



Soldagem de Revestimentos Duros em Facas Picadoras de Cana-de-Açúcar de Indústria Sucroalcooleira: Eletrodo Revestido “versus” Arame Tubular

Aldemi Coelho Lima¹, Ildeu Lúcio Siqueira², Flávio Pinheiro de Oliveira³, Lara Inácio de Moraes³ e Valmir Paulo de Moraes Neto³

¹Professor doutor – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG. e-mail: aldemi@ifg.edu.br

²Professor doutor – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG. e-mail: ils@ifg.edu.br

³Graduandos em Engenharia Mecânica – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG. e-mail: flavio.pinheiro.eng@hotmail.com, lara.in_23@yahoo.com.br e valmirccerebro@hotmail.com

Resumo: O setor sucroalcooleiro no Brasil tem apresentado um expressivo crescimento nos últimos anos. Entretanto a manutenção das indústrias apresenta um elevado custo devido à perda de metal dos equipamentos por mecanismos de desgaste e a necessidade de paradas obrigatórias com interrupção da produção para a substituição das ferramentas de processamento da cana-de-açúcar. As facas picadoras que compõem o picador são as primeiras ferramentas a entrar em contato com a cana durante a preparação para a extração do caldo, razão pela qual recebem uma camada de revestimento duro por soldagem visando aumentar a sua resistência ao desgaste. O objetivo deste trabalho é avaliar “in loco” a aplicação de revestimentos duros em facas picadoras, bem como, comparar o nível de desgaste sofrido pelas ferramentas revestidas com um tipo de eletrodo revestido e um arame tubular, ambos indicados para essa aplicação. Foram utilizados um eletrodo revestido da liga Fe-44Cr-5,1C de 4,0 mm de diâmetro e um arame tubular autoprotetido de 1,6 mm de diâmetro, de liga Fe-23,1Cr-4,11C. O metal de base utilizado para a construção das facas foi um aço SAE 1020 com dimensões de 25 x 190 x 580mm. Um conjunto de dez facas foi construído e revestido na própria indústria com cada consumível. Posteriormente, as facas foram montadas no picador e após um período de trabalho foram desmontadas e avaliada a quantidade de metal perdido por desgaste. As análises demonstraram que as facas revestidas com o arame tubular receberam um volume superior de revestimento e apresentaram maior perda de massa que as facas revestidas com o eletrodo revestido. Além disso, verificou-se a ocorrência de maior desgaste nas facas posicionadas mais à direita do picador (vista frontal).

Palavras-chave: arame tubular autoprotetido, eletrodo revestido, revestimento duro, faca picadora, desgaste

1. INTRODUÇÃO

1.1. Soldagem

Segundo Marques (2005), a soldagem é um processo de união de materiais baseado no estabelecimento de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais, na região de ligação em que estão sendo unidos. A soldagem ganhou grande relevância como processo de fabricação a partir do século XIX, principalmente, a partir do desenvolvimento de processos de soldagem por fusão, os mais utilizados no mundo. Atualmente mais de 50 diferentes processos de soldagem têm utilização industrial e a soldagem é o mais importante método para união permanente de metais.

Segundo a AWS (1991), na soldagem com Eletrodos Revestidos, um arame coberto é fundido sobre a peça de trabalho pelo calor de um arco elétrico que é estabelecido entre o eletrodo e a peça. A corrente elétrica que sustenta o arco pode ser alternada ou contínua, e a proteção da solda ocorre pela queima do fluxo que reveste o eletrodo. O processo, na maioria dos casos, é aplicado manualmente.

O processo de soldagem Arame Tubular utiliza o calor gerado no arco elétrico para a fusão do metal e do eletrodo, um arame tubular alimentado continuamente. A proteção da solda é feita por meio de um fluxo contido dentro do arame, podendo ter ou não a proteção adicional de um gás suprido externamente, segundo a versão utilizada, Processo Autoprotetido ou com Proteção Gasosa. Esse processo foi desenvolvido para combinar as melhores características da soldagem com eletrodos



revestidos e a flexibilidade da soldagem MIG/MAG. A combinação dos ingredientes do fluxo no núcleo do arame tubular aliada à ação externa do gás de proteção produz um arco estável com um baixo nível de respingos e soldas de alta qualidade com grande produtividade (AWS, 1991).

1.2. Soldagem de Revestimentos duros

Segundo Hutchings (1992), revestimento duro trata-se de uma liga homogeneamente depositada por soldagem, na superfície de um material mole, geralmente um aço de baixo ou médio carbono, com o propósito de aumentar a sua dureza e resistência ao desgaste (por abrasão, erosão, impacto ou cavitação), sem provocar perda significativa de ductilidade e tenacidade do substrato. Brandi et al (1992), afirmam que a aplicação de revestimentos duros por soldagem com o objetivo de reduzir o desgaste e, conseqüentemente os custos de produção, busca incrementar a vida em serviço dos componentes mecânicos de máquinas e equipamentos e na redução das paradas das indústrias para manutenção.

1.3. Setor Sucroalcooleiro

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido por Índia, Tailândia e Austrália. A cana ocupa cerca de 2% de toda a terra arável do País, aproximadamente 7 milhões de hectares, sendo as plantações concentradas nas regiões Sudeste, Centro-Oeste, Sul e Nordeste, permitindo duas safras por ano (Única, 2012).

Segundo SIFAE (2012), o Brasil produz atualmente mais de 570 milhões de toneladas de cana por ano, as quais são transformadas em cerca de 31 milhões de toneladas de açúcar e 27,5 bilhões de litros de etanol. Um bilhão de litros é destinado à exportação e a demanda interna atual de etanol (anidro e hidratado), segundo Moura (2012) é de 35 bilhões de litros.

Moura (2012) afirma que o setor sucroalcooleiro no Brasil é formado por 435 unidades produtoras, enquanto dados do SIFAE (2012) apontam a Região Centro Oeste como a nova fronteira de expansão do setor, já que os maiores produtores nacionais, São Paulo, Alagoas, Paraná, Pernambuco e Minas Gerais já têm ocupadas, praticamente todas as suas terras apropriadas à produção de cana. Goiás, o maior produtor da Região Centro-Oeste conta com mais de 40 unidades sucroalcooleiras associadas, sendo responsável pela produção anual de 45,2 milhões de toneladas de cana, que são transformadas em 1,75 milhões de toneladas de açúcar e 670 milhões de litros de etanol.

1.4. Equipamentos de processamento da cana-de-açúcar

A extração do caldo da cana para a posterior produção do álcool ou do açúcar passa por várias etapas. Na primeira, após o descarregamento, a cana é lavada e alimentada em esteiras através da mesa alimentadora. Em seguida, passa pelo setor de preparo (nivelador, picador e desfibrador) e posteriormente pelas moendas. O objetivo básico do preparo da cana é aumentar a sua densidade, bem como, realizar o máximo rompimento das células para liberação do caldo nelas contido, obtendo-se, portanto, uma maior eficiência de extração. A Figura 1 ilustra a representação esquemática dos equipamentos envolvidos. Em seqüência, os mesmos serão descritos de acordo com COPERSUCAR (2006).

1.4.1. Picador

Segundo Lima & Ferraresi (2006), o picador é constituído por um ou dois jogos de facas (dois conjuntos em seqüência) que prepara a cana a ser enviada ao desfibrador. É um equipamento rotativo de facas oscilantes, que opera a uma velocidade periférica de 60m/s, e tem por finalidade aumentar a densidade da cana, cortando-a em pedaços menores, preparando-a para o trabalho do desfibrador. A Figura 2a mostra a vista frontal interna de um picador (saída da cana) de seis eixos e dez facas por eixo. É possível identificar a esteira que arrasta a cana contra o picador, na parte inferior da figura, bem como, a região de entrada da cana indicada pela seta, na parte anterior do mesmo. A Figura 2b mostra conjunto de facas picadoras antes da montagem no equipamento.

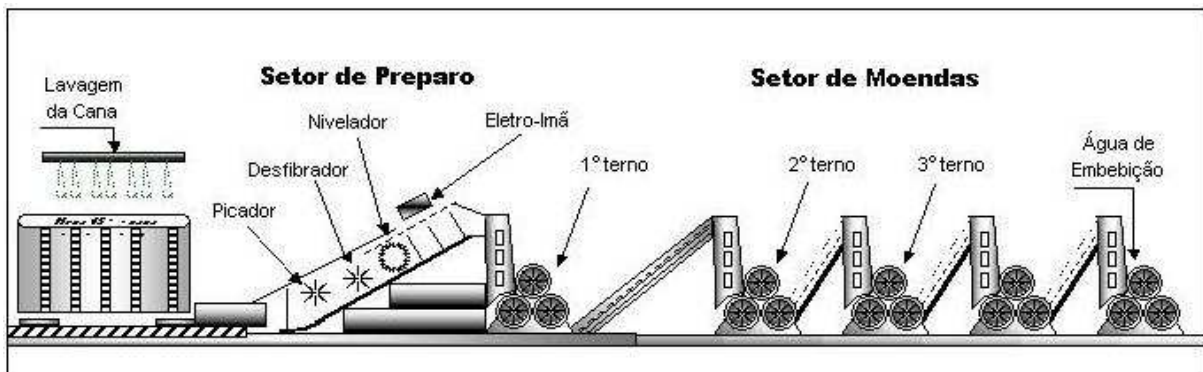


Figura 1 – Representação esquemática dos equipamentos de preparo e extração do caldo.

As facas picadoras são as primeiras ferramentas a entrarem em contato com a cana-de-açúcar durante a preparação desta para a extração do caldo. Em seguida vêm os martelos desfibradores e, posteriormente, as moendas. As facas têm a função de cortar e desfibrar as células da cana para possibilitar a maior eficiência na extração da sacarose nas moendas, estágio seguinte. Para aumentar a resistência ao desgaste, as ferramentas, geralmente construídas em aço carbono SAE 1020 recebem a aplicação de uma camada de revestimento duro nas faces que entram em contato direto com a cana. O desgaste acentuado dessas ferramentas se deve à elevada velocidade de impacto com a cana, na presença de elementos agressivos como areia, pedaços de madeira, raízes, pedras e ferro que são coletados durante o processo de carregamento (Lima & Ferraresi, 2006).

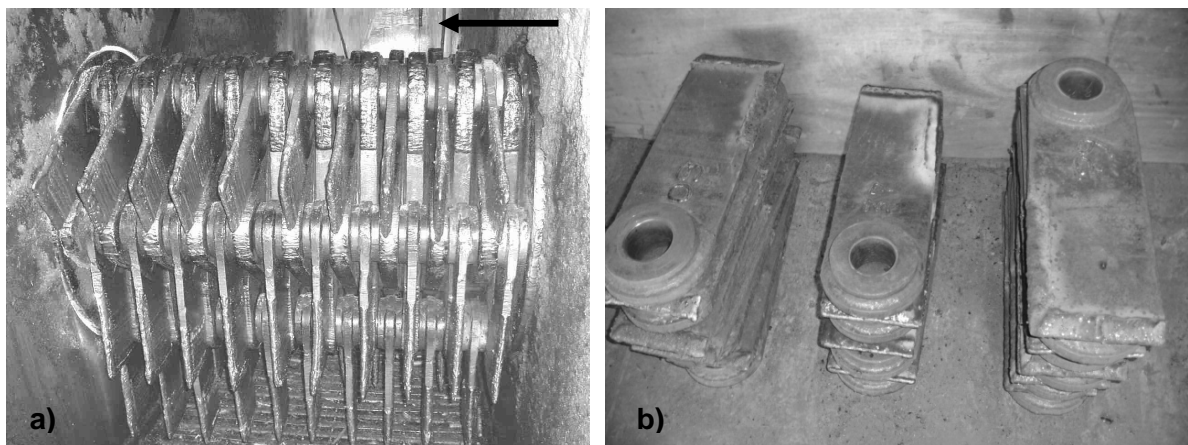


Figura 2 – Vista interna do picador (a) e conjunto de facas picadoras (b). (Lima & Ferraresi, 2006).

1.5. Desgaste em indústrias sucroalcooleiras

No Estado, segundo Lima e Winck (2006), o setor opera de abril a outubro (sete meses), parando entre novembro e março (cinco meses) para a manutenção dos equipamentos que atuam no processamento da cana-de-açúcar com vistas à extração do caldo, principalmente devido ao desgaste acentuado dos mesmos. O desgaste é responsável pela redução da eficiência na extração da sacarose e se deve à presença de elementos agressivos como areia, pedaços de madeira, pedras e ferro, coletados durante o processo de carregamento da cana. O desgaste leva à realização de paradas programadas mensais das indústrias por 8 a 12 horas, com o objetivo de realizar a substituição das facas picadoras e dos martelos desfibradores, ocasionando uma significativa perda de produção, além do envolvimento de profissionais, materiais, ferramentas, equipamentos e consumíveis para a recuperação e substituição das ferramentas.



Segundo Martins Filho (1995), para aumentar a resistência ao desgaste, essas ferramentas recebem a aplicação por soldagem de uma camada de revestimento duro (“hardfacing”) nas faces que entram em contato direto com a cana, utilizando-se diferentes processos, técnicas e consumíveis para a reposição do metal desgastado em serviço.

Além disso, acredita-se que fatores como a variedade da cana, a abrasividade do solo de cultivo, o método de colheita (manual ou mecanizada), a qualidade da lavagem da cana, dentre outros, possam ter influência relevante no volume de perda de massa das ferramentas (Martins Filho, 1995).

Tradicionalmente, a aplicação de revestimentos duros pelo setor industrial brasileiro tem sido feita manualmente com o processo Eletrodo Revestido ou de forma automática com o processo Arco Submerso, quando a geometria ou dimensões da peça se adéquam a essa aplicação. Devido à sua maior produtividade em relação ao primeiro, aliada à maior versatilidade quando comparado ao segundo, o processo Arame Tubular tem se tornado uma alternativa importante, contando com uma grande variedade de consumíveis para diferentes aplicações de revestimentos duros.

Neste trabalho foi comparado o desgaste de facas picadoras revestidas com um eletrodo revestido e um arame tubular de liga ferro-cromo-carbono indicados pelo próprio fabricante para aplicações no setor sucroalcooleiro, especialmente, em facas e martelos desfibradores.

O objetivo deste trabalho é, portanto, avaliar o desempenho desses consumíveis, a partir da identificação das particularidades da operação das facas quanto à resistência ao desgaste dos revestimentos em situação real de trabalho, ou seja, em situação em que tanto a soldagem, quanto a avaliação de desgaste foram feitas na própria indústria durante a operação normal da mesma.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Fonte de Soldagem

A fonte utilizada para a soldagem com eletrodo revestido foi um Retificador estático trifásico BR 425 (Balmer), com potência de 20 KVA, Fator de trabalho de 100% com 200 A e 26 V. Para a soldagem com o arame tubular, foi utilizado um Transformador retificador SOLMIG 470 White Martins (Praxair Inc), com corrente máxima de 470 A, Fator de trabalho de 100% com 300 A e 29V;

2.2. Consumíveis

Os consumíveis para a soldagem de revestimento duro foram recomendados pelo próprio fabricante para o revestimento de facas picadoras, sendo um eletrodo revestido e um arame tubular auto-protetido (não demanda a utilização de gás de proteção), ambos de liga ferro-cromo-carbono, cujos dados encontram-se apresentados na Tabela 1, a seguir. Segundo Lima & Ferraresi (2010), o arame utilizado apresenta uma boa resistência ao desgaste abrasivo de baixa tensão, por ensaios em Roda de Borracha. O seu desempenho teria sido superior a outros arames tubulares contendo nióbio ou titânio, além do cromo e carbono.

Tabela 1 - Consumíveis utilizados

Consumível	Fabricante	Dimensões (mm)	Composição Química (%)					
			C	Si	Mn	Cr	S	P
AT	Eutetic	1,6	4,11	0,20	0,52	23,00	-	-
ER	Eutetic	4	5,10	1,25	0,75	44,00	0,025	0,00

AT = Arame tubular; ER = Eletrodo Revestido.

2.3. Construção e montagem das Facas Picadoras

As facas foram construídas em chapa de aço SAE 1010-1020, com dimensões de 25 x 190 x 580mm, sendo montado por soldagem, um mancal de deslizamento em uma das extremidades. Na extremidade oposta foi usinado um bisel por chanframento com maçarico oxiacetilênico, como pode ser observado na Figura 3. Foram construídas 20 facas novas e revestidas 10 (dez) facas com cada consumível, as quais após numeradas foram balanceadas para se evitar vibração excessiva no

equipamento. O balanceamento foi feito pela retirada de massa do corpo da faca por corte com maçarico, ou adição de material por soldagem com eletrodo revestido E-7018, a partir de um peso padrão (24,400 kg). Posteriormente foram montadas sequencialmente em eixos opostos do picador: facas de 1 a 10, no eixo 1 e facas 31 a 40, no eixo 4. Os demais eixos de um total de 6 (seis) receberam facas já utilizadas, mas revestidas com revestimento novo. O Picador pode ser visto na Figura 2a.

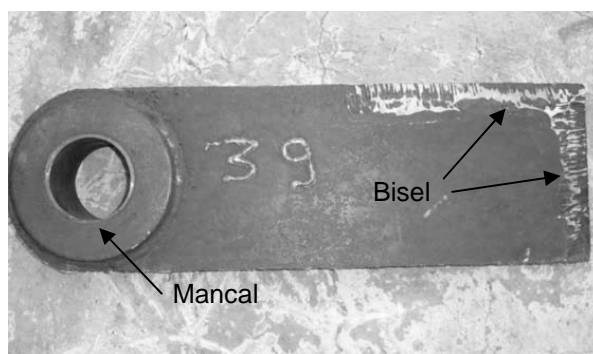


Figura 3 – Detalhe do mancal de deslizamento e bisel da faca.

2.4. Aplicação do revestimento duro

A realização da soldagem com os dois processos foi efetuada manualmente na própria indústria, pelos seus soldadores. Dessa forma, o controle da velocidade de soldagem, do comprimento do arco com eletrodo revestido e da distância bico de contato peça (DBCP) com os arames tubulares, ficou a critério da sensibilidade do soldador, utilizando-se parâmetros de soldagem recomendados pelo fabricante dos consumíveis. Os valores de tensão e corrente foram monitorados e os valores médios apresentados na Tabela 2. A distância bico de contato-peça na soldagem com o arame tubular foi de aproximadamente 35 mm (soldagem manual). Quando o soldador involuntariamente aumentava ou diminuía a altura da tocha isso provocava a instabilidade do arco, forçando-o a procurar manter a tocha em torno dessa altura.

Tabela 2 – Parâmetros de Soldagem

Consumíveis	Facas Nº	Eixo	I_m (A)	U_m (V)
Arame Tubular	01-10	1	227	23,9
Eletrodo Revestido	31-40	4	193	23,3

Onde: Facas Nº = Número das facas soldadas; I_m (A) = Corrente Média; U_m (V) = Tensão Média;

2.5. Avaliação do Desgaste

O desgaste foi determinado pela diferença entre o peso inicial das facas após o balanceamento e o peso final após o ciclo de trabalho, o qual foi obtido após cuidadosa limpeza para a eliminação de resíduos da cana e das sujeiras aderidas pela ação do caldo.

$$Desg = P_{bal} - P_{trab} \quad (1)$$

Onde:

$Desg$ = Desgaste sofrido (Kg);

P_{bal} = Peso após o balanceamento (Kg);

P_{trab} = Peso após o ciclo de trabalho (Kg).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 ilustra a superfície da faca de nº 31, revestidas com eletrodo revestido, permitindo verificar o seu perfil após a aplicação do revestimento duro e após o período de trabalho, responsável pelo desgaste da mesma, principalmente na região de encontro do gume frontal e gume superior, a área mais solicitada. A linha tracejada indica o perfil original da ferramenta.

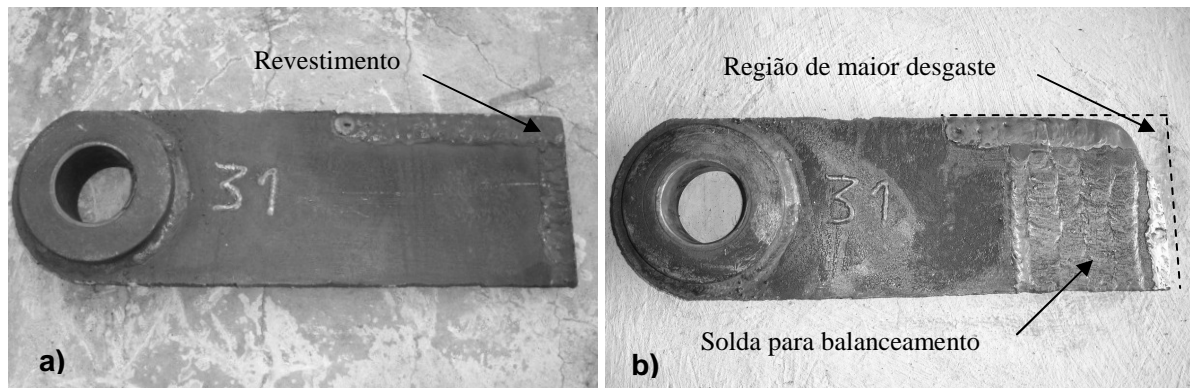


Figura 4 – Detalhe de faca antes e após o trabalho

A Tabela 3 apresenta os dados de pesagem das ferramentas antes da aplicação do revestimento (P_i), após a aplicação (P_f), após o balanceamento (P_{bal}) e após o ciclo de trabalho (P_{trab}), além da quantidade de material perdido por desgaste ($Desg$) após o período de operação da facas na indústria.

Tabela 3 – Dados de pesagens por faca.

Faca Nº	P_i (Kg)	P_f (Kg)	P_{rev} (Kg)	P_{bal} (Kg)	P_{trab} (Kg)	$Desg$ (Kg)
1	24,217	24,771	0,554	24,400	23,275	1,125
2	24,207	24,931	0,724	24,421	23,015	1,406
3	24,452	25,107	0,655	24,441	22,931	1,510
4	23,950	24,645	0,695	24,402	23,200	1,202
5	24,241	25,081	0,840	24,400	23,137	1,263
6	24,286	25,041	0,755	24,441	22,895	1,546
7	24,281	24,995	0,714	24,417	22,774	1,643
8	24,467	25,191	0,724	24,445	22,210	2,235
9	23,991	24,745	0,754	24,426	22,424	2,002
10	24,417	25,186	0,769	24,436	22,495	1,941
...						
31	23,671	24,067	0,396	24,421	23,641	0,780
32	24,431	25,117	0,686	24,426	23,631	0,795
33	24,000	24,395	0,395	24,431	23,595	0,836
34	24,362	24,800	0,438	24,400	23,174	1,226
35	23,752	24,686	0,934	24,445	23,750	0,695
36	24,271	24,676	0,405	24,407	23,450	0,957
37	23,971	24,426	0,455	24,426	23,591	0,835
38	23,802	24,281	0,479	24,431	23,374	1,057
39	24,212	24,512	0,300	24,417	22,719	1,698
40	24,002	24,407	0,405	24,407	23,031	1,376

P_i = Peso antes da aplicação do revestimento duro; P_f = Peso final após a aplicação do revestimento duro; P_{rev} = Peso do revestimento duro; P_{bal} = Peso após o balanceamento; P_{trab} = Peso após o ciclo de trabalho; $Desg$ = Peso do material perdido por desgaste.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados dos valores médios de Peso do revestimento aplicado (P_{rev-m}) e do Desgaste ($Desg-m$) por consumível e os respectivos Desvios Padrão. A Figura 5 ilustra esses valores, sendo que a Figura 5a apresenta os valores médios, permitindo observar que o

peso médio do revestimento aplicado por faca foi maior para o arame tubular que para o eletrodo revestido (Figura 5a). O mesmo ocorre quanto ao desgaste médio do revestimento, menor para o eletrodo revestido, o que pode ter ocorrido em função do maior percentual de cromo e carbono, como demonstrado pela Tabela 1.

Tabela 4 – Resultados médios de peso do revestimento e desgaste

Consumíveis	Faca N°	<i>Prev-m</i> (kg)	DP	<i>Desg-m</i> (kg)	DP
Arame Tubular	01 a 10	0,718	0,076	1,572	0,369
Eletrodo Revestido	31 a 40	0,439	0,185	1,113	0,319

Onde: *Prev-m* = Peso médio de revestimento por consumível; *Desg-m* = Desgaste médio das facas por consumível.

Outro detalhe que pode ser observado na Tabela 4.2 é com relação ao material perdido por desgaste superior ao peso do metal aplicado, demonstrando que teria ocorrido, além da perda de parte do revestimento, também parte do substrato, especialmente no ponto de encontro do gume frontal com o gume superior das facas, a região mais solicitada das ferramentas durante a operação. Isso pode ser observado também na ilustração da Figura 4.

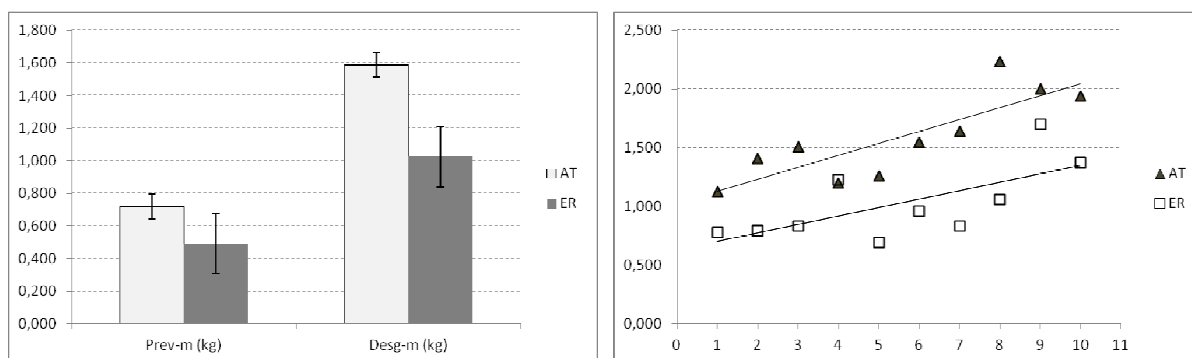


Figura 5 – Desgaste por faca (a) e valores médios de peso do revestimento e desgaste

A Figura 5b ilustra, com os dados da Tabela 3, o desgaste (*Desg*) por faca, para os dois consumíveis (posição 1 a 10 do picador, ou seja, facas 1 a 10 revestidas com o arame tubular e facas 31 a 40 revestidas com o eletrodo revestido). Além do desgaste superior para as facas revestidas com o arame tubular verifica-se, ainda, uma tendência de maior desgaste para as facas posicionadas mais à direita do picador, considerando um observador posicionado à frente do mesmo, no sentido de saída da cana picada. Esse fato pode estar relacionado com a presença de maior concentração de material abrasivo e maior concentração de cana nessa região, tendo em vista ser esse o lado de descarregamento da cana na mesa alimentadora da indústria, como destacado por Lima & Ferraresi (2006).

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com este trabalho, com a aplicação manual de revestimento duro e a avaliação de desgaste em condição real de trabalho em indústria sucroalcooleira permite concluir que:

- O peso do revestimento aplicado com arame tubular foi superior ao aplicado com o eletrodo revestido;
- O desgaste foi superior nas facas revestidas com arame tubular que nas facas revestidas com eletrodo revestido;
- No período analisado, a perda de metal da faca foi superior à quantidade de revestimento aplicado, demonstrando a ocorrência de perda de substrato;



- O desgaste das facas foi maior nas facas posicionadas à direita do picador (vista frontal), lado de descarregamento da cana.

Outros trabalhos poderão ser feitos com os mesmos consumíveis em soldagem automatizada ou mesmo com eletrodos revestidos e arames tubulares com diferentes composições químicas, visando ampliar os conhecimentos nessa área.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG pelas condições materiais e infraestruturais para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AWS. **Welding Handbook – Welding Technology**, American Welding Society, Vol. 1, 8th Edition, Miami, USA, 1991. p. 350-383.

BRANDI, S.; MELLO, F. D. H. de; WAINER, E. **Soldagem Processos e Metalurgia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1992.

LIMA, A. C. e WINCK, L. B. Análise Comparativa de Dois Eletrodos Revestidos Utilizados na Aplicação de Revestimentos Duros em Facas Picadoras de Cana-de-Açúcar. XXXII CONSOLDA – CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, Belo Horizonte, MG. 2 a 5 de outubro, 2006.

LIMA, A. C. e FERRARESI, V. F. V. F. Desgaste em equipamentos de processamento da cana-de-Açúcar em destilaria de álcool. 16 POSMEC – SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, UFU-MG, Uberlândia. 2 a 5 de outubro, 2006.

LIMA, A. C. e FERRARESI, V. F. Análise da Resistência ao Desgaste de Revestimento Duro Aplicado por Soldagem em Facas Picadoras de Cana-de-Açúcar. **Soldagem e Inspeção**, v. 15, p. 94-102, 2010.

LIMA, A. C. e FERRARESI, V. F. Analysis of Microstructure and Wear Strength of Hardfacing Used by the Sugar and Alcohol Industry. **Welding International**, v. 24, p. 834-843, 2010.

MARQUES, P. V. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

SIFAEG – SINDICATO DAS INDÚSTRIAS DE FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE GOIÁS, Disponível em <http://www.sifaeg.com.br/index.html>. Acesso em 23/05/2012.

ÚNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, Disponível em <http://www.unica.com.br/content/default.asp?>. Acesso em 26/06/2012.

WAINER, E. M. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1992.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and wear of engineering materials**. CRC Press Inc., Boca Raton, USA, 273 p, 1992.

MARTINS FILHO, A. S. **Soldagem de Revestimentos com Arame Tubular**. Universidade Federal de São Carlos. Dissertação de Mestrado. 1995, 93 p.