

## ANÁLISE MICROESTRUTURAL DE REVESTIMENTO DURO APLICADOS PELO PROCESSO FCAW COM E SEM ADIÇÃO DE ARAME NÃO ENERGIZADO

Vitória Ferreira de Oliveira Marques, marques\_vitoria@discente.ufg.br<sup>1</sup>

Valtair Antônio Ferraresi, valtair@ufu.br<sup>2</sup>

Daniel Souza, daniel.souza@ufg.br<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup> Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Prédio da Engenharia Mecânica, Av. Ingá, Prédio B5, Campus Samambaia, CEP: 74.690-900 – Goiânia- Goiás – Brasil

**Resumo.** O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de açúcar. Um dos fatores que impactam diretamente na produtividade do processo da indústria sucroalcooleira é a manutenção de muitos equipamentos que estão sujeitos a mecanismos de desgaste. A aplicação de revestimento tem como principal objetivo reduzir o desgaste destes equipamentos e, conseqüentemente, aumentar a vida útil, reduzir paradas e custos da produção. Para garantir a qualidade do revestimento deve ser feita uma correta seleção do material depositado e dos parâmetros utilizados no processo. Devido ao fato de esses componentes serem fabricados em aço de baixo carbono, é fundamental a utilização de revestimento duro aplicado por soldagem afim de aumentar a vida útil do equipamento. Novas técnicas de soldagem e novos tipos de consumíveis têm sido desenvolvidos para minimizar este tipo de desgaste, entre eles está a adição de nióbio e titânio ao metal de adição mais utilizado, que é o consumível a base de FeCrC. Alguns estudos também foram feitos analisando a viabilidade do processo de soldagem arame tubular (FCAW) duplo arame com adição de arame não energizado no processo de revestimento duro, com intuito de melhorar o processo e reduzir custos. O objetivo deste trabalho é avaliar a microestrutura de revestimentos duros aplicados pelo processo de soldagem FCAW duplo arame, sendo um dos arames não energizado, além de analisar se os parâmetros escolhidos de soldagem foram satisfatórios para os processos. Para isso foram utilizados três tipos de consumíveis: FeCrC, FeCrC+Ti e FeCrC+Nb com diâmetro de 1,6 mm, em três condições de revestimento diferentes. Os revestimentos por soldagem foram feitos em uma chapa de aço carbono SAE 1045, sendo as seguintes combinações: arame FeCrC sem adição de arame não energizado; FeCrC com adição de FeCrC+Nb não energizado e FeCrC com adição de FeCrC+Ti não energizado. A avaliação preliminar da microestrutura indica aparecimento de carbonetos do tipo M7C3. Os parâmetros de soldagem selecionados foram satisfatórios para realização dos revestimentos.

**Palavras chave:** Revestimento duro; FCAW duplo arame; arame não energizado; microestrutura.

### 1. INTRODUÇÃO

Vários equipamentos em usina de açúcar e destilaria de álcool apresentam condições críticas do ponto de vista de desgaste abrasivo, dentre eles destacam-se as facas picadoras, os martelos desfibradores e as moendas. Esses equipamentos são recuperados por soldagem (durante as paradas de manutenção) pela aplicação de revestimentos duros, utilizando-se diferentes processos, técnicas e consumíveis para a reposição do metal desgastado em serviço. As facas picadoras sofrem, além do desgaste abrasivo, cargas cíclicas devido ao seu impacto sobre a cana-de-açúcar e sobre o equipamento que são presas.

Tradicionalmente, a aplicação de revestimentos duros pelo setor industrial tem sido realizada manualmente com o processo Eletrodo Revestido ou de forma automática com o processo Arco Submerso, quando a geometria ou dimensões da peça se adequam a essa aplicação. Devido à sua maior produtividade em relação ao primeiro, aliada à maior versatilidade quando comparado ao segundo, o processo Arame Tubular, também designado como FCAW (Flux Cored Arc Welding), tem se tornado uma alternativa importante, contando com uma grande variedade de consumíveis para diferentes aplicações de revestimentos duros (LIMA, 2008).

Durante o período entre safra, que corresponde ao período entre os meses de novembro a março, as usinas sucroalcooleiras desmontam os equipamentos para realizarem a manutenção geral dos mesmos. Dentre esses equipamentos, 70% são recuperados por soldagem através de diferentes procedimentos (SANTOS et. al, 2005). Segundo

Bessa (2022) a soldagem de manutenção tem o objetivo de manter em funcionamento as linhas de produção promovendo uma recuperação rápida e de baixo custo para a peça ou equipamento.

O desgaste abrasivo na tribologia é o processo pelo qual o movimento relativo entre duas superfícies em contato, produz a deterioração em uma das faces devido as protuberâncias presentes nelas, ou quando partículas duras estão entre as superfícies somando para um maior índice de remoção de material das mesmas (ASTM G40, 1992).

Dureza e resistência ao desgaste são duas propriedades importantes no processo de melhoria da vida útil dos equipamentos, entretanto, Lima (2008) afirma que não é necessariamente a dureza, mas a microestrutura que administra diretamente as propriedades de resistência ao desgaste.

A alta demanda por revestimentos que atendam às mais diversas solicitações no campo tem resultado em uma enorme variedade de ligas. As principais condições para a seleção de uma liga para revestimento são primeiramente ordenadas pelo tipo de desgaste que o componente de trabalho será exposto e solicitado e, finalmente pelos custos envolvidos no contexto. É importante também considerar o metal base que irá receber o revestimento, a resistência ao impacto, a temperatura de trabalho do componente revestido e os fatores que podem influenciar a corrosão (ZIEDAS e TATINI, 1997; LIU et al, 2015).

A soldagem FCAW com dois arames (Duplo Arame) é uma variante do processo FCAW convencional e caracteriza-se pela formação de um par de arcos elétricos entre uma única poça de fusão e dois eletrodos consumíveis continuamente alimentados. Segundo Scotti e Ponomarev (2008), esse processo permite maior taxa de deposição de material, possibilidade de soldagem com velocidades mais elevadas e menor aporte térmico sobre a peça.

A adição de arame não energizado, também chamado como arame frio, no processo FCAW duplo arame tem como objetivo agregar todas as qualidades do processo FCAW duplo arame, aumentando a produtividade e a taxa de deposição sem elevar o custo do processo. O processo duplo arame com adição de arame frio consiste na adição de um arame energizado e um não energizado que é fundido na poça de fusão pelo arame energizado.

Esse processo permite a utilização de apenas uma fonte de tensão constante com alimentador de arame, o arame frio é alimentado através de um cabeçote e um sistema injetor acoplado à extremidade da tocha de soldagem conduzindo-o para a região do arco elétrico, através desse cabeçote é possível controlar entrada e saída de arame e os valores de velocidade de alimentação do arame. Tal processo está esquematizado na Figura 1.

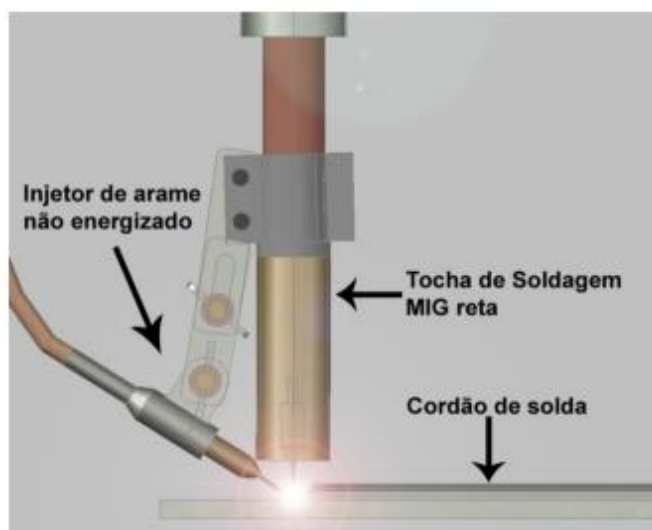


Figura 1. Representação esquemática da alimentação de arame não energizado (CRUZ JÚNIOR; FERRARESI; BRAGA, 2009).

Ferreira (2010) após fazer um estudo comparativo entre o processo de Arame Tubular com e sem adição de arame não energizado, observou que na adição de arame não energizado os depósitos apresentavam uma melhor regularidade na largura e reforço do cordão de solda.

Lima (2008) analisou a microestrutura de revestimentos feitos pelo processo FCAW simples utilizando três tipos de consumíveis a base de FeCrC, sendo que um não havia adição de elemento de liga e os outros dois, um com adição de Nb e o outro com adição de Ti. No revestimento a base de FeCrC sem adição de elemento de liga ele observou a presença de carbonetos (M7C3). Para o revestimento que utilizou FeCrC com adição de Nb observou a presença dos mesmos carbonetos e além destes, a presença de carbonetos de nióbio (NbC) e, para o revestimento utilizando FeCrC com adição de titânio ele também observou carbonetos M7C3, além da presença de carbonetos de Titânio (TiC). Segundo o autor a resistência ao desgaste nos consumíveis com de elementos de liga com alto teor de cromo melhora as propriedades de resistência ao desgaste devido à inserção na matriz de novos carbonetos do tipo MC (NbC e TiC) com durezas superiores ou iguais à dureza dos carbonetos de cromo.

Segundo Paranhos, Mello e Payão Filho (1998), o aumento dos teores de C e Cr reduz a possibilidade de formação de austenita primária e favorecem o aumento da formação de microestrutura composta de carboneto primário do tipo M7C3 e eutético austenita-carboneto (M7C3), a microestrutura que apresenta maior resistência à abrasão de baixa tensão.

O objetivo desta pesquisa é avaliar a técnica de aplicação de revestimento duro em chapas de aço carbono utilizando o processo de soldagem FCAW (Flux Cored Arc Welding) com e sem a injeção de arame maciço não energizado acoplado a tocha. Além disso, pretende-se verificar os efeitos da microestrutura (matriz) e distribuição dos carbonetos e sua influência na resistência ao desgaste abrasivo.

## 2. METODOLOGIA

Foram escolhidos para o estudo três arames tubulares auto-protégidos de 1,6 mm de diâmetro, a composição química encontra-se na Tabela 1 retirada de catálogo da empresa fabricante UTP. A diferença entre os arames é determinada pela diferença nos teores de carbono, silício, manganês, cromo, pela adição de nióbio no segundo arame e pela adição de molibdênio e titânio no último. O arame FeCrC foi utilizado como o arame base para o revestimento, sendo este o arame energizado utilizado para os experimentos, e os arames FeCrC+Nb e FeCrC+Ti foram adicionados não energizados (frio) no processo de soldagem.

Tabela 1: Composição química dos arames tubulares auto-protégidos fornecidos pelo fabricante UTP (Adaptado UTP, 2022).

Arame Tubular	Classificação DIN 8555	Porcentagem em peso (%)							Dureza após a soldagem de três camadas (HRC)
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	Ti	
FeCrC	MF 10-GF-60-GR	4,4	0,3	0,3	27,0	-	-	-	57 - 62
FeCrC+Nb	MF 10-GF-65-GRI	5,5	0,3	0,3	22,0	-	7,0	-	63-65
FeCrC+Ti	MF 10-G-GF-60-GP	1,8	0,2	0,9	6,1	1,4	-	5,5	58

Os revestimentos foram realizados no robô YASKAWA MOTOMAN HP20 utilizando o processo de soldagem Arame Tubular (FCAW) e Arame Tubular duplo arame, com adição de arame não energizado, posição plana. Em ambos os processos a tocha se encontra na vertical formando um ângulo de 90° com a superfície da chapa. Nos testes em que houve adição de arame não energizado, foi acoplado um suporte em posição longitudinal à tocha na direção da velocidade de soldagem em que ambos os arames são alimentados um a frente do outro. O arame não energizado é alimentado formando um ângulo de 35° com a horizontal (Figura 2). Este ângulo foi o que permitiu melhor disposição para montagem e para a realização dos revestimentos.

Para definir os parâmetros de soldagem ideais, primeiramente foram realizados testes sem adição de arame energizado, utilizando o arame de FeCrC. Depois foram feitos testes com as adições dos arames FeCrC+Nb e FeCrC+Ti, para definição dos parâmetros para o procedimento com adição de arame não energizado.

Os revestimentos foram feitos em chapas de aço ABNT 1045 com dimensões de 400x400x200 mm e, para as três condições (FeCrC; FeCrC – FeCrC+Nb não energizado e FeCrC – FeCrC+Ti não energizado), foram feitos 6 cordões de solda de 300 mm. Foram extraídas três amostras para análise microestrutural, as quais foram lixadas de acordo e polidas com pasta de diamante de 1 µm. Posteriormente foram atacadas com Água Régia em Álcool por 15 s e levadas ao microscópio óptico para revelação da microestrutura. Para a avaliação microestrutural foram extraídas amostras das chapas soldadas para as 3 condições de revestimento feitas até o momento. Foram tiradas as microestruturas da região entre dois revestimentos.

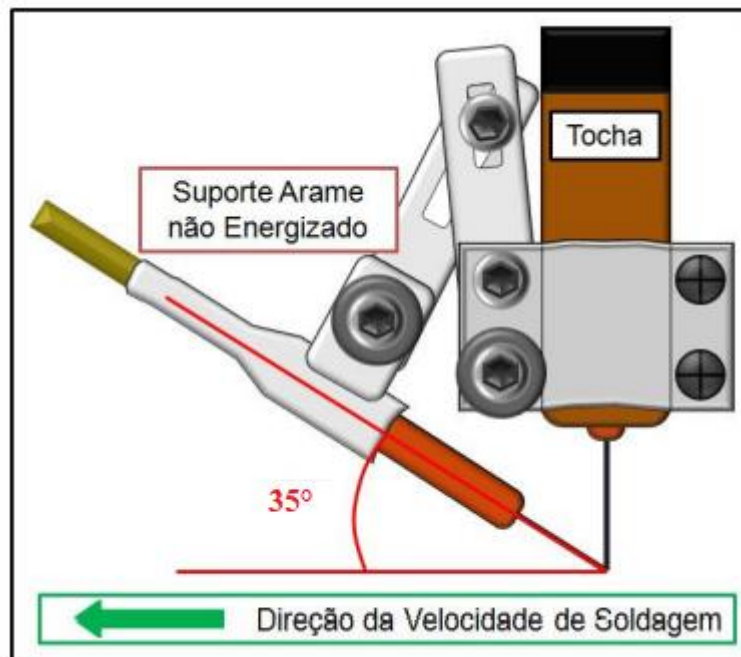


Figura 2: Suporte acoplado a tocha de soldagem utilizado na adição de arame não energizado (Adaptado GARCÍA, 2011).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Parâmetros de soldagem

Primeiramente foram feitos vários testes para acertar os parâmetros a serem utilizados no processo de revestimento FeCrC sem adição de arame energizado e dos revestimentos com adição de arame não energizado (FeCrC + FeCrCNb e FeCrC + FeCrCTi). Os testes foram feitos em chapas de aço 400 x 400 x 20 mm. Foram variados valores de tensão, velocidade de alimentação do arame energizado e não energizado e a DBCP. Como referência foram utilizados os parâmetros da pesquisa de García (2011) e feito os devidos ajustes para a presente pesquisa. Com o ajuste necessário, foi utilizada uma tensão de referência mais alta do que a utilizada por García (2011), para que se obtivesse um comprimento de arco suficiente para introdução do arame não energizado. A DBCP utilizada foi ajustada em função do comprimento do arco e está dentro da faixa utilizada por Lima (2008). A Tabela 2 mostra os parâmetros selecionados após os testes para realização dos revestimentos com e sem adição de arame não energizado

Tabela 2: Parâmetros de revestimentos selecionados após os testes preliminares e valores de tensão e corrente de soldagem monitorados.

CONDIÇÃO	Ur (V)	Valim arame energizado (m/min)	Valim arame não - energizado (m/min)	DBCP (mm)	Vsold (cm/min)	Um (V)	Im (A)
FeCrC	42	8	-	22	30	43,6	250
FeCrC + FeCrCNb	42	8	4	22	30	41,6	276
FeCrC + FeCrCTi	42	8	4	22	30	41,4	267,2

Ur = tensão de referência; Valim = velocidade de alimentação; DBCP = distância bico de contato-peça; Vsold = velocidade de soldagem.

#### 3.2. Revestimento das chapas

Foram aplicados 6 cordões de revestimento com sobreposição de aproximadamente 50 % de comprimento de 300 mm com tecimento a frequência de 3 Hz e amplitude 5 mm, velocidade de alimentação de 8 m/min para o arame energizado e 4 m/min para as condições com adição de arame não energizado. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os revestimentos feitos para as condições propostas onde percebe-se a presença de trincas e respingos verificados visualmente. O aparecimento de trincas se justifica pela alta dureza do revestimento e consequente microestrutura frágil

que, por sua vez, não acomoda as tensões residuais. Para Scotti e Rosa (1997) altos níveis de dureza a ductilidade do material é baixa ficando susceptíveis ao aparecimento das mesmas. Entretanto, essas trincas podem ser favoráveis, uma vez que podem reduzir as tensões internas.

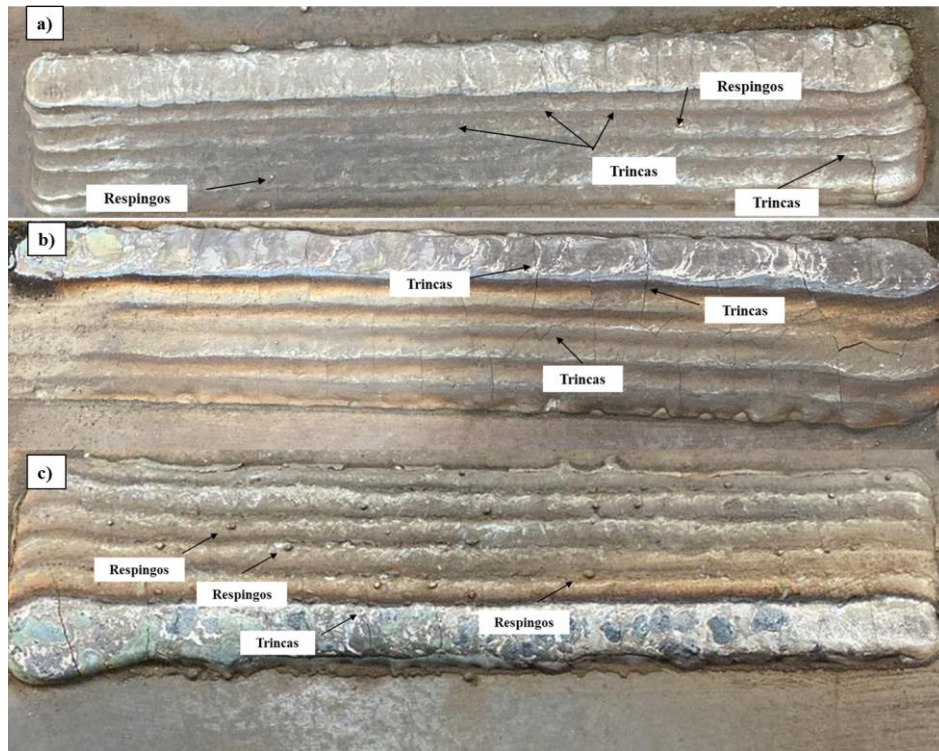


Figura 3: Revestimentos feitos com os parâmetros selecionados para soldagem. a) FeCrC; b) FeCrC + FeCrCNb não energizado e c) FeCrC+ FeCrCTi não energizado.

### 3.3. Microestruturas dos revestimentos

Para a avaliação microestrutural foram extraídas amostras das chapas soldadas para as 3 condições de revestimento. Foram tiradas as microestruturas da região entre um revestimento e o outro. As amostras de cada condição foram lixadas e polidas. Posteriormente cada uma foi atacada com reagente Água Régia em álcool (100 ml de HCl + 3 ml HNO<sub>3</sub> + 100 ml de Álcool Etílico 99%) por 15s e levada ao microscópio óptico.

A Figura 4 mostra a microestrutura para as três condições de revestimento (FeCrC, FeCrC- FeCrC+Nb e FeCrC – FeCrC+Ti) na região entre dois revestimentos com duas ampliações (500x e 1000x). Comparando as imagens com as microestruturas obtidas por Souza (2015) percebe-se a formação de camadas compostas por carbonetos hexagonais primários (M7C3), este fato também é observado por Lima (2008). Para a condição FeCrC- FeCrC+Nb pode-se perceber a presença de carbonetos de Nióbio, também encontrados nos trabalhos citados. Para o revestimento com FeCrC – FeCrC+Ti foram encontrados carbonetos de Titânio no trabalho de Souza (2015), porém não foi tão visível nas imagens, podendo ser necessário uma análise melhor dessa condição.

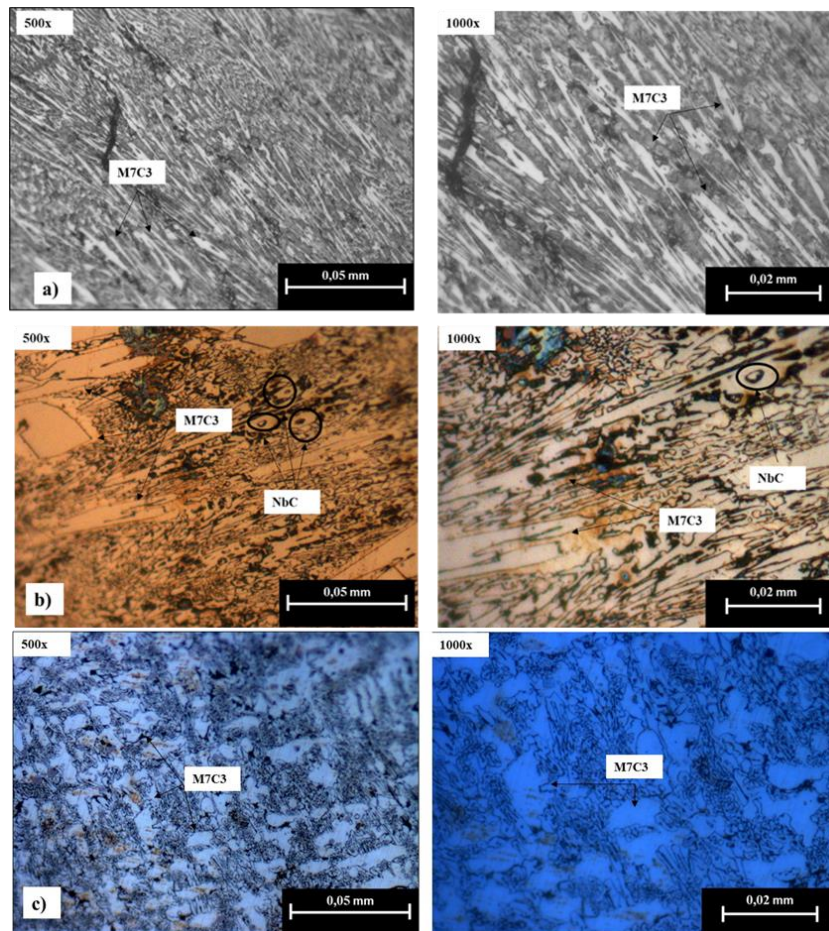


Figura 4: Microestruturas dos revestimentos feito com as condições: a) FeCrC ; b) FeCrC – FeCrC+Nb e c) FeCrC-FeCrC+Ti.

#### 4. CONCLUSÃO

Os parâmetros de soldagem utilizados foram satisfatórios para os revestimentos sem adição de arame não energizado. Para as condições com adição de arame não energizado pode ser que tais parâmetros tenham influenciado na qualidade final do revestimento ou até mesmo na taxa de resfriamento da poça.

Percebe-se também que a técnica de revestimento FCAW com adição de arame não energizado não demonstrou eficiência em relação a diminuição de formação de trincas, uma vez que as mesmas ainda ocorreram para as condições duplo arame.

As microestruturas apresentadas caracterizaram pela presença de carbonetos do tipo M7C3, também encontrados nos trabalhos de Lima (2008) e Souza (2015). Foi observada também a presença de carbonetos de Nb (NbC) na condição FeCrC-FeCrC+Nb, carbonetos que influenciam na melhoria da resistência ao desgaste dos revestimentos.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pela bolsa concedida para realização dos estudos.

#### 6. REFERÊNCIAS

- ASTM G40-09. *Standard Terminology Relating to Wear and Erosion*, 1992.
- BESSA, P.C. *Soldagem de manutenção: fundamentos e equipamentos utilizados* – Disponível em: <<https://alusolda.com.br/soldagem-de-manutencao-fundamentos-e-equipamentos-utilizados/>>. Acesso em: nov. 2022.
- CRUZ Jr. L.P.; FERRARESI, V. A.; BRAGA, E. M. Parâmetros Otimizados para Revestimento de Chapas de Aço Carbono pelo processo MIG-DWOA com Arame ER308LSI. In: *XXV COLSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem*. 26 a 29 de Outubro, 2009, Piracicaba- SP, Brasil

- FERREIRA, E.B.; DA SILVA, P.; ROCHA, D.; MENDONÇA, E.; DA SILVA, F., BRAGA, E. Estudo comparativo da Taxa de Deposição e Sanidade Superficial do Cordão de Solda Entre os Processos de Soldagem FCAW e FCAW-CW. *62ª Reunião Anual SBPC*. Natal- RN. 2010
- LIMA, A. C. *Estudo da aplicação de revestimento duro por soldagem com arames tubulares quanto à resistência ao desgaste de facas picadoras de cana-de-açúcar*. Tese de doutorado, universidade federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, Brasil. 232 p. 2008.
- LIU, J.; YANG, S.; XIA, W.; JIANG, X.; GUI, C. Microstructure and wear resistance performance of CuNiMn alloy based hardfacing coatings reinforced by WC particles. *Journal of Alloys and Compounds*. Wuhan. 2015.
- PARANHOS, R. P. R.; MELLO, R. S. T.; PAYÃO FILHO, J. C. Influência dos Parâmetros de Soldagem com Arco Submerso Empregando Fluxo Ligado e Arame de Aço-C nas Características de Revestimento de Ligas Fe-Cr-C Resistentes ao Desgaste Abrasivo. *XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, XI Congresso Latino-Americano e V Ibero-Americano de Soldagem*. Fortaleza – CE. 20 - 23 de set. 1998.
- SANTOS, A. S. et al. Soldagem na Indústria Sucroalcooleira. *Revista da Soldagem*. Ano I, n. 7, p. 20-26, 2005.
- SCOTTI, A., PONOMAREV, V.; *Soldagem MIG/MAG*, Livro, ArtLiber, 2008.
- SCOTTI, A. e ROSA, L. A. A. Influence of Oscillation Parameters on Crack Formation in Automatic Fe-B Hardfacing. *Journal of Materials Processing Technology*. p. 272-280, 1997.
- SOUZA, D. D. B. G. *Aplicação de revestimento duro utilizando processo FCAW duplo arame para diferentes tipos de consumíveis*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, Brasil. 2015.
- UTP. *Consumíveis para Manutenção e Reparo*. P. 15, 2022. Acessado em 02 dez. 2022. Disponível em: <https://www.kezverchile.cl/wp-content/uploads/2018/09/Catalogo-Soldaduras-UTP-kezver-chile.pdf>.
- ZIEDAS, S.; TATINI, I. *Soldagem*. 1. ed. São Paulo: Coleção Tecnologia SENAI, 1997.

## 5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.