

AValiação da Resistência à Abrasão por Impacto de Revestimento Duro Depositado pelo Processo de Aspersão Térmica por Arco Elétrico

Pedro Polato Bites Costa, pedro.bites@gmail.com¹

Walter Nikkel, eng.nikkel@gmail.com¹

Gustavo Bavaresco Sucharski, gustavobavaresco@gmail.com¹

Ramón Sigifredo Cortés Paredes, ramon@ufpr.br¹

¹Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PG-Mec), Bloco IV do Setor de Tecnologia, Centro Politécnico da UFPR, Bairro Jardim das Américas, Caixa Postal 19011, CEP 81531-980, Curitiba, Paraná, Brasil.

Resumo: No Brasil há elevada produção de combustível automotivo derivado da cana de açúcar, cuja colheita é realizada de forma mecanizada, onde são utilizadas facas de corte, geralmente sem revestimento e com pouca durabilidade. Esta situação gera uma demanda deste tipo de facas, que está aumentando permanentemente pelo aumento da produção de cana de açúcar. Está pesquisa tem como motivação investigar a viabilidade de aumentar a vida útil de facas de corte pela aplicação de revestimentos duros via o processo de aspersão térmica por arco elétrico com arame tubular. Foram preparados revestimentos em facas de acordo a planejamento experimental fatorial fracionado, com nove experimentos e testes de confirmação. Também foi realizado tratamento térmico posterior. Foi realizada uma ampla caracterização das propriedades mecânicas e microestruturais, assim como desgaste por abrasão com impacto em equipamento fabricado no âmbito desta pesquisa. Os resultados obtidos mostraram a viabilidade de melhorar a vida útil das facas através de aplicação de revestimento duro por aspersão térmica por arco elétrico e posterior tratamento térmico de caldeamento e austêmpera.

Palavras-chave: abrasão, impacto, revestimento duro

1. INTRODUÇÃO

A colheita de cana de açúcar mecanizada é uma atividade expressiva no Brasil com elevado índice de crescimento, Lima (2008). A colhedora corta os colmos da cana de açúcar rente ao chão pelo sistema chamado de corte de base. A condição de abrasividade, devido à presença da terra, com partículas de areia e pedras na área de corte, causa desgaste expressivo nos gumes de corte das lâminas.

Este estudo realizado neste trabalho contribui para melhorar a deposição de revestimentos duros em facas do corte de base fabricados com aços austemperados, através do processo de aspersão Térmica - AT por arco elétrico – ASP e com a aplicação de arame tubular à base de aço, preenchido com partículas de carbeto de tungstênio. Os processos de AT, em especial o processo ASP, combina as etapas de fusão, rápido transporte e resfriamento do material de consumo, apresentando boa aderência ao substrato. A formação do revestimento, é um processo que produz finas microestruturas lamelares, diferente daquelas nos materiais convencionais (PAREDES, 2012). Ainda segundo Buchanan et al., (2008) é possível conseguir um revestimento aspergido com desempenho similar à revestimentos soldados, em relação ao desgaste abrasivo

Para um trabalho experimental justifica-se o uso de ferramentas estatísticas que auxiliem seu planejamento e tomada de decisão. Uma dessas ferramentas é o método de Taguchi, que é um método de desenho de experimentos que permite avaliar como diferentes parâmetros afetam a média e a variância de uma característica de desempenho do revestimento. O delineamento de experimentos proposto por Taguchi envolve o uso de matrizes ortogonais, para organizar os parâmetros que participam do processo, e os níveis, que devem ser variados, permitindo a coleta de dados necessários para determinar quais os fatores que mais afetam a qualidade do produto, com uma quantidade mínima de experimentos, poupando assim, tempo e recursos (LIRA, 2012; ROY, 2001; TAGUCHI et al., 1990). A análise da variância sobre os dados coletados, a partir do desenho de experimentos, pode ser usada também para testes de confirmação, ou seja, para otimizar a característica de desempenho (LIRA, 2012). Entre os arranjos previstos o que se adapta ao interesse deste estudo é o arranjo ortogonal L9, que permite trabalhar com 4 fatores e 3 níveis cada.

O objetivo desta pesquisa é otimizar os processos de deposição de revestimentos duros por AT por ASP visando o aumento da resistência por abrasão com impacto. Para tanto foram estudados os mecanismos que atuam na deposição de revestimentos e sua relação com os parâmetros do processo ASP e com as características da microestrutura e da morfologia das camadas depositadas, bem como sua coesão e aderência ao substrato. Tecnologicamente, o incremento na produtividade da máquina colhedora é um benefício gerado pela redução de paradas para a troca de facas. E a diminuição de consumo de aço usado na fabricação das facas é outro benefício tecnológico, devido a maior durabilidade das peças e

a consequente menor necessidade de substituição. Outro benefício será a melhoria da qualidade de corte dos colmos de cana de açúcar, pelo gume de corte mantendo-se afiado por mais tempo, evitando-se o abalo à soqueira da planta de cana para proporcionar uma rebrota melhor.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

Foram utilizadas facas de corte dos aços AISI 10B38 e AISI 5160. A Fig. (1) mostra o modelo de faca utilizado nos experimentos neste trabalho. O revestimento será uma camada dura depositada na face inferior da faca, com espessura entre 300 a 400 µm. As composições químicas destes materiais são mostradas na Tab. (1).

Tabela 1. Composição química dos materiais utilizados.

Materiais	Elemento químico (% em peso)									
	Fe	C	Mn	B	Cr	Si	P	S	Co	W
Substrato		0,35	0,6	0,0005		0,15	0,03	0,04		
Aço 10B38*	Bal.	0,42	0,9	0,003	-	0,3	(máx)	(máx)	-	-
Substrato		0,56	0,75		0,7	0,15	0,03	0,04		
Aço 5160*	Bal.	0,64	1	-	0,9	0,3	(máx)	(máx)	-	-
Arame		2,8	-	-	-	-	-	-	0,14	39,77
Durmat AO Br**	Bal.									

* Fonte: BLUE Blade Steel (2016). ** Fonte: Catálogo do fabricante Durum do Brasil.

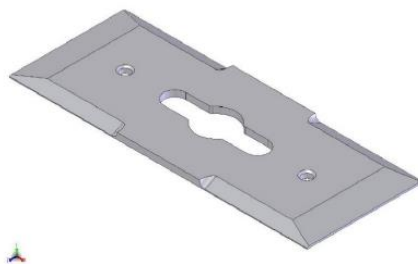


Figura 1. Modelo de faca tipo lâmina nova sem revestimento.

As lâminas conformadas e chanfradas foram submetidas a tratamento térmico por austêmpera, onde são aquecidas inicialmente a 867 °C, logo são então austemperadas em banho de sal líquido a 278 °C durante 20 minutos. Em seguida, as lâminas são resfriadas ao ar. As facas apresentam dureza elevada, na faixa de 50 a 58 HRC após tratamento térmico de austêmpera, isso mantém a tenacidade suficiente para desempenho satisfatoriamente como faca de corte. Ambos substratos foram testados em testes de abrasão por Nikkel (2016), na condição sem revestimento, e apresentaram comportamento similar de resistência ao desgaste abrasivo com impacto.

2.2. Atividades Experimentais

2.2.1. Preparação das superfícies e deposições por aspersão térmica ASP

As amostras de facas de corte foram preparadas através de jateamento abrasivo com partículas de óxido de alumínio, granulometria 20 mesh, por 5 minutos. Com esse processo foi possível obter a superfície adequada, enquanto limpeza e rugosidade do substrato para a aplicação dos revestimentos. O abrasivo utilizado foi o TBR 20 ANSI/FEPA da marca Elfusa Geral de Eletrofusão Ltda. A limpeza da lamina de corte foi avaliada conforme norma ISO 8501-1 e NACE-3 até Sa3. Nesta etapa também se obtém uma superfície rugosa para facilitar a aderência do revestimento durante a deposição. Também foram utilizados corpos de prova cilíndricos do aço ao carbono 1020 com 25,4 mm de diâmetro e 25,4 mm de comprimento, conforme a norma ASTM – C633/01 para avaliar a aderência por tração.

Para as deposições utilizou-se o processo de aspersão térmica por arco elétrico (ASP – Arc Spray), para a deposição da liga em estudo, com o auxílio de uma fonte *Eutronic Arc Spray*, modelo número 4. Os parâmetros utilizados como variáveis de deposição do processo apresentados na Tab. (2). Os parâmetros de tensão, corrente e pressão foram baseados nos recomendados pelo fabricante do arame e limitados pela estabilidade do jato de aspersão, que é inerente ao próprio processo de deposição, ou seja, foram testados os valores de níveis dos parâmetros que apresentavam boa estabilidade de

deposição, sem interrupções do fluxo de aspersão. A deposição foi de acordo com a Norma 2568 da Petrobrás, depositando uma primeira camada horizontal e a seguinte vertical, e sucessivamente até atingir a espessura desejada.

Tabela 2. Parâmetros e níveis utilizados na aspersão térmica.

Parâmetros	Níveis
Tensão (V)	30
Corrente (A)	180, 200 e 220
Distância (mm)	100, 200 e 300
Pressão (MPa)	0,3; 0,4 e 0,5
Pré-aquecimento (°C)	150, 250 e 350

2.2.2. Planejamento experimental

Para a análise de influência de parâmetros foi utilizado o planejamento experimental de Taguchi, com arranjo ortogonal L9, onde é possível estudar 4 fatores com 3 níveis cada. O arranjo selecionado permitirá observar quais fatores são significativos e apresenta qual é o fator de maior influência para a resposta e a análise gráfica permitir identificar qual é o melhor nível de cada fator. Para tanto é necessário um teste de comparação entre níveis, sendo este chamado de teste de diferença significativa (*Honestly Significant Difference - HSD*) de Tukey.

Todas as análises citadas foram realizadas com o auxílio de um software de análise estatística, o Minitab® 16.1.0, o qual permite realizar diretamente o planejamento de Taguchi, bem como facilita a construção dos gráficos. Os revestimentos por ASP foram conduzidos conforme parâmetros apresentados na Tabela 2. Na Tab. (3) são apresentados estes parâmetros no arranjo ortogonal L9, ou seja, são definidas 9 combinações (testes) de fatores e níveis utilizados.

Tabela 3. Parâmetros utilizados para aspersão segundo metodologia Taguchi L9.

Teste	Corrente (A)	Distância (mm)	Pressão (MPa)	Pré-aquecimento (°C)
1	180	100	0,3	150
2	180	200	0,4	250
3	180	300	0,5	350
4	200	100	0,4	350
5	200	200	0,5	150
6	200	300	0,3	250
7	220	100	0,5	250
8	220	200	0,3	350
9	220	300	0,4	150

Para as atividades de AT das facas e dos corpos de prova para as medições de aderência foram controladas a umidade ambiental (inferior a 70%) segundo norma 2568. O preaquecimento foi realizado com maçarico a chama utilizando gás propano, e o controle da temperatura mediante medidor infravermelho tipo Fluke 63 de marca Fluke.

2.3. Caracterização dos revestimentos

Os ensaios de aderência do revestimento ao substrato forma de acordo a norma ASTM C633, onde as preparações dos corpos de prova foram realizadas utilizando um gabarito de posição e colados com adesivo a base de epóxi, Araldite Profissional. O ensaio foi realizado no equipamento da marca Instron, modelo 4467.

As medições de microdureza dos corpos de prova foram realizadas em amostras embutidas com baquelite marrom, lixadas e polidas, conforme os procedimentos descritor na norma ASTM E1920-03 (2008). Foram feitas 5 indentações, sem espaçamento pré-definido, mas tomando cuidado de fazer as marcações em fases diferentes, verificada pela diferença na coloração em cada corpo de prova. A carga aplicada foi de 0,3 kg por 15 segundos, o equipamento utilizado foi o HMT Shimadzu.

As medições da porosidade e teor de óxidos foram realizadas nas mesmas amostras metalográficas, nas seções transversais dos revestimentos. A análise de imagens para quantificar o percentual de poros e fração em área de óxidos foi realizada através da técnica de “threshold”, em imagens de MEV, conforme a norma ASTM E2109 (2014).

As caracterizações morfológicas dos revestimentos foram feitas por microscopia eletrônico de varredura (MEV) modelo XL30 da marca Philips. As morfologias dos revestimentos foram analisadas com tensão de aceleração de 20 kV, altura de 15 mm e com os detectores BSE (elétrons retro espalhados).

As análises de composição química, semi-quantitativa, foram realizadas por microanálise de energia dispersiva (EDS) utilizando detector de energia dispersiva de raios X marca EDAX, acoplados ao MEV. Para o mapeamento da distribuição da composição química na microestrutura foi utilizado a técnica de mapeamento por EDS.

2.4. Teste por abrasão com impacto

No trabalho de Nikkel (2016), foi desenvolvido e fabricado uma máquina de teste para avaliar a resistência à abrasão com impacto de revestimentos, simulando as condições de trabalho no campo, com o projeto construtivo baseado no artigo do Franek et al., (2009). A Fig. (2) mostra o equipamento de teste de abrasão com impacto. Neste equipamento foram realizados os testes de abrasão com impacto, onde os corpos de prova estão montados um rotor interno que gira com rotação maior (650 rpm), já o tambor externo que gira em baixa rotação (60 rpm). O tambor é carregado com uma quantidade definida de abrasivo e é responsável por um fluxo contínuo de partículas abrasivas impactando os corpos de prova em alta velocidade. Assim, as partículas abrasivas atingem a superfície das amostras com velocidade aproximada de 10 m/s.

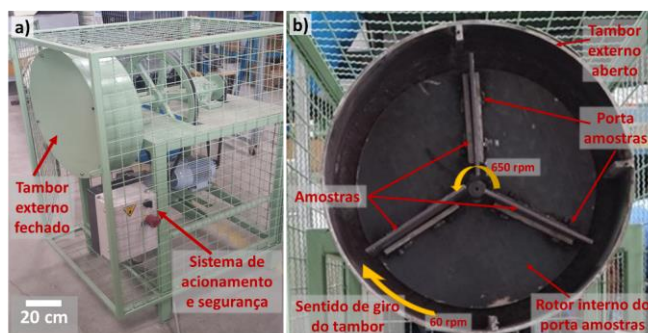


Figura 2. Equipamento de teste de abrasão com impacto construído pelos autores com base em FENEK et al., (2009). a) visão geral. b) detalhe do tambor de ensaio.

Inicialmente as amostras foram testadas com alto ângulo (90°). As amostras (três cada vez) foram testadas durante 3 minutos. Cada teste foi repetido quatro vezes, totalizando 12 minutos, para verificação de eventuais tendências. Foram utilizadas partículas de pedra britada com tamanho médio de 8 mm. O desgaste gerado pelo ensaio de abrasão com baixo ângulo (0°), que simula a condição real das facas do corte de base de colhedoras de cana, também foi analisado em função da área desgastada. Neste teste, o valor de área considerada desgastada foi obtido pela diferença entre a condição antes do teste e após tempos pré-determinados de ensaio de desgaste com impacto.

Após as análises dos resultados do estudo de otimização dos parâmetros de deposição, e ainda, considerando as falhas observadas no desgaste abrasivo com impacto em baixo ângulo, novos revestimentos foram aplicados com duas finalidades: estudar o efeito dos parâmetros sobre a quantidade e distribuição dos carbonetos de tungstênio (WC) na microestrutura; e estudar o efeito do tratamento de aquecimento sobre a aderência dos revestimentos quando submetidos ao ensaio de abrasão com impacto de baixo ângulo.

2.4.1. Quantificação de carbonetos de tungstênio WC na microestrutura

Considerando a relação direta entre a quantidade dos WC e o desempenho no ensaio de desgaste, foram realizados novos testes para verificar a influência dos parâmetros de deposição sobre a quantidade de WC. Para isso foi alterado o planejamento experimental, variando a tensão de 30 V para 40 V, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de deposição para estudo da quantificação de WC.

Teste	Corrente (A)	Pressão (MPa)	Tensão (V)	Pré-aquecimento (°C)	Distância (mm)
10	70	0,3	40	250	200
11	70	0,4			
12	130	0,3			
13	130	0,4			
14	100	0,35			

Os valores de corrente foram redefinidos em função da estabilização do jato de aspersão, para o maior e menor valor, bem como um valor médio. O valor da tensão influencia diretamente no tamanho do arco elétrico, ocorrendo alterações no tamanho das partículas do jato de aspersão, GRASME (1990).

A caracterização foi feita por análise de imagens, com uma técnica similar a utilizada na caracterização da porosidade. Pela técnica de “threshold”, sobre imagens de MEV-BSE (alto contraste entre as fases metálicas e cerâmicas (WC)), foi

associada uma cor às áreas correspondentes aos carbonetos e calculado sua área relativa. Os carbonetos foram previamente caracterizados por EDS como sendo áreas ricas em tungstênio, sem a presença de ferro.

2.5. Caldeamento do revestimento

O caldeamento foi realizado para melhorar a aderência dos revestimentos aspergidos (reduzir teor de óxidos, porosidade e facilitar a difusão de constituintes do revestimento para o substrato), porém foi previsto que poderia ocorrer perda de dureza do substrato, portanto, também foi realizado a recuperação da dureza por tratamento térmico posterior de austêmpera. O caldeamento foi realizado aquecendo-se o revestimento por chama oxiacetilênica redutora até temperatura entre 1200 °C e 1300 °C. Procedimento observado na Fig. (3).

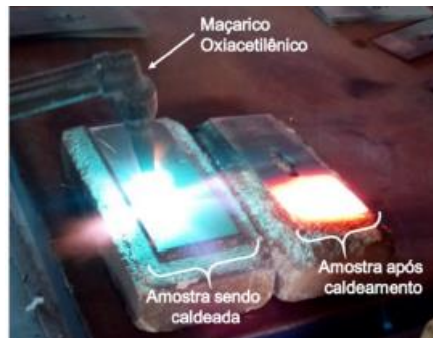


Figura 3. Processo de caldeamento com chama oxiacetilênica.

O caldeamento foi feito sobre o teste 13, conforme Tab. (4), devido a suas características morfológicas e ao seu desempenho no teste de desgaste de abrasão com impacto, somente como aspergido. Foi feita a caracterização da morfologia deste revestimento caldeado, bem como a análise da área desgastada após ensaio de desgaste. Neste caso, também foi avaliado a microdureza do substrato, sendo as medições realizadas na face oposta da revestida, antes e após a aplicação do revestimento, após o caldeamento e após tratamento térmico de austêmpera.

3. RESULTADOS

3.1. Análise microestrutural

Na Fig. (4) e (5) são apresentadas as imagens dos revestimentos obtidos e são apresentados os mapas de composição química, obtidos por EDS, onde é possível distinguir as diferentes regiões dos revestimentos pela presença dos principais elementos químicos da liga utilizada, ou seja, regiões em verde são ricas em ferro (Fe), em amarela são tungstênio (W), em azul e vermelho são as regiões com oxigênio (O), indicando as regiões de óxidos entre as lamelas.

Nos Testes 1 ao 3, na Figura 4), é possível observar que ocorre o aumento de espessura de lamelas e um aumento da quantidade de partículas arredondadas (solidificadas e resfriadas durante o transporte até o substrato), isso está diretamente relacionado com o parâmetro de distância, que conforme aumenta, diminui a velocidade das partículas no instante do impacto, associado há uma pequena redução de temperatura de partículas, fazendo com que seja reduzido a molhabilidade, mesmo para temperaturas de pré-aquecimento maiores.

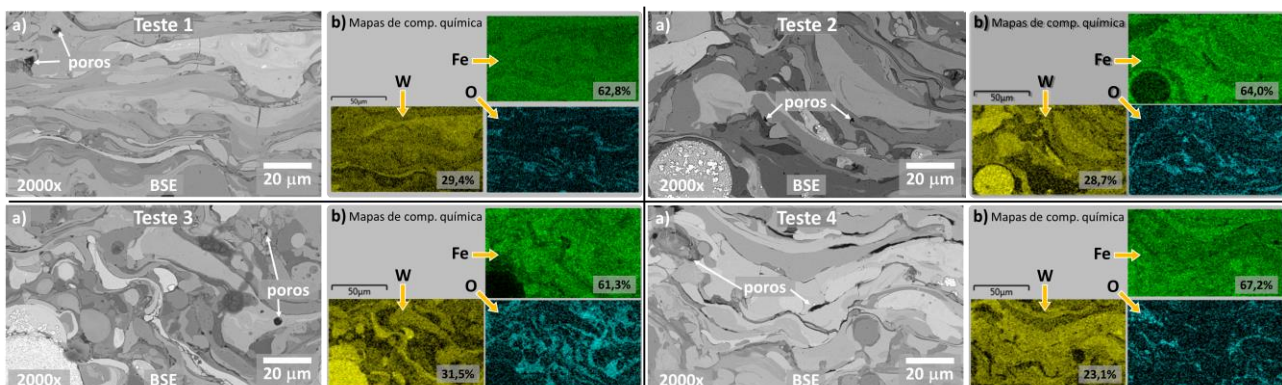


Figura 4. Testes 1 ao 4: Morfologia da microestrutura dos revestimentos. Em a) imagens por MEV-BSE, em b) mapas das composições químicas (Fe, W e O) por EDS da mesmas regiões de a).

O Teste 4, na Fig. (4), apresenta uma morfologia com lamelas mais espessas e bem alongadas, há a presença de poros, formação de finos óxidos entre as lamelas, também apresenta a formação de vazios entre lamelas; a falta de regiões com grande concentração de W, bem como a distribuição homogênea deste elemento sugere que os carbonetos foram diluídos durante a deposição.

O Teste 5, na Fig. (5), apresenta uma morfologia com lamelas mais finas e de maior comprimento, há pequena quantidade de poros e óxidos; há regiões com grande concentração de W, indicando a presença de carbonetos, também há formação de lamelas longas ricas neste elemento, bem como a presença deste em mais regiões, indicando que uma parte dos carbonetos foram diluídos durante a deposição. Os Testes 6, 7 e 8, na Fig. (5) apresentam uma morfologia similar no fato em que em nenhum dos casos nota-se difusão dos WC na matriz, sendo sua presença somente notada na forma de carbonetos não difundidos.

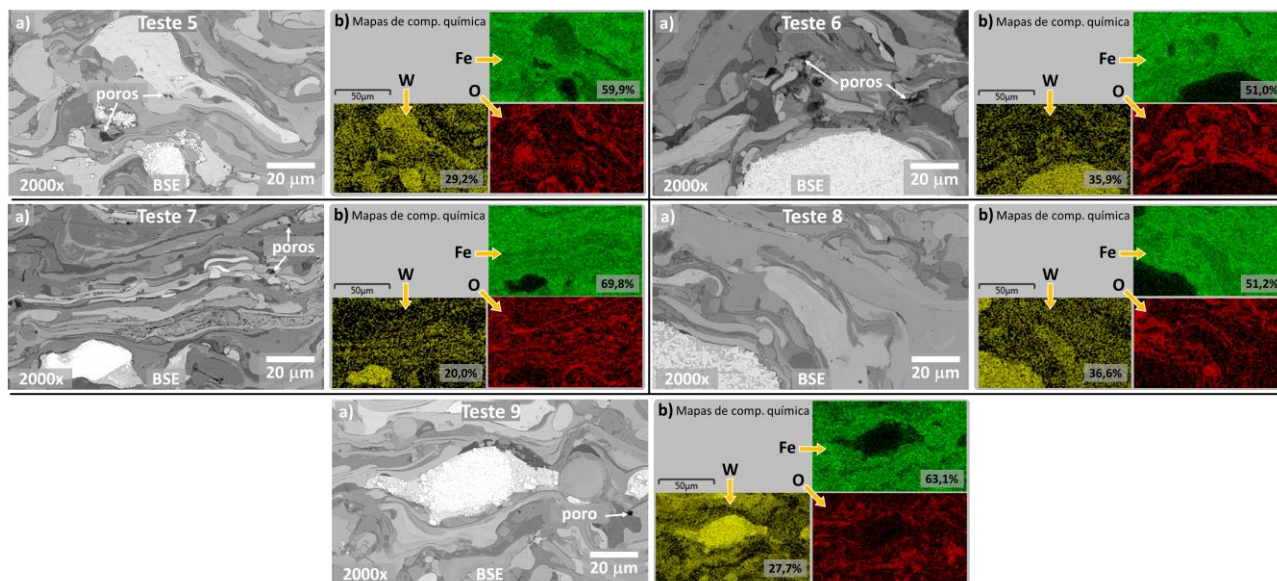


Figura 5. Testes 5 a 9: Morfologia da microestrutura dos revestimentos. Em a) imagens por MEV-BSE, em b) mapas das composições químicas (Fe, W e O) por EDS da mesmas regiões de a).

O Teste 9, na Fig. (5) apresenta uma morfologia com lamelas finas e alongadas, com algumas partículas esféricas, há pequena quantidade de poros e há presença de óxidos interlamelares; há regiões com grande concentração de tungstênio, indicando a presença de carbonetos, e ainda, pouca presença deste elemento em outras regiões, porém a distribuição deste elemento em algumas lamelas sugere que uma parcela dos carbonetos foi diluída durante a deposição.

3.1.1. Análise das influências dos parâmetros de aspersão

Foram analisadas as influências de todos os parâmetros de deposição sobre a porosidade do revestimento, teor de óxidos, aderência e desgaste abrasivo por impacto de 90°. As análises foram feitas através do ranqueamento dos fatores obtidos pela média e desvio padrão dos grupos, além do método de comparação de médias de Tukey. A Tab. (5) apresenta o resumo dos parâmetros individuais que retornaram o melhor resultado para cada categoria, o que permitiu estimar um parâmetro ótimo de deposição (Parâmetro Taguchi).

Tabela 5. Resumo dos resultados das análises de parâmetros.

	Corrente (A)		Distância (mm)		Pressão (M Pa)		Pré-aquec. (°C)	
	Ranq	Nível	Ranq	Nível	Ranq	Nível	Ranq	Nível
Porosidade	1	220	2	200; 300	3	0,3; 0,5	4	150, 250
Teor de óxidos	1	180, 220	2	100; 200	3	0,4; 0,5	4	150, 350
Aderência	1	180	3	100; 200	2	0,3	4	150, 350
Desgaste	1	180, 220	2	100	3	0,4	4	150, 350
Parâmetro Taguchi	1	220	2	100	3	0,4	4	150

A tomada de decisão para o conjunto final de parâmetros foi baseada nos valores sugeridos na Tab. (5) e na relevância de cada propriedade medida, principalmente o ensaio de desgaste. Sendo assim, o valor de corrente de 220 A foi escolhido

pois apresenta tendência de redução de porosidade e melhoria do desempenho no teste de desgaste. A distância de 100 mm por indicar uma forte tendência de redução do desgaste. Assim como para a pressão de 0,4 MPa. O valor de pré-aquecimento não se mostrou tão significativo, sendo o valor de 150°C por ser mais viável de aplicar.

3.1.2. Resistência ao desgaste abrasivo com impacto

Pela análise microestrutural foi possível observar que os parâmetros de deposição influenciam no tempo de solidificação e, consequentemente, na difusão dos carbonetos na matriz ferrosa, assim como sua distribuição. A partir desta conclusão, julgou-se necessária buscar uma relação entre o desgaste e o teor de carbonetos no revestimento.

Para isso foram feitas contagens percentuais de carbonetos (utilizando a técnica “threshold”), sendo então esses valores comparados com o desgaste em massa das facas (Fig. (6)). Fica claro que o aumento da porcentagem de carbonetos aumenta a resistência ao desgaste abrasivo por impacto.

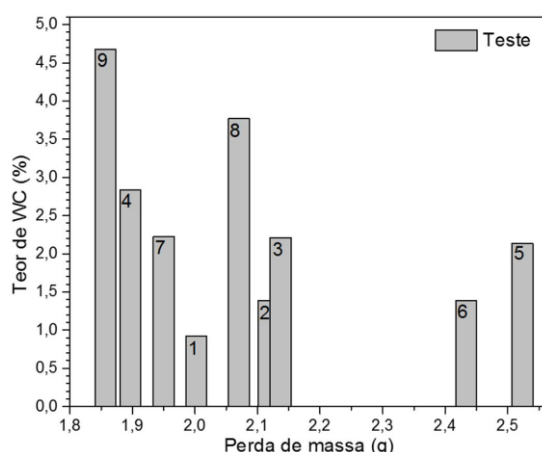


Figura 6. Relação entre perda de massa e teor de WC.

A partir das análises dos resultados optou-se por novos testes aumentando a tensão (V) de deposição, gerando assim os testes 10 a 14, sendo 13 (tensão 40 V e corrente 130 A) o teste com maior porcentagem de WC (6,26% contra 4,75% do teste 9). Isso é explicado pelo aumento da energia do processo, o que garante maior diluição dos carbonetos na matriz ferrosa.

A Fig. (7) mostra os principais resultados do ensaio de desgaste abrasivo com impacto de baixo ângulo (0°), inicialmente foram realizados nos testes 4, 9, que obtiveram os melhores resultados no ensaio de desgaste. Também foi testada a combinação Taguchi, para comparação. Todas as facas sofreram deslocamento do revestimento após 5 minutos de ensaio. Em seguida foi testada o teste 13, porém com o mesmo resultado. Percebeu-se que a aderência dos revestimentos não era suficiente para a nova condição de ensaio, devido às forças trativas causadas na borda do revestimento. Para aumentar a aderência do revestimento foi realizado o caldeamento das facas do teste 13. Após novos ensaios com as facas caldeadas foi observado a ausência de deslocamento, mesmo após 30 minutos de ensaio (Fig. (7)). Isso se deve a aderência metalúrgica, que pode ser comprovada pelo EDS em linha da Fig. (8).

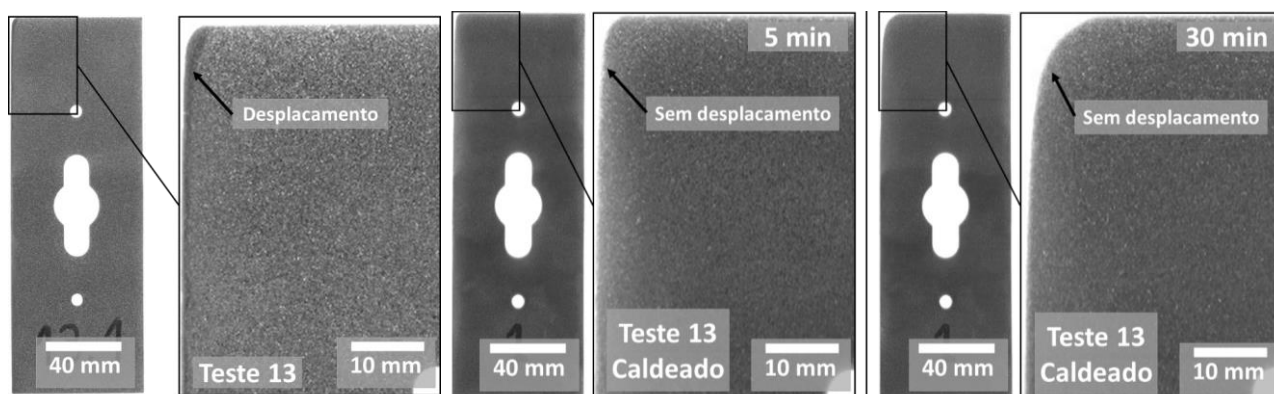


Figura 7. Aspecto das facas do teste 13 após ensaio de desgaste abrasivo com impacto de baixo ângulo.

O ciclo térmico envolvido no processo de caldeamento é suficiente para alterar a microestrutura do substrato, porém não há na bibliografia referências sobre caldeamento de camadas de revestimento duro aspergidas por AT que foram reaquecidas para a melhoria da aderência, sem haver refusão.

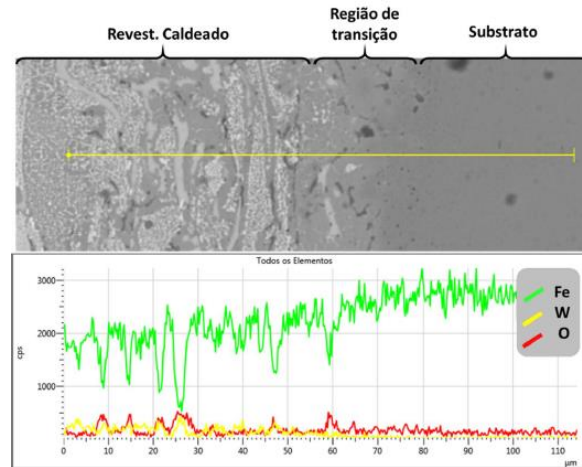


Figura 8. Análise de composição química por EDS em linha na região de interface do teste 13 caldeado.

Os resultados de microdureza do substrato, apresentados no gráfico da Fig. (9), mostram como o caldeamento reduziu a dureza do substrato do aço 10B38, independente do tratamento térmico posterior realizado.

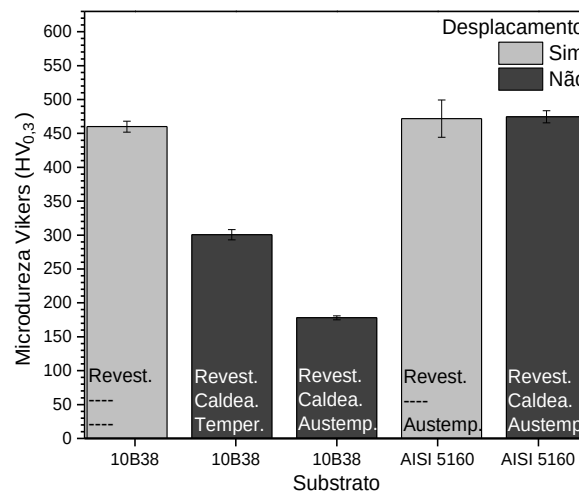


Figura 9. Resultados de microdureza vickers dos substratos dos aços 10B38 e AISI 5160

No entanto, a substituição do aço 10B38 pelo AISI 5160 na confecção dos substratos (facas), permitiu que o tratamento térmico posterior de austêmpera recuperasse a dureza do substrato após o procedimento de caldeamento do revestimento. A melhor condição para resistir ao desgaste é o aço AISI 5160 revestido, caldeado e austemperado.

4. CONCLUSÕES

Para as condições experimentais deste trabalho, é possível concluir que:

- O planejamento experimento de Taguchi permitiu estudar a influência dos parâmetros de deposição, dando suporte para definir as condições de deposição que produziram o revestimento com as melhores características de morfologia e distribuição de WC.
- Os revestimentos na condição de como aspergido apresentam bom desempenho de resistência ao desgaste por abrasão com impacto de alto ângulo (90°), porém, não resistem aos esforços do ensaio realizado com baixo ângulo (0°).
- O tratamento de caldeamento proporcionou uma união metalúrgica entre revestimento e substrato, gerando aderência suficiente para não ocorrer deslocamento durante os testes de abrasão com impacto de baixo ângulo.
- O tratamento de caldeamento produz alterações metalúrgicas que reduzem a microdureza dos substratos utilizados.

- As facas fabricadas com o aço 10B38 não permitem a recuperação de microdureza por tratamento térmico de austêmpera após o tratamento de caldeamento.
- As facas fabricadas com o aço AISI 5160 apresentam níveis de microdureza satisfatório para operação de corte de base de cana, após revestidas, caldeadas e austemperadas.

5. REFERÊNCIAS

- ASTM E1920, 2008, “Standard Guide for Metallographic Preparation of Thermal Spray Coatings. American Standard of Testing Materials”. West Conshohocken.
- ASTM E2109, 2014, “Standard Test Method for Determining Area Percentage Porosity of Thermal Spray Coatings. American Standard of Testing Materials”. West Conshohocken.
- Bleu blade steel, 2016, “Alloy steel strip coil: typical chemical properties”. Disponível em :<http://www.bluebladesteel.com/content.cfm/Materials/AlloySteel/category_id/102/page_id/149>. Acesso em: 02 nov. 2016.
- Buchanan, V.E.; McCartney D.G.; Shipway P. H., 2009, “A comparison of the abrasive wear behavior of iron-chromium based hard faced coatings deposited by SMAW and electric arc spraying”. Wear, v. 264, n. 7-8, p. 542-549.
- Franek, F.; Badisch, E.; Kirchgassner, M., 2009, “Advanced Methods for Characterization of Abrasion/Erosion Resistance of Wear Protection Materials”. FME Transactions, v. 37, n. 2, p. 61-70.
- Grasme, D., 1990, “Arc spraying of aluminium”. Welding and Cutting, v. 8, p. 124-125.
- Lima A. C., 2008, “Análise da resistência ao desgaste de revestimento duro aplicado por soldagem em facas picadoras de cana-de-açúcar”. Tese (Doutorado em Engenharia de Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, UFU.
- Lira, S. A., 2012, “Planejamento de Experimentos”. Apostila. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Paredes, R. S. C., 2012, “Aspersão térmica: Aspersão térmica por arco elétrico”. Curitiba: Universidade Federal do Paraná.
- Roy, R. K., “Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement”. John Wiley & Sons.
- Taguchi, G; Elsayed, E. A.; Hsiang, T. C., 1990, “Engenharia da qualidade em sistemas de produção”. McGraw-Hill.
- Nikkel, W., 2016, “Resistência ao desgaste por abrasão com impacto de revestimentos duros de Fe-WC, em substratos de aço austemperado, depositado por aspersão térmica a arco elétrico, com e sem tratamento térmico”. Tese de doutorado, PGMEC/UFPR.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EVALUATION OF RESISTANCE TO THE IMPACT ABRASION OF HARD COATING DEPOSITED BY ARC SPRAY PROCESS

Pedro Polato Bites Costa, pedro.bites@gmail.com¹

Walter Nikkel, eng.nikkel@gmail.com¹

Gustavo Bavaresco Sucharski, gustavobavaresco@gmail.com¹

Ramón Sigifredo Cortés Paredes, ramon@ufpr.br¹

¹Federal University of Paraná, Post-graduate Program in Mechanical Engineering (PG-Mec), Block IV, Technology Sector, Polytechnic Center of UFPR, Mail Box 17011, ZIP Code 81531-980, Curitiba, Paraná, Brazil

Abstract: In Brazil, there is a high production of automotive fuel derived from sugarcane, which is mechanically harvested, where cutting blades are used, usually uncoated and with little durability. This situation generates a demand for this type of blade, which is increasing permanently by the increase of the production of sugar cane. This research has the motivation to investigate the feasibility of increasing the life time of cutting blades by the application of hard coatings through the tubular wire arc spraying process (ASP). The samples were applied according to the fractional experimental design, with nine experiments and confirmatory tests. Subsequent heat treatment was also performed. A large characterization of the mechanical and microstructural properties was carried out, as well as the abrasion wear behavior with impact. The results showed the feasibility of improving the time life of the blades through the application of hard coating by arc spraying process and post heat treatment of cladding and austempering.

Keywords: abrasion, impact, hard coatings.