencial de rede (LPE) variada. De acordo com a literatura, uma maior flutuação na LPE resulta em uma difusão mais lenta e em uma energia de ativação mais elevada nos HEAs. Sítios com baixa LPE podem dificultar a difusão de átomos, resultando no efeito de difusão lenta.

Contudo, é importante observar que essa hipótese tem sido alvo de críticas por parte de alguns pesquisadores. A comparação da difusão é sensível ao método utilizado, podendo resultar em taxas mais altas ou mais baixas do que as observadas em ligas mais simples. A normalização da temperatura homóloga T_m/T (T_m — ponto de fusão, T — temperatura de teste) ou o uso de $1/T$ para a comparação podem influenciar os resultados. Quando a comparação é normalizada por T_m , a difusão é mais lenta; no entanto, em outras circunstâncias, a difusão parece ser mais rápida do que em ligas e compostos mais simples. Alguns pesquisadores sugerem que, em ligas de alta entropia, o efeito de difusão lenta pode ser compensado pela temperatura de fusão mais baixa desses materiais. (Miracle, D.B., 2017)

A distorção significativa da rede em ligas de alta entropia (HEAs) é resultado da presença de um grande número de componentes na liga, gerando uma variedade de átomos e, conseqüentemente, uma distorção mais pronunciada do que aquela observada em ligas convencionais. Em HEAs, cada átomo encontra-se cercado por diferentes tipos de átomos com tamanhos distintos, resultando em uma deformação mais acentuada da rede. Essa distorção pode ser atribuída não apenas a diferenças nos tamanhos atômicos, mas também a variações na tendência da estrutura cristalina e na energia de ligação entre os elementos constituintes.

Os efeitos da distorção da rede incluem a redução da intensidade da difração de raios-X, o aumento da dureza, a diminuição da condutividade elétrica e térmica, além da redução da dependência dessas propriedades em relação à temperatura. No entanto, pesquisas recentes têm lançado dúvidas sobre esse efeito. Alguns cientistas argumentam que a ocorrência simultânea de uma rede fortemente deformada e uma

solução sólida estável parece improvável. Além disso, afirmam que a evidência para a ocorrência de uma distorção de rede superior a 5% do parâmetro de rede não está clara. Essas perspectivas críticas destacam a necessidade de uma compreensão mais aprofundada e de evidências robustas para validar o papel da distorção de rede em ligas de alta entropia. (Tokarewicz, M.; Grądzka-Dahlke, 2021)

2.2 SOLDAGEM EM COM LIGAS DE ALTA ENTROPIA

Devido a aparição de algumas ligas de multicomponentes com excelentes propriedades, algumas tem sido cotada para aplicações em diversos ramos, conseqüentemente a necessidade de estudos visando a soldagem das mesmas se iniciaram e um dos processos mais aplicados devido a sua praticidade é o processo de soldagem a arco tungstênio com atmosfera gasosa.

Podemos separar a utilização de materiais para soldagem basicamente em material base e consumível, em casos que o processo de solda utilize um, então temos os estudos focando em estudar os comportamentos desse tipo de liga em ambos os casos de modo a tornar possível a aplicação praticas.

Quando abordamos a soldagem por fusão de materiais, algumas propriedades desempenham um papel fundamental na caracterização das qualidades e características da junta soldada. Três dessas propriedades cruciais são o tamanho de grão, as fases formadas e o crescimento epitaxial dos grãos na zona fundida. Vamos explorar a importância dessas propriedades de maneira mais integrada.

O tamanho de grão, que representa a dimensão média dos cristalitos na estrutura do material, exerce uma influência direta sobre diversas propriedades da junta soldada. Grãos menores estão associados a propriedades mecânicas superiores, como maior resistência e dureza, devido à presença de mais contornos de grão, um modelo que prevê esse efeito é a equação de Hall – Petch:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y \cdot d^{-\frac{1}{2}}$$

Que não só correlaciona o tamanho de grão com um aumento no limite de escoamento, mas também evidencia que por d estar elevado a $-1/2$ que essa resistência cresce de maneira exponencial.

Esses contornos atuam como barreiras para a movimentação de

discordâncias, fortalecendo o material. Além disso, grãos menores podem contribuir para uma maior tenacidade e resistência à fratura, através do maior surgimento de discordâncias geometricamente necessárias que grãos pequenos possuem em cima de grãos maiores, por consequência essas gerações “extras” de discordâncias podem sustentar uma maior taxa de encruamento, fatores cruciais na integridade da junta soldada.

A taxa de nucleação, que se refere à formação inicial de grãos durante o processo de solidificação, desempenha um papel crucial na determinação do tamanho final dos grãos. Uma taxa de nucleação eficiente é vital para gerar grãos menores, pois um maior número de sítios de nucleação resulta em uma distribuição mais fina de grãos. A presença de múltiplos pontos de nucleação facilita a formação de grãos mais pequenos, otimizando assim as propriedades mecânicas da junta soldada, portanto de acordo com a fórmula para taxa de nucleação heterogênea temos que:

$$N_{het} = f_1 C_1 \exp\left(\frac{-A}{(\Delta T)^2}\right) \cdot S(\theta)$$

Onde podemos ver que a taxa de nucleação, por consequência, o tamanho de grãos gerados é sensível ao ΔT , ou seja, quanto maior for o super-resfriamento do material maior será a sua taxa de nucleação, contudo esse aumento de taxa tem um limite que depende da difusão de curto alcance para que ocorra a formação de núcleo.

É importante mencionar que o coeficiente de difusão também desempenha um papel na taxa de nucleação. Limitações no coeficiente de difusão podem impactar a eficiência do processo de nucleação, influenciando diretamente o número de sítios de nucleação disponíveis. Em condições em que a difusão é restrita, a formação de novos grãos pode ser prejudicada, levando a um aumento no tamanho médio de grão. Portanto, ao considerar o controle do tamanho de grão na soldagem, é essencial otimizar não apenas a taxa de nucleação, garantindo uma distribuição mais fina de grãos, mas também monitorar fatores como o coeficiente de difusão para garantir um processo de solidificação eficaz e a obtenção das propriedades desejadas na junta soldada.

A presença de diferentes fases na microestrutura da junta soldada desempenha um papel significativo nas propriedades finais do material. A transição entre estruturas cristalinas, como a transição de fases CCC (cúbica de corpo

centrado) para CFC (cúbica de face centrada), pode influenciar a fragilidade ou ductilidade do material. A estrutura CCC, por exemplo, geralmente está associada a maior resistência, mas também pode tornar o material mais propenso à fragilização, especialmente em condições de baixas temperaturas. Já as estruturas CFC podem conferir uma maior ductilidade ao material.

Dando continuidade em relação a formação de fase do material algumas ligas de múltiplos componentes podem apresentar o efeito TWIP (Twinning-Induced Plasticity), são conhecidas por sua capacidade de deformação plástica induzida por geminação de maclas, e TRIP (Transformation-Induced Plasticity), transformação de fase induzida pela deformação plástica.

Quando uma falha de empilhamento ocorre, significa que há uma interrupção ou irregularidade na sequência de empilhamento dos planos atômicos em uma direção específica. Esse fenômeno pode levar à formação de fases HCP em ligas, como por exemplo aço austenítico, que inicialmente possui uma estrutura cristalina FCC (cúbica de face centrada). A presença de fases HCP, como a martensita, em ligas TWIP e TRIP confere propriedades mecânicas distintas. A transformação para fases HCP ocorre durante a deformação, contribuindo para a melhoria da resistência e ductilidade do material. A formação controlada dessas fases é desejável em aplicações que exigem uma combinação única de resistência e capacidade de deformação.

Portanto, o entendimento do efeito de falha de empilhamento e a manipulação consciente desse fenômeno durante a soldagem são aspectos cruciais para controlar as características microestruturais e, por conseguinte, as propriedades mecânicas das ligas TWIP e TRIP.

O crescimento epitaxial durante a solidificação na zona fundida é crucial para a integridade da junta soldada. Esse fenômeno implica em um alinhamento direcional dos átomos durante o crescimento dos cristais, resultando em uma microestrutura mais homogênea e alinhada. Isso contribui para a prevenção de defeitos, como segregações e inclusões, melhorando a uniformidade da junta soldada. Ao compreender e controlar essas propriedades simultaneamente, os engenheiros e soldadores podem otimizar a qualidade da junta soldada. A escolha das condições de soldagem, a gestão do resfriamento e a seleção de parâmetros adequados são aspectos críticos para garantir que a junta atenda aos requisitos específicos de cada

aplicação. A interconexão dessas propriedades destaca a complexidade e a importância do controle preciso durante o processo de soldagem para obter propriedades desejadas no material soldado.

O estudo do J.G. Lopes et al (2023) sobre a soldagem da liga $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{30}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ como metal de base para o processo, mostra resultados expondo a excelente soldabilidade desse material, isso pode ser visto através ausência de fissuras, o crescimento epitaxial do grão na zona fundida, e um aumento da dureza de 180 HV para 225 HV em média, sem grandes reduções na tensão a tração do material, caindo apenas 4%. Além disso devido ao efeito a transformação de fase CFC em HCP que esse metal sofre ao ser deformado fornecem a esse material boas propriedades de resistência e ductilidade. (J.G. Lopes et al., 2023)

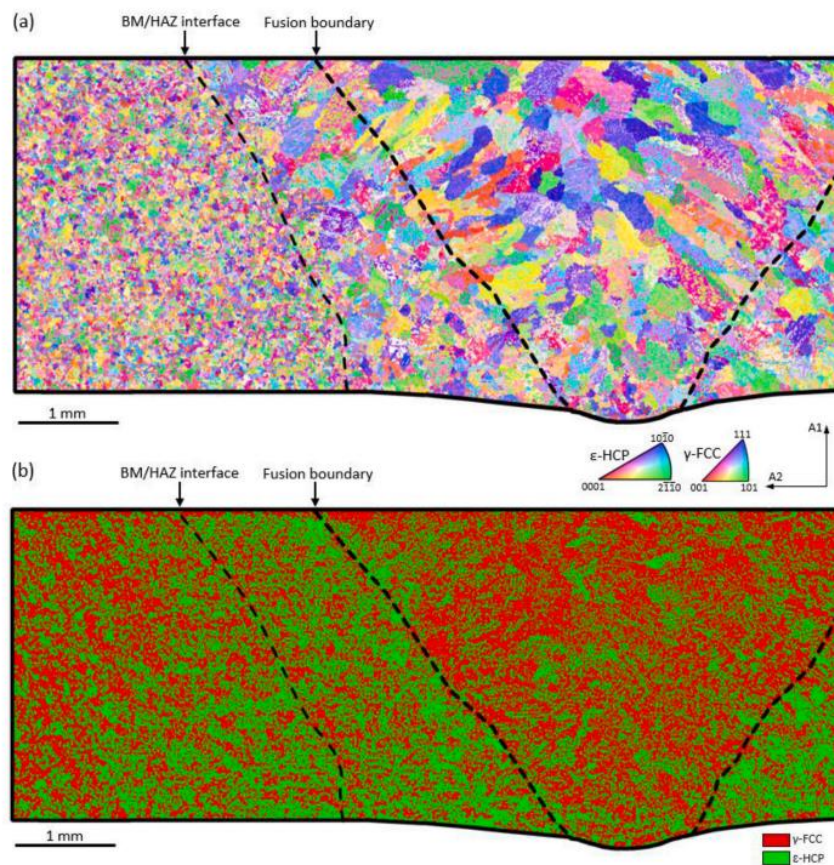


Figura 2. Análise microestrutural da junta soldada, a) EBDS e b) Mapeamento de fase. (J.G. Lopes et. al., 2023, p.4)

Zona da Solda		MB	ZTA	ZF
Fração de fase	γ -FCC	55,5%	42,5%	71,1%
	ϵ -HCP	44,5%	57,5%	28,9%

Tabela 1. Distribuição da fração de fase ao longo da microestrutura da solda, calculada utilizando o ImageJ em uma localização representativa de cada região. (J.G Lopes et. al., 2023, p.4)

Outra possibilidade é a utilização das ligas multicomponentes como consumíveis, onde o estudo do K. Kaviyaran e do R. Soundararajan (2023) aponta essa aplicação como consumíveis para soldagem de ligas convencionais, AA5083, onde as altas propriedades de algumas ligas de alta e média entropia são extremamente atrativas, o estudo conclui que a solda entre o metal base e o matéria adicionado possuem um forte ligação e uma melhora nas propriedades da liga de alta entropia na solda em relação ao filamento. (K. Kaviyaran, R. Soundararajan, S. Sivasankaran, 2023)

Existe outros estudos sobre a utilização de ligas de alta entropia como consumíveis para soldagem TIG, Hossein Abed, Farshid Malek Ghaini e Hamid Reza Shahverdi (2018) fizeram um estudo na utilização de uma liga FeCrMoBCNb como revestimento de aço carbono, apontando a forte ligação da camada gerada com o metal base, e as excelentes propriedades mecânicas adquiridas, além dos efeitos da magnitude do aporte térmico da soldagem, onde através do abaixamento de mesmo, de 800 J/mm para 600 J/mm, conseguiu um aumento na fases mais duras, por consequência aumentado a dureza do material (H. Abed, F. Malek Ghaini, H.R. Shahverdi, 2018)

O estudo sobre soldagem TIG em ligas de alta entropia são de certa forma recentes, tendo o primeiro estudo dentro do escopo datado em 2009, e conforme o tempo passa mais estudos vem sido feitos visando esse método mais simples de soldagem em relação a outros como soldagem de estado solido que apesar de terem uma maior concentração de estudo ainda não são muito aplicáveis na industrias por diversos empecilhos. Conforme a evolução dos artigos sobre o assunto ocorreu, uma liga acabou se destacando sobre as outra estudadas, devido as suas excelentes propriedades e pelo primeiro artigo analisou a soldagem da liga AlCoCrFeNi que

evidenciou a soldabilidade da mesma.

2.2.1 Al_xCoCrFeNi

Uma das ligas de alta entropia mais estudadas quando se trata de soldagem ao arco tungstênio com atmosfera gasosa é a Al_xCoCrFeNi, aparecendo em 5 dos 22 estudos sobre o assunto, a liga foi objeto de estudo como metal base, inclusive para soldagem de metais dissimilares, a utilização como metal de adição não consta no estado da arte. Uma maior concentração de estudo nessa liga se dá por suas excelentes propriedades, como uma maior resistência a desgaste do que AISI 304 em temperaturas superiores 300 °C e Inconel 718 em temperaturas acima de 800 °C, além disso possui um maior limite de escoamento e ductilidade do que várias ligas multicomponentes que vêm recebendo atenção no âmbito, como CrFeCoNiCuTi, CoCrCuFeNi, AlCrMnFeCoNiCuTiV, AlCrCuNi. (Tokarewicz, M.; Gradzka-Dahlke, 2021)

F. J. Wang, Y. Zhang, G. L. Chen (2009) contemplaram o tema dos efeitos da taxa de resfriamento na liga, de forma que foi possível averiguar que maiores taxas afetam positivamente as propriedades mecânicas, aumentando tanto a ductilidade da liga quanto o limite de escoamento devido ao refino de grão, também relataram a redução de cromo segregado preferencialmente nas regiões interdendríticas com o aumento da taxa de resfriamento. (Wang, F. J., Zhang, Y., Chen, G. L., & Davies, H. A., 2009)

O estudo dos Sokkalingam, R. et. al (2017) se propôs analisar a microestrutura e as propriedades da liga soldada por TIG, porém acabou chegando a um resultado oposto do visto anteriormente na zona solda, onde a alta taxa de resfriamento, gerada pelo aporte térmico elevado, refina os grãos somente na ZF, na ZTA ele constata o aumento dos grãos em relação ao metal base, contudo as propriedades da zona solda são inferiores ao metal base, isso foi explicado pela maior presença de fase CFC nas regiões ZF e HAZ do que no metal base que possui uma maior concentração de fase CCC, fase dura, fazendo a zona solda ter uma menor resistência e plasticidade, o que pode ser notado atrás da figura X. Também podemos ressaltar os baixos valores de V e A utilizados para a soldagem do material em comparação aos utilizados em ligas

convencionais. (R. Sokkalingam et. al., 2017)

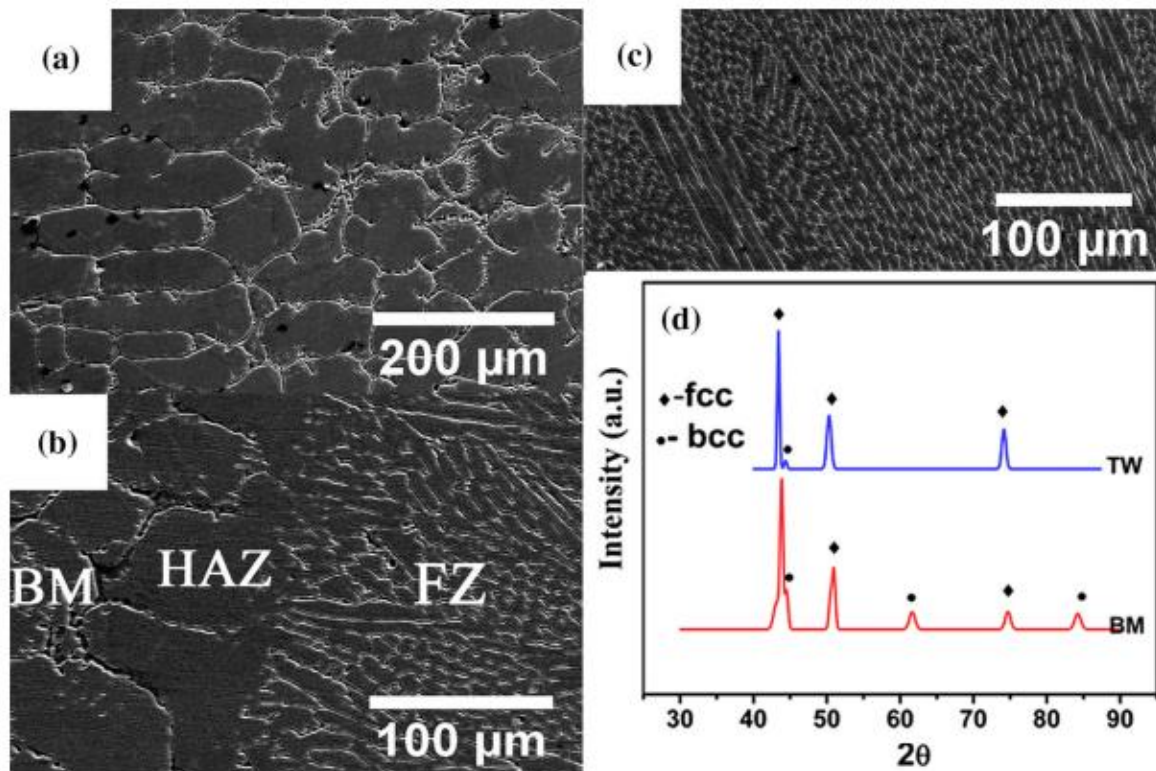


Figura 3. Micrografia eletrônica da amostra soldada, a) ZF, b) MB, ZTA, ZF, c) FZ, d) Difratoograma de raio X da amostra soldada e do metal base. (R. Sokkalingam et. al., 2017, p.2)

Região da Amostra	Estrutura	Fração Volumétrica, v (Pct)
MB	CFC	76
	CCC	24
ZF	CFC	97,8
	CCC	2,2

Tabela 2. Estrutura cristalina, Fração volumétrica (%), das regiões MB e ZF (R. Sokkalingam et. al., 2017, p.2)

Como uma solução para o problema da formação da CFC na microestrutura da solidificação no processo da soldagem o estudo do Yasam Palguna et.al (2023) traz como solução um tratamento térmico na junta soldada de forma a reduzir a redução nas propriedades citados no estudo acima, ele levanta que as propriedades da junta eram 82% do metal base, em resistência a tração, porém após o tratamento térmico a junta passa a ter 92%, base metal 570 Mpa e a junta passa a ter 524 MPa, isso ocorre pois o tratamento térmico a 1100 °C a 1hr permite que com que forme precipitados de faces CCC na matriz CFC. (R. Korla et.al, 2023)

O artigo dos Martin, A. C., Oliveira, J. P., & Fink, C. (2019), aponta a promoção de trincamento a quente com a adição de cobre na liga, muito similar ao que ocorre na ligas de alumínio que contem cobre quando são soldadas, devido a fusão do material soldado a promoção de segregados líquidos ricos em cobre ocorre durante as etapas finas de solidificação da zona fundida, que faz com que conseqüentemente a temperatura solidus abaixe nas regiões interdendíticas, com isso a impossibilidade do liquido lidar a retração do material faz com que gere fissuras na zona de fusão resfriada, que são concentradores de tensões para o surgimento de trincas. (Martin, A. C., Oliveira, J. P., & Fink, C., 2019)

Essas trincas também foram reportadas em estudos utilizando ligas diferentes contendo teores de cobre entre 0,5 e 15, no artigo do Ping Yu, Sindo Kou e Chun-Ming Lin (2023), sobre a solidificação e trincamento de soldas com a liga CoCrFeNiCu_x.(Yu, P.; Kou, S.; Lin, C.-M., 2023)

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

A pesquisa realizada para este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) sobre a soldagem de ligas de alta entropia por TIG (Tungsten Inert Gas) foi conduzida por meio de uma abordagem de revisão bibliográfica. O objetivo principal foi explorar a literatura científica disponível, utilizando principalmente os recursos oferecidos pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

A escolha da CAPES como fonte principal de pesquisa foi baseada em sua reputação como um dos principais bancos de dados acadêmicos no Brasil. A plataforma oferece acesso a uma ampla gama de periódicos, teses, dissertações e outros recursos acadêmicos, tornando-se uma fonte confiável para a aquisição de artigos científicos relevantes para o tema em questão.

A busca foi iniciada com o estabelecimento de palavras-chave específicas relacionadas à soldagem de ligas de alta entropia, enfocando a técnica TIG. Termos como "soldagem TIG", "ligas de alta entropia", "propriedades mecânicas", "microestrutura" e "caracterização" foram utilizados para refinar a busca. Foram estabelecidos critérios de seleção para garantir a inclusão de artigos relevantes, como a atualidade dos trabalhos (considerando um período de abrangência dos últimos 10 anos), a qualidade das publicações e a contribuição significativa para o entendimento da soldagem de ligas de alta entropia por TIG.

A pesquisa inicial resultou em uma extensa lista de artigos, que foram analisados individualmente. Durante essa fase, foram considerados aspectos como a metodologia experimental empregada nos estudos, os resultados obtidos, as conclusões dos autores e as limitações identificadas. A análise crítica dos artigos permitiu uma avaliação cuidadosa da contribuição de cada trabalho para o desenvolvimento do conhecimento na área.

Com base nos artigos selecionados, a revisão bibliográfica foi organizada de forma a fornecer uma visão abrangente sobre o estado atual do conhecimento em soldagem de ligas de alta entropia por TIG. Os tópicos abordados incluem os princípios da soldagem TIG, as propriedades das ligas de alta entropia, os desafios enfrentados durante o processo de soldagem e as principais descobertas relatadas na literatura.

A discussão dos resultados obtidos na revisão bibliográfica foi integrada às

conclusões preliminares do TCC. Nesta etapa, destacaram-se os avanços recentes, lacunas no conhecimento identificadas na literatura e possíveis direções para futuras pesquisas na área de soldagem de ligas de alta entropia por TIG.

A correta citação e referenciamento dos artigos consultados foram assegurados de acordo com as normas acadêmicas adotadas para o TCC. Isso incluiu a utilização de estilos de citação reconhecidos, como APA, MLA ou ABNT, conforme orientações institucionais.

A metodologia adotada para esta revisão bibliográfica proporcionou uma base sólida para a elaboração do TCC, permitindo uma análise aprofundada do estado atual da pesquisa em soldagem de ligas de alta entropia por TIG. A revisão contribuiu significativamente para a compreensão das tendências, desafios e oportunidades nesta área específica da engenharia de materiais.

4 DISCUSSÃO GERAL E RESULTADOS

Muitos estudos mostram vários pontos promissores em relação a soldagem das ligas de multicomponentes, porém ainda por ser um campo muito vasto de pesquisa com inúmeros fatores que afetam as propriedades do material, fica difícil de prever quando será possível a aplicação dessas ligas, e por consequência a utilização de métodos de soldagem nas mesmas.

Através desses diversos estudos foi apresentado inúmeros valores empíricos para que fosse possível os estudos darem validações para suas pesquisas, porém ainda existe um problema em relação ao embasamento desses resultados práticos com o previsto na teoria.

O principal problema em relação a isso é a correlação da microestrutura e suas propriedades teóricas em relação ao que foi notado, de forma que para o estudo em relação a soldagem dessas ligas por modos que alteram drasticamente a microestrutura e o tamanho de grão da região afetada, é preciso que os estudos correlacionem aos efeitos da taxa de resfriamento, tamanho de grão gerado e estrutura cristalina em cada sistema de forma a quantificar o impacto de cada um nas propriedades da liga, vale ressaltar também que estudos como do R. SOKKALINGAM et. al.(2017) estudam alguns aspectos da região soldada como um todo sem separar em ZTA e ZF, sendo que as duas regiões em grande maioria dos casos vão se diferenciar muito em questões como fases composicionais, segregação de elementos, tamanho de grão, entre outros aspectos.

Sobre os estudos em relação a soldagem de AlCoCrFeNi por soldagem por arco elétrico com eletrodo não consumível de tungstênio, ainda se encontra em escassez tópicos como a relação da variação do aporte térmico com propriedades e impactos na microestrutura que isso causa. Outro ponto que foi apenas tangenciado por diversos artigos é o tamanho da junta solda, que impacta diretamente nos aspectos anterior por afetar a taxa de resfriamento da ZF e da ZTA, apesar de termos alguns bons artigos como o F. J. Wang Y. Zhang G. L. Chen (2009), sobre taxa de resfriamento e efeito de tamanho no Microestrutura e Mecânica Propriedades do AlCoCrFeNi Liga de alta entropia, ainda faltam estudos mais precisos mostrando a proporção de aumento do limite de escoamento em relação a redução do tamanho de grão, com outros fatores como dureza de fase, o que ainda torna muito difícil a

previsão de estabelecer parâmetros ideias para o processo. (Wang, F. J., Zhang, Y., Chen, G. L., 2009)

Esse mesmo estudo levanta a existência de cromo segregado preferencialmente em regiões interdendríticas em condições de taxa de resfriamento mais amenas, o que pode levar com que regiões específicas, as dendritas, com uma menor concentração de Cr tenha suas propriedades de resistência a corrosão afetada.

Estudos como o do J.G. Lopes et. al. (2023) sobre a evolução da microestrutura e propriedades da soldagem da liga $Fe_{50}Mn_{30}Co_{10}Cr_{10}$ mostra regiões onde ocorreu a fusão do material apresentam uma menor concentração de fase HCP, fase dura, e uma maior concentração de fase CFC em comparação ao metal base, ele traz em consideração uma questão de proporção entre as fases HCP e CFC e o tamanho de grão da fase HCP, onde apesar da ZF ter uma menor concentração de fase HCP o tamanho reduzido dessa fase na região gera uma alta dureza para mesma, como pode ser vista na figura X, e apesar da queda de ductilidade e de limite de resistência a redução se mostrou muito baixa. Outro ponto levantado pelo estudo é que ocorreu uma maior concentração de fase HCP na ZTA que normalmente são regiões problemáticas na solda, devido a um menor controle dos parâmetro, porém essa maior concentração favorece as propriedades de ductilidade e dureza mesmo com um maior tamanho de grão em relação ao metal base, como visto na figura X do diagrama tensão deformação das três regiões. (J.G. Lopes et. al., 2023)

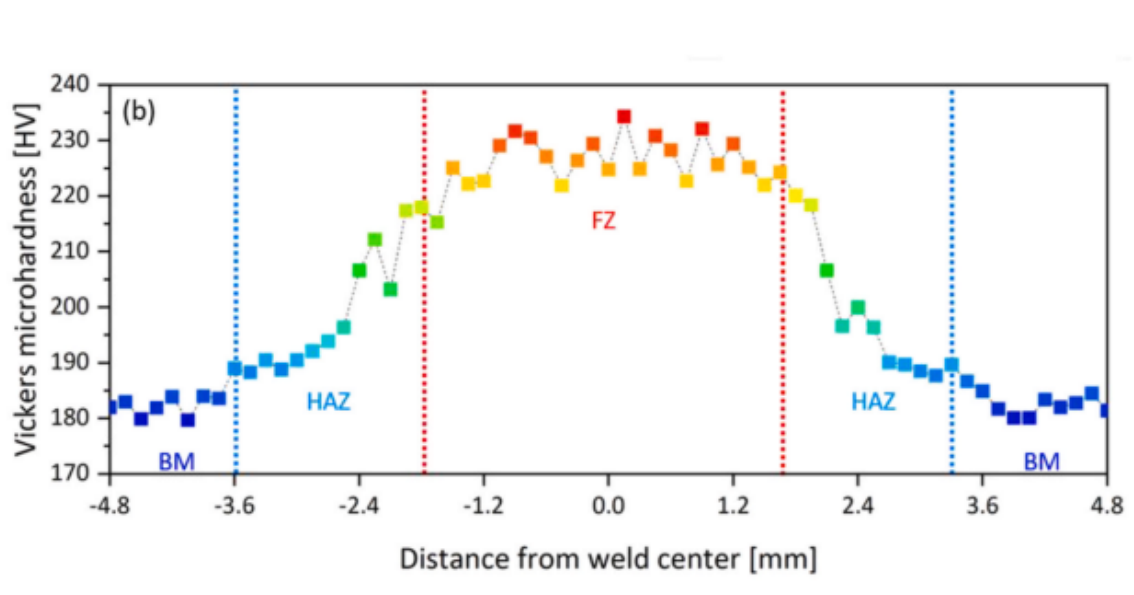


Figura 4. Avaliação de microdureza da junta soldada: a) mapeamento da variação de dureza

ao longo da extensão total da solda sobreposto aos resultados microscópicos ópticos $Fe_{50}Mn_{30}Co_{10}Cr_{10}$ e b) evolução representativa da dureza retirada da linha central do mapa. (J.G Lopes et. al., 2023, p.12)

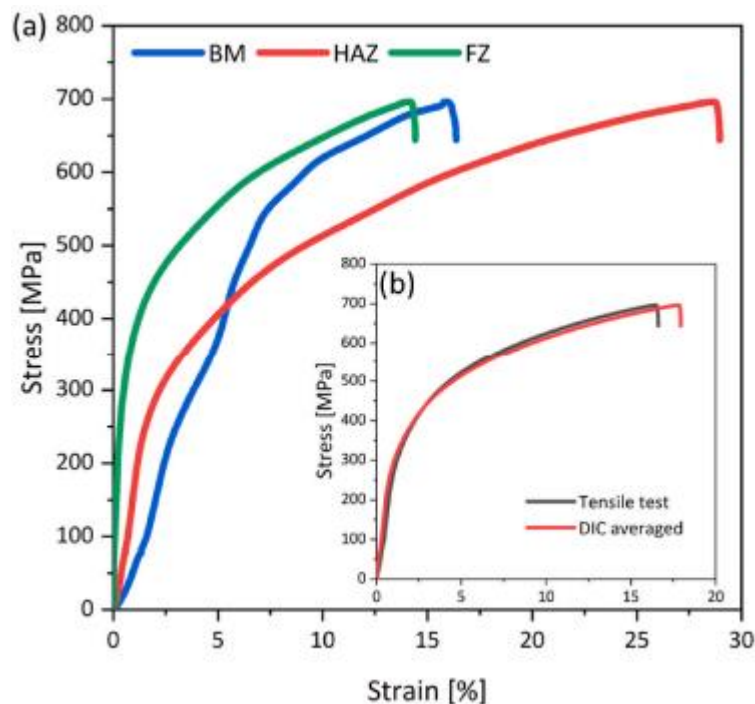


Figura 5. Comportamento tensão-deformação de: (a) pontos representativos localizados na Zona de Metal Base (BM), Zona Afetada pelo Calor (HAZ) e Zona Fundida (FZ) obtidos com DIC durante ensaios de tração das juntas soldadas e (b) junta soldada e a resposta média do DIC.. (J.G Lopes et. al., 2023, p.13)

Outro ponto a ser levantado é a importância que vem sendo levantada de barateamento de custos desses materiais, muito das ligas de múltiplos componentes que apresentaram boas propriedades tem componentes caros e por sua equimolaridade no geral acaba tornando essas soluções caras, um exemplo que para ligas estudadas para aplicações do processo de soldagem dos 22 artigos publicados nesses últimos anos sobre o assunto 68,2% possuem cobalto que é um elemento caro, uma solução que vários desses estudos visam é a incorporação de ferro nessa ligas afim de reduzir seus custos. Outro elemento cotado para redução de custo, não tanto quanto o ferro, é a adição de cobre nessas ligas, que apesar de apresentarem de algumas apresentarem boas propriedades, acaba quase que impossibilitando a soldagem por TIG dessas ligas devido ao faturamento durando a solidificação do material.

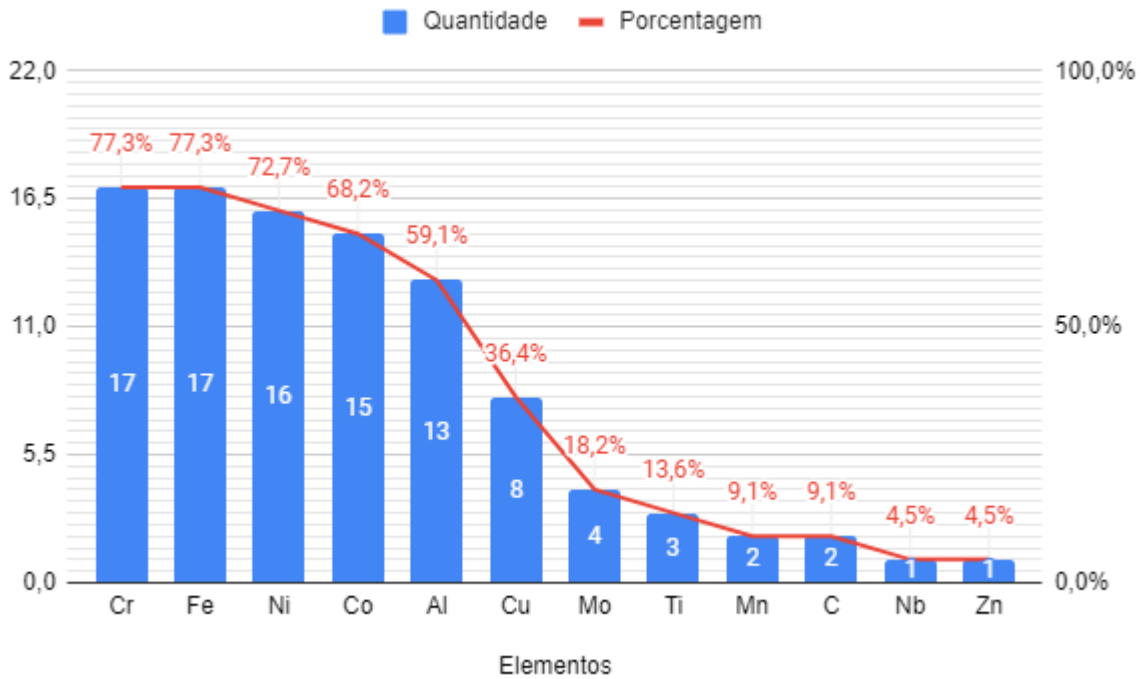


Figura 6. Gráfico de quantidade de vezes que cada elemento de liga apareceu no escopo por elementos de liga que apareceram.

Também através da pesquisa foi possível levantar alguns dados fornecidos para construção de uma tabela de parâmetros utilizados para soldagem das ligas de forma a entender o que está efetivamente afetando as propriedades dos materiais.

Consumíveis	Superfície	Voltagem (V)	Corrente (A)	Velocidade (mm/min)	Fluxo de Argônio (L/min)	Espessura do substrato(mm)	Aporte térmico (J/mm)	Dissimilar
-	AlCoCrFeNi	12	40	80	-	2,50	216	não
-	AlCoCrCuFeNi	11	120	-	-	-	-	não
NiCrAlCoCu	AISI1050	16	100	78	8	25,00	738	não
NiCrAlCoMo	AISI1050	16	100	78	8	25,00	738	não
FeCrMoBCNb	Aço (0,16%C;0,3%Mn;0,2%Si)	16	140	108	14	-	850	não
FeCrMoBCNb	Aço (0,16%C;0,3%Mn;0,2%Si)	16	140	108	14	-	850	não
FeCrMoBCNb	Aço (0,16%C;0,3%Mn;0,2%Si)	16	140	108	14	-	850	não
FeCrMoBCNb	Aço (0,16%C;0,3%Mn;0,2%Si)	16	120	132	14	-	625	não
-	AlCoCrFeNi/Inconel 718	10	50	100	-	-	180	sim

-	AlCoCrFeNiMo	10	35	200	20	1,00	60	não
(Ni, Fe)-rich filler metal	S235JR-AR, EN 10025 / AlCoCrFeNi	12	90	-	10	-	-	sim
AlCuCrFeSiZn / AA 1100-O	AA 6061-T6	15	180	-	16	6,00	-	não
FeMnCoCr	FeMnCoCr	-	25	200	8	1,50	-	não
FeCuNiMoTi	EA4T steel	-	125		-	-	-	não
FeCuNiMoTiC	EA4T steel	-	115	60	4	-	-	não
AlCoCrFeNi	AlCoCrFeNi	10	35	200	20	-	60	não
FeAlNiCu	AA5083 alloy	15	170	90	15	5,00	1020	não
FeAlNiCuTi	AA5083 alloy	15	170	90	15	5,00	1020	não
-	FeCuCoCrNi	10	50-55	89	17	12,70	-	não

Tabela 3. Tabela dos parâmetros utilizados para soldagem de cada liga visto no estado da arte.

Dando ênfase na liga com maiores quantidades de parâmetros vistos no estado da arte, isto é da liga AlCoCrFeNi, ressaltando que as composições não são iguais e os metais base foram sintetizados de maneiras diferentes o que faz com que os mesmos possuam diferentes fases e microestruturas, podemos levantar alguns pontos sobre os parâmetros utilizados na tabela acima, como o uso de um aporte térmico de 60 J/mm se mostrou insuficiente para que formasse uma maior quantidade de fase CCC na matriz, isso pode ter ocorrido pela baixa corrente imposta no processo, entretanto no mesmo processo a alta velocidade, 200 mm/min, é responsável por uma maior taxa de resfriamento, junto com outros fatores, como tamanho da junta, que tornou possível um maior refino de grão na ZF.

5 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Assim sendo, este trabalho proporcionou uma abordagem abrangente sobre a soldagem de ligas de alta entropia por TIG, explorando a diversidade de aspectos teóricos e práticos envolvidos nesse campo emergente. A revisão bibliográfica destacou a complexidade das ligas de alta entropia, suas diversas nomenclaturas e desafios conceituais relacionados à falta de uma definição precisa.

A análise das propriedades das ligas de alta entropia revelou a interação dinâmica entre entropia e entalpia, destacando a competição entre esses fatores na determinação das fases predominantes. Os efeitos centrais identificados por Yeh, como alto-entropia, distorção da rede, difusão lenta e efeito coquetel, foram discutidos em detalhes, apontando algumas inconsistências presentes nesse conceito, e o fato das ligas de múltiplos componentes não poderem ser analisadas como se fossem um grupo de aços pois a sua gama de possibilidade é de muito mais ampla em todos os sentidos.

No contexto da soldagem, a revisão enfocou a aplicação das ligas de alta entropia como materiais base e consumíveis. Estudos revelaram resultados promissores, com a liga AlxCoCrFeNi sendo amplamente investigada. A resistência à tração, a plasticidade e a estabilidade estrutural foram analisadas em diferentes condições de soldagem, destacando a importância do controle da taxa de resfriamento e da composição química.

Contudo, desafios como a formação de trincas em ligas com adição de cobre e a necessidade de tratamentos térmicos para otimizar propriedades demandam uma atenção mais aprofundada. A correlação entre teoria e prática, especialmente em relação à microestrutura, permanece um ponto de destaque, ressaltando a necessidade de estudos adicionais para consolidar as relações entre os parâmetros de soldagem e as propriedades finais.

Além disso, a busca por estratégias de redução de custos, como a incorporação de ferro e a adição controlada de cobre, mostra-se vital para viabilizar aplicações práticas dessas ligas em diferentes setores. O desafio de equilibrar o desempenho das ligas com a acessibilidade econômica é uma consideração fundamental para sua adoção generalizada.

Em conclusão, a soldagem de ligas de alta entropia por TIG representa um

campo de pesquisa promissor devido a existência de alguma ligas que demonstram excelentes propriedades além da possibilidade de surgimento de mais ligas com propriedades tão boas quanto ou até melhores, contudo exige a superação de desafios técnicos e aprofundamento do entendimento teórico-prático. As contribuições apresentadas nesta revisão bibliográfica oferecem insights valiosos para pesquisadores, engenheiros e profissionais da indústria que buscam explorar e aplicar esses materiais inovadores.

REFERÊNCIAS

Yu, P.; Kou, S.; Lin, C.-M. **Solidification and Liquation Cracking in Welds of High Entropy CoCrFeNiCu_x Alloys**. *Materials* 2023, 16, 5621. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma16165621>. Acesso em: 21 jan. 2024.

J.G. Lopes, Priyanka Agrawal, Jiajia Shen, N. Schell, Rajiv S. Mishra, J.P. Oliveira, **Evolution of microstructure and mechanical properties in gas tungsten arc welded dual-phase Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Cr₁₀ high entropy alloy**, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 878, 2023, 145233, ISSN 0921-5093,. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145233>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Y.C. Lin, Y.H. Cho, **Elucidating the microstructural and tribological characteristics of NiCrAlCoCu and NiCrAlCoMo multicomponent alloy clad layers synthesized in situ**, *Surface and Coatings Technology*, Volume 203, Issue 12, 2009, Pages 1694-1701, ISSN 0257-8972, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.01.004>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Voiculescu, I.; Geanta, V.; Stefanescu, E.V.; Simion, G.; Scutelnicu, E. **Effect of Diffusion on Dissimilar Welded Joint between Al_{0.8}CoCrFeNi High-Entropy Alloy and S235JR Structural Steel**. *Metals* 2022, 12, 548. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met12040548>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Hossein Abed, Farshid Malek Ghaini, Hamid Reza Shahverdi, **Characterization of Fe₄₉Cr₁₈Mo₇B₁₆C₄Nb₆ high-entropy hardfacing layers produced by gas tungsten arc welding (GTAW) process**, *Surface and Coatings Technology*, Volume 352, 2018, Pages 360-369, ISSN 0257-8972. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.019>. Acesso em: 21 jan. 2024.

K. Kaviyaran, R. Soundararajan, S. Sivasankaran, **Metallurgical enhancement and mechanical performance of GTAW of AA5083 plates using medium and high-entropy fillers**, *Materials Characterization*, Volume 204, 2023, 113167, ISSN 1044-5803, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.113167>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Sokkalingam, R., Mishra, S., Cheethirala, S. R., Muthupandi, V., & Sivaprasad, K. (2017). **Enhanced Relative Slip Distance in Gas-Tungsten-Arc-Welded Al_{0.5}CoCrFeNi High-Entropy Alloy**. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48(8), 3630–3634. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4140-8>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Yasam Palguna, Kotla Sairam, A. Rajesh Kannan, N. Siva Shanmugam, Rajesh Korla, J.P. Oliveira, **Effect of post weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded Al_{0.3}CoCrFeNi high entropy alloy**, *Scripta Materialia*, Volume 241, 2024, 115887, ISSN 1359-6462, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2023.115887>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Martin, A. C., Oliveira, J. P., & Fink, C. (2019). **Elemental Effects on Weld Cracking Susceptibility in Al_xCoCrCu_yFeNi High-Entropy Alloy**. Metallurgical and Materials Transactions A. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05564-8>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Wang, F. J., Zhang, Y., Chen, G. L., & Davies, H. A. (2009). **Cooling Rate and Size Effect on the Microstructure and Mechanical Properties of AlCoCrFeNi High Entropy Alloy**. Journal of Engineering Materials and Technology, 131(3), 034501. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.3120387>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Sokkalingam, R., Muthupandi, V., Sivaprasad, K., & Prashanth, K. G. (2019). **Dissimilar welding of Al_{0.1}CoCrFeNi high-entropy alloy and AISI304 stainless steel**. Journal of Materials Research, 1–12. Disponível em: <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.186>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Dejia Liu, Rui Guo, Yong Hu, Jianbang Zeng, Mingxue Shen, Yanchuan Tang, Haitao Jiao, Longzhi Zhao, Xiaoyong Nie, **Effects of the elemental composition of high-entropy filler metals on the mechanical properties of dissimilar metal joints between stainless steel and low carbon steel**, Journal of Materials Research and Technology, Volume 9, Issue 5, 2020, Pages 11453-11463, ISSN 2238-7854, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.028>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Tokarewicz, M.; Grądzińska-Dahlke, M. **Review of Recent Research on AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy**. Metals 2021, 11, 1302. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/met11081302>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Jui-Ting Liang, Kuei-Chung Cheng, Shih-Hsun Chen, **Effect of heat treatment on the phase evolution and mechanical properties of atomized AlCoCrFeNi high-entropy alloy powders**, Journal of Alloys and Compounds, Volume 803, 2019, Pages 484-490, ISSN 0925-8388, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.301>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Kuei-Chung Cheng, Jing-Han Chen, Shane Stadler, Shih-Hsun Chen, **Properties of atomized AlCoCrFeNi high-entropy alloy powders and their phase-adjustable coatings prepared via plasma spray process**, Applied Surface Science, Volume 478, 2019, Pages 478-486, ISSN 0169-4332, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.203>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Yeh, J.-W. (2013). **Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys**. JOM, 65(12), 1759–1771. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Sokkalingam, R., Pravalika, B., Sivaprasad, K. et al. **Dissimilar welding of high entropy alloy to Inconel 718 superalloy for structural applications**. Journal of Materials Research 37, 272–283 (2022). Disponível em:

<https://doi.org/10.1557/s43578-021-00352-w>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Yasam Palguna, A. Rajesh Kannan, Kotla Sairam, N. Siva Shanmugam, Rajesh Korla, **Microstructure and mechanical properties of wrought Al_{0.2}CoCrFeNiMo_{0.5} high entropy alloy using gas tungsten arc welding process**, Materials Letters, Volume 317, 2022, 132109, ISSN 0167-577X, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132109>. Acesso em: 21 jan. 2024.

R. Soundararajan, K.R. Ramkumar, S. Sivasankaran, Hyoung Seop Kim, **Enhancement of tensile strength in AA 6061-T6 plates joined by gas tungsten arc welding using high entropy alloy filler sheet**, Materials Science and Engineering: A, Volume 832, 2022, 142481, ISSN 0921-5093, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142481>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Zhao-Qin Wang, Yu Shi, Zhi-Xiang Zhang, Long-Jiang Zhang, Jiu-Ming Wang, Ke-Han Huang, Xiao-Dong Chen, Xiao-Rong Wang, Peng He, **In situ synthesis of carbide reinforced Fe-Cu-Ni-Mo-Ti high entropy alloy coatings using GTAW cladding with cable-type welding wire**, Materials Letters, Volume 324, 2022, 132706, ISSN 0167-577X, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132706>. Acesso em: 21 jan. 2024.

Miracle, D.B. **High-Entropy Alloys: A Current Evaluation of Founding Ideas and Core Effects and Exploring “Nonlinear Alloys”**. JOM 69, 2130–2136 (2017)., Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2527-z>. Acesso em: 21 jan. 2024.