



## PROCESSOS DE SOLDAGEM SUSTENTÁVEL – ESTUDO DE CASO DE APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DURO EM MOENDAS DE CANA DE AÇUCAR

Márcio de Queiroz Murad (\*), Valtair Antônio Feraressi, Wisley F. Sales, José Aécio G. de Sousa

\* Universidade Federal do Triângulo Mineiro, UFTM, mqmurad@gmail.com

### RESUMO

Estudos que são realizados na avaliação da sustentabilidade dos processos de soldagem, são focados principalmente nas questões de geração de resíduos. Dentro desta linha de pesquisa, quando se analisa os respingos provenientes da soldagem, como um resíduo contaminante e uma perda de recursos financeiros, percebe-se que este assunto é pouco explorado. Um outro assunto muito pouco estudado é a aplicação de revestimento duro em moendas de extração de cana. Assim, este trabalho apresenta uma análise na aplicação de revestimento duro, pelo processo Flux-Cored Arc Welding (FCAW), na qual realiza um ensaio que objetiva estudar a influência do parâmetro velocidade de soldagem ou velocidade de aplicação do revestimento duro ( $V_c$ ) no rendimento de deposição. Como proposta este estudo, utilizando velocidades de 6 e 13,6 m/min foi calculado o rendimento de deposição para as 3 velocidades, assim uma melhora no rendimento de 11% quando se reduz a velocidade de 10 para 6 m/min. Nas indústrias *Sucroalcooleiras* do Brasil, esta melhoria reflete em uma economia de R\$ 6.759.640,00 por ano e se evitaria de gerar 385.000 Kg de materiais perigosos

**PALAVRAS-CHAVE:** Manufatura Sustentável, Sustentabilidade, Soldagem, Eficiência de deposição, Moendas

### ABSTRACT

Studies that are carried out in the evaluation of the sustainability of welding processes, are mainly focused on waste generation issues. Within this line of research, when analyzing spatter from welding, as a contaminating residue and a loss of financial resources, it is clear that this subject is little explored. Thus, this work presents an analysis on the application of hard coating by the Flux-Cored Arc Welding (FCAW) process. The objective is to study the influence of the welding speed parameter on the deposition yield in the application of hard coating, in milling liners. The aspects related to the Triple Bottom Line were discussed in favor of sustainable manufacturing and will be focused on the economic and environmental pillars in this study. As a starting point, we contacted a partner company that performs this procedure using peripheral welding speeds with 10 m/min. As proposed in this study, using speeds of 6 and 13.6 m/min, the deposition yield for the 3 speeds was calculated. There was an 11,05% improvement in yield when the speed was reduced from 10 to 6 m/min. In the sugar and alcohol industries in Brazil, this improvement is reflected in savings of US \$ 1,4 million per year and would avoid generating 385,000 kg of hazardous materials.

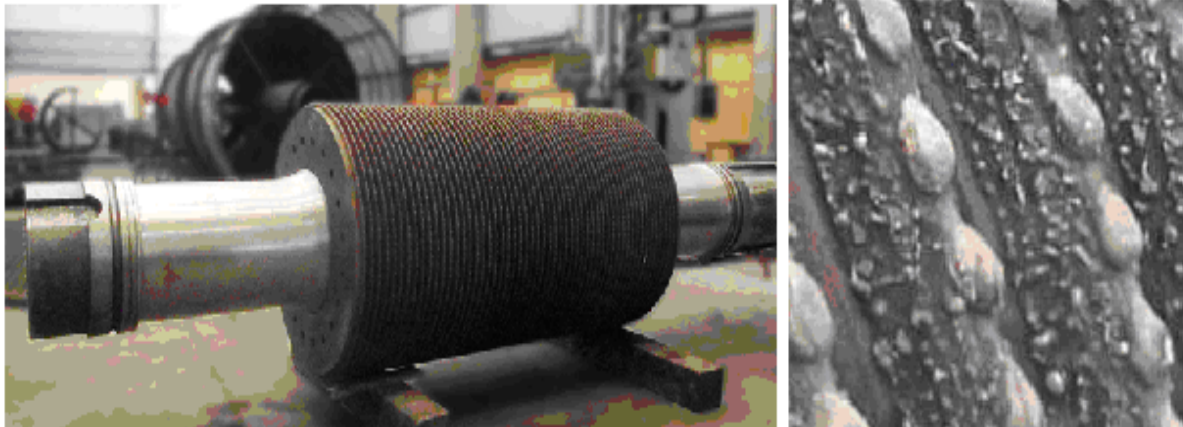
**KEY WORDS:** Sustainability, Sustainable Manufacturing, Welding, Deposition yield, Mills.

### INTRODUÇÃO

Dentre os processos de fabricação, a soldagem é muito comum nas indústrias, devido a sua larga aplicação, porém em alguns impactos ambientais negativos devido a emissões, geração de resíduos e utilização ineficiente de energia e materiais [1].

A luz dos conceitos de processos de soldagem e gestão da sustentabilidade, o setor sucroalcooleiro se apresenta como um palco para este estudo. Este setor é uma fonte potencial de energia renovável, biocombustíveis, bioeletricidade e biomateriais. [2].

As moendas, equipamentos destinados ao processo de extração do caldo da cana de açúcar, nas empresas sucroalcooleiras, ficam sujeita durante a sua operação a grandes tensões em meios agressivos [3], no qual ocorrem desgastes acentuados durante o período de moagem [4,5]. Para minimizar estes desgastes e aumentar a produção da moenda, é aplicada uma camada de revestimento duro, por processo de soldagem. (Figura 1) [6]. Para reduzir esse desgaste são utilizadas ligas Fe-Cr-C [5], tais componentes são formadores de carbonetos de cromo [11]. Este processo pode ser realizado pelo processo arame tubular (Flux-Cored Arc Welding – FCAW)



Figura

## 1. Aplicação de revestimento duro nas ranhuras (dentes) da moenda [6].

Para Sharma [1], os aspectos de sustentabilidade estão correlacionados a parâmetros de soldagem, entre eles a taxa de deposição. O processo de soldagem deve depositar tanto quanto o material com o mínimo possível energia elétrica. E também indica em seus estudos, a relação entre a velocidade de soldagem e a corrente de soldagem, tais parametrizações resultaria em índice de qualidade distintas. Na mesma linha de pensamento, Sproesser et al. [8] e Chuchep et al. [9] ao estudarem as diferenças entre processos distintos de soldagem, consideraram a velocidade de soldagem como fator decisivo para boas eficiências de deposição.

Segundo a Norma ABNT NBR 10.004 [10], a classificação de resíduos sólidos perigosos, são aqueles que apresentam periculosidade, associadas as características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e patogenicidade. Neste contexto os resíduos gerados pelo processo de soldagem para o revestimento de moendas de cana de açúcar são considerados como resíduos sólidos perigosos, e esta análise é apresentada na seção Classificação do Resíduo Segundo a ANBT BNR 10.004/4.

## OBJETIVOS

Como proposta, utilizando  $V_c$  de 6 e 13,6 m/mim foi calculado o  $R_d$  para as 3 velocidades, assim uma melhora na geração de resíduos perigosos e nos custos de aplicação contribuindo para uma manufatura sustentável.

## METODOLOGIA

A Figura 2 que mostra o dispositivo de soldagem empregado para a aplicação do revestimento duro nas camisas de moenda. Nesta, pode-se visualizar o sistema de alimentação de água, o equipamento de soldagem e o dispositivo mecânico que confere a rotação da camisa de moenda que receberá a aplicação de revestimento duro.

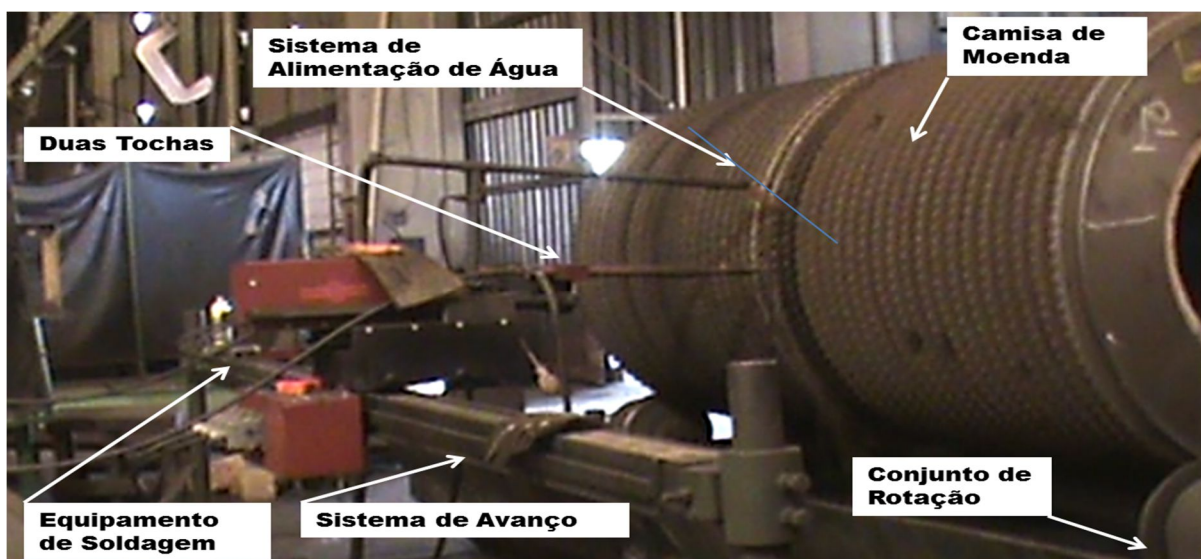


Figura 2 - Conjunto utilizado para realização da aplicação do revestimento [9].

Para a realização da aplicação do revestimento nas laterais dos dentes da moenda é utilizado um dispositivo mecânico acoplado a um conjunto de equipamento de soldagem, constituído de: a) Fonte de soldagem com capacidade de 600 A à 100% de ciclo de trabalho; b) Cabeçote alimentador com roldanas com canal recartilhado para trabalhar com arames tubulares de até 2,8 milímetros de diâmetro e; c) Unidade de Processamento – PLC com uma unidade Interface Homem – Máquina (IHM).

O metal de adição foi um arame tubular auto-protetido, com dureza de 57 a 62 HRc, diâmetro de 2,8 mm. A partir das condições utilizadas atualmente pela empresa ( $V_c = 10$  m/min), variou-se os parâmetros de aplicação de revestimento duro com o objetivo de entender e encontrar novos parâmetros com melhor condição de aplicação, isto é, melhor rendimento de deposição (Rd).

## RESULTADOS

A Tabela 1 e a Figura 3, apresenta os resultados do rendimento de deposição (Rd) obtidos com a variação de velocidade ( $V_c$ ), na qual se verifica que o aumento da  $V_c$  diminui significativamente o Rd. Nota-se que houve uma redução de 20,22% quando se elevou a  $V_c$  de 6 para 10 m/min, e uma redução de 20,08% quando se elevou de 10 para 13,6 m/min. Este fato ocorre devido ao valor alto da  $V_c$ , que fica acima do mínimo necessário para obter uma poça de fusão, como ocorre na soldagem de um cordão de solda. Tais fatos evidenciados são semelhantes aos observados por Sharma [1], na qual os aspectos de qualidade e conseqüentemente de sustentabilidade são afetados pelos rendimentos de deposição e estes foram influenciados pela  $V_c$ .

Tabela 1 – Resultados obtidos com variação de velocidade de aplicação do revestimento duro

| Amostra            | Ud<br>(V) | Id<br>(A) | Um<br>(V)    | Im<br>(A) | Vc<br>(m/min)              | Al<br>(g) | Resp<br>(g) | Rd<br>(%)   |
|--------------------|-----------|-----------|--------------|-----------|----------------------------|-----------|-------------|-------------|
| 1                  | 31        | 300       |              |           | 6                          | 188,0     | 61,69       | 67,19       |
| 2                  | 31        | 300       | 36,44        | 313,16    | 6                          | 188,0     | 64,50       | 65,69       |
| 3                  | 31        | 300       |              |           | 6                          | 188,0     | 66,73       | 64,51       |
| <b>Média de Rd</b> |           |           | <b>65,69</b> |           | <b>Desvio Padrão de Rd</b> |           |             | <b>1,34</b> |
| 4                  | 31        | 300       |              |           | 10                         | 188,0     | 85,28       | 54,64       |
| 5                  | 31        | 300       | 37,15        | 309,04    | 10                         | 188,0     | 81,08       | 56,87       |
| 6                  | 31        | 300       |              |           | 10                         | 188,0     | 85,50       | 54,52       |
| <b>Média de Rd</b> |           |           | <b>54,64</b> |           | <b>Desvio Padrão de Rd</b> |           |             | <b>1,32</b> |
| 7                  | 31        | 300       |              |           | 13,6                       | 188,0     | 102,40      | 45,53       |
| 8                  | 31        | 300       | 36,77        | 297,51    | 13,6                       | 188,0     | 102,80      | 45,32       |
| 9                  | 31        | 300       |              |           | 13,6                       | 188,0     | 102,00      | 45,74       |
| <b>Média de Rd</b> |           |           | <b>45,53</b> |           | <b>Desvio Padrão de Rd</b> |           |             | <b>0,21</b> |

Legenda: Rendimento de deposição = Rd e  $V_c$  = Velocidade de Aplicação do Revestimento Duro, Ud = Tensão desejada, Id = Corrente desejada, Um = Tensão média e Im = Corrente média, Resp = Respingo e Al = Massa de arame eletrodo a ser fundida em 1 minuto de ensaio.

Analisou-se, na sequência, uma comparação de custo, levando em conta os custos relativos a mão de obra do operador de máquina (salário médio de R\$ 2.500, ou seja, um custo de R\$ 23,00/hora). Não foram considerados os valores referentes aos custos de máquinas e equipamentos, pois uma análise específica apenas seria possível a partir dos dados de tempos de máquina e tempos, valores de depreciação e outros valores específicos segundo as particularidades de cada empresa.

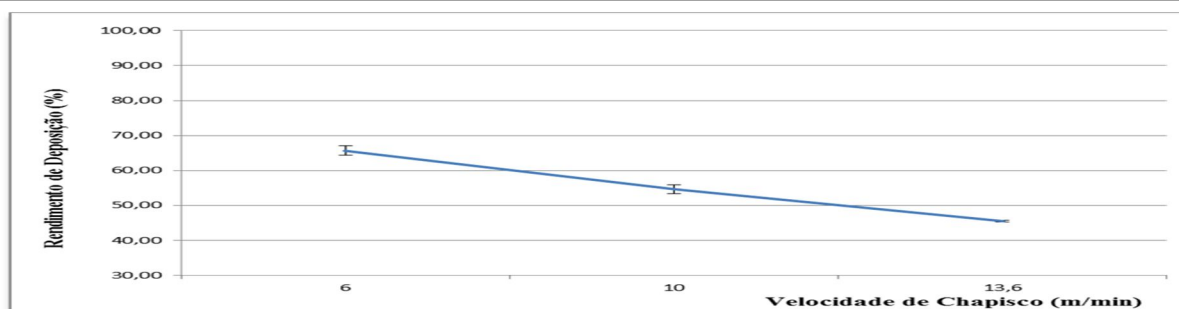


Figura 3 – Resultados obtidos com a variação na velocidade de aplicação do revestimento duro.

Considerando que houve um ganho de Rd de 20,22% (ou seja 65,69% obtidos neste estudo comparado aos 54,64% praticados pela empresa), seria prudente afirmar que poderia haver redução na quantidade de passes para se aplicar a mesma quantidade de material. Dessa forma, foi considerado um fator de correção (FP) de 20,22% no valor final.

Para os cálculos de custos relativos a aplicação de uma moenda com dimensões 1100 mm de diâmetro por 2200 mm de comprimento contendo 57 frisos, são necessárias 5 horas, como tempo de execução (TE) para aplicação do revestimento, aplicando-se de 10 a 12 passes por friso, com Vc de 10 m/min e 8 horas para Vc de 6 m/min. Os custos de matéria-prima (MP) foram apresentados conforme o rendimento, ou seja 60 quilogramas para aplicação com 10 m/min (Rd = 54,64%) e 26,68 Kg para 6 m/min (Rd = 65,69%). E, por fim, foi considerado o valor de R\$ 15,00 por quilo de arame, como custo de matéria-prima (MP). A Tabela 4 apresenta estes custos referentes a um rolo de moenda.

Tabela 4 – Custo de aplicação de revestimento duro para um rolo de moenda

| Vc<br>(m/min)  | TE<br>(horas) | Custo<br>M.O.<br>(R\$) | Rd<br>(%) | MP<br>(Kg) | FP<br>(R\$) | Custo<br>MP<br>(R\$) | Custo<br>Final<br>(R\$) | Custo<br>Final com FP<br>(R\$) |
|--|---------------|------------------------|-----------|------------|-------------|----------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 10   | 5             | 115,00                 | 54,64     | 60         | 0           | 900,00               | 1015,00                 | 1015,00                        |
| 6  | 8             | 161,00                 | 65,69     | 53,38      | 192,20      | 800,04               | 961,04                  | 768,84                         |
| <b>Economia por Rolo de Moenda de R\$ 246,16 (Redução de 32%)</b>                                |               |                        |           |            |             |                      |                         |                                |
| <i>Legenda: TE= tempo de execução, M.O = mão de obra, MP=matéria prima, FP=fator de correção</i> |               |                        |           |            |             |                      |                         |                                |

A empresa parceira realiza este trabalho em cerca de aproximadamente 1000 moendas por ano, o custo reduzido seria de R\$ 246.160,00 por ano. Considerando também que são utilizados aproximadamente 4.000 rolos de moenda no Brasil, esta economia alcançaria o valor R\$ 984.640,00 por ano.

Se o mesmo raciocínio fosse estendido para a manutenção moenda em safra (aplicação de revestimento durante a operação) e considerarmos que são vendidos 3,5 milhões de Kg de material de adição (valor fornecido pelo fabricante do insumo), um ganho no Rd de 20,22% o resultado seria uma economia de R\$ 5.775.000,00.

Por fim, o ganho estimado para a preparação da moenda e manutenção em safra seria de aproximadamente R\$ 6.759.640,00 no Brasil.

Tal evidênciação é corroborada por Hill e Seabrook [4], os quais enfatizam a gestão da sustentabilidade sob o paradigma do Triple Bottom Line. Os aspectos econômicos obtidos com a redução da Vc contribuem de forma significativa no que diz respeito aos parâmetros de sustentabilidade.

É fato que os aspectos ambientais não se resumem apenas à geração de resíduos ou eficiência energética. No entanto, este estudo realizou uma análise considerando apenas estes dois temas. Sobre a geração de resíduo, deve-se considerar aqui que o respingo do revestimento duro, tem como destino o decantador do caldo da cana, equipamento este que realiza a separação de rejeitos sólidos e este rejeito (torta do filtro) tem como destino final a lavoura de cana como forma de adubação. Deve-se considerar também que este respingo é considerado um sólido perigoso, segundo a Norma ABNT NBR 10.004, que trata da classificação de resíduos sólidos perigosos.





Partindo-se do exposto de que são vendidos 3,5 milhões de kg de metal de adição para realização de revestimento duro. E considerando que todo material de adição não aderido (material do respingo se torna um resíduo que provoca impactos ambientais. Pode-se afirmar que um ganho de 20,22% no Rd reduziria em 385.000 Kg a geração de resíduos perigosos por ano.

Em relação ao ganho energético, seguindo o mesmo raciocínio anterior, de forma simplificada pode-se afirmar que um ganho de 20,22% no Rd, resultaria em um ganho na eficiência energética.

### CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu chegar às seguintes conclusões:

A redução da velocidade de aplicação de chapisco durante a preparação da moenda acarretou em um ganho de 20,22% de rendimento de deposição, isto é, redução da quantidade de material desperdiçado.

A menor velocidade de aplicação do chapisco implicou também na diminuição do custo final de preparação da moenda para a safra de aproximadamente 32%. Isto ocorreu devido a melhor eficiência de deposição.

A melhor condição de aplicação do chapisco (menor Vc) obtida neste trabalho induz uma redução na geração de 385.000 Kg (material do respingo) de resíduos perigosos por ano.

Por fim considerando os pilares econômicos e ambientais do Triple Bottom Line, a redução dos custos de aplicação, do consumo de energia elétrica e a geração sem comprometer a qualidade final do revestimento duro contribuem de forma significativa para a sustentabilidade na produção.

### AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento às instituições que apoiaram para realização deste trabalho, FAPEMIG, UFU, Cefores – UFTM.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sharma, A. A fundamental study on qualitatively viable sustainable welding process maps. *Journal of manufacturing systems*, v. 46, p. 221-230, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.01.002>.
- [2] Solomon, S., Quirk, R.G. & Shukla, S.K. Special Issue: Green Management for Sustainable Sugar Industry. *Sugar Tech* 21, 183–185, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00711-2>.
- [3] Buchanan, V. E.; Shipway, P. H.; McCartney, D. G. Microstructure and abrasive wear behaviour of shielded metal arc welding hardfacings used in the sugarcane industry. *Wear*, v. 263, n. 1-6, p. 99-110, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.12.053>.
- [4] Casanova, F.; Aguilar, Y. A study on the wear of sugar cane rolls. *Wear*, v. 265, n. 1-2, p. 236-243, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.10.008>.
- [5] Rivas, J. S.; Coronado, J. J.; Gómez, A. L. Tribological aspects for the shafts and bearings of sugar cane mills. *Wear*, v. 261, n. 7-8, p. 779-784, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.01.026>.
- [6] Murad, M. Q., Ferraresi, V. Aplicação de chapisco em moenda de cana de açúcar com o processo fcwa. 2015.
- [7] Lima, A., Ferraresi, V. Análise da Microestrutura e da Resistência ao Desgaste de Revestimento Duro Utilizado pela Indústria Sucroalcooleira, *Soldagem & Inspeção*, SP, Vol. 14. 2009.
- [8] Sproesser, G. et al. Sustainable welding process selection based on weight space partitions. *13th Global Conference on Sustainable Manufacturing -Decoupling Growth from Resource Use, Procedia CIRP* 40, 2016 127-32. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.077>.
- [9] Chuchep, T., et al. "Welding quality and sustainability of alternative LPG valve boss welding processes." *Songklanakarin Journal of Science & Technology* 41.5. 2019.
- [10] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR. 10004: Resíduos sólidos–classificação. Rio de Janeiro, p. 9-11, 2004.