

ANÁLISE COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DOS REVESTIMENTOS METÁLICOS WC-CoCr E STELLITE 6 FABRICADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA - HVOF

Lauro Bristot Rosso¹

Luiz Carlos de Cesaro Cavaler²

Resumo: Na indústria cerâmica o desgaste por contato tribológico está presente em boa parte do processo fabril. Um exemplo trata do desgaste ocorrido em válvulas rotativas, situada na descarga dos filtros de manga. Atualmente este componente recebe revestimento por cromo duro, que além de ser um processo ineficiente, necessitando de um alto consumo de energia, possui um agravante, seu processamento requer um tratamento físico-químico antes de seu descarte, por gerar efluentes cancerígenos, como o cromo hexavalente. Diante das circunstâncias, métodos de revestimentos alternativos vêm sendo estudados, a fim de substituir a eletrodeposição de cromo duro. A aspersão térmica por HVOF se destaca, possuindo resultados satisfatórios, aplicando-se revestimentos a partir da deposição do material em pó por uma tocha. Assim, nesta pesquisa, as ligas de WC-CoCr e Stellite 6, foram aspergidas a partir do método HVOF e foram comparadas com um terceiro material revestido por cromo duro. Os revestimentos foram submetidos ao ensaio abrasivo de acordo pela norma ASTM G65 (roda de borracha e areia), obtendo-se resultados de perda de volume e taxa específica de desgaste. Durante os ensaios também foram coletados valores de rugosidade da superfície desgastada. A partir dos resultados o revestimento aspergido por HVOF se mostrou mais eficaz com a liga WC-CoCr, com apenas 1,653 mm³ de volume perdido, enquanto a eletrodeposição de cromo obteve 3,18 mm³. Ao contrário da liga Stellite 6, que durante os testes teve perdas significativas do revestimento, por má aderência a superfície do material revestido. Conclui-se que nem todas as ligas possuem os mesmos parâmetros de deposição, se tornando ineficazes em determinados processos de desgaste.

Palavras-Chave: Válvula rotativa. HVOF. WC-CoCr. Stellite 6. Cromo duro.

¹ Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: rosso.lauro@gmail.com

² Prof. do Cento Universitário UniSATC. E-mail: luiz.cavaler@satc.edu.br

1. INTRODUÇÃO

Como componente indispensável do filtro de mangas, a válvula rotativa exerce a função de controlar e possibilitar a vazão na retirada de material particulado captado pelos mesmos, permitindo que o sistema de despoejamento funcione plenamente. Na indústria cerâmica é indispensável a utilização desse sistema, pois não permite a contaminação desse material com o produto acabado, durante os processos de acabamento da superfície dos pisos.

Por estar diretamente exposta aos “rejeitos” da cerâmica de porcelanato, que por sua vez possui altos valores de dureza e resistência mecânica, as válvulas rotativas se tornaram componentes que mais se degradam devido ao contato tribológico. Ficando ineficientes durante um curto período, resultando em paradas para reparos e remanufatura.

De acordo com Holmberg e Erdemir (2017), os contatos tribológicos consomem 23 % da energia total consumida por um equipamento. Mencionam ainda que esta perda de energia devido ao atrito e desgaste pode se reduzir em 40 % em um prazo de 15 anos, com o desenvolvimento de estudos direcionados a engenharia de superfície. Representando em escala global uma economia de 8,7 % no consumo de energia.

A fim de retardar esse processo de desgaste, a aplicação de revestimentos protetores vem ganhando força na indústria. Segundo Possamai (2002), uma das formas para se obter esse revestimento, é a aplicação de cromo duro, assim sendo a maneira mais popularmente conhecida entre o meio metal mecânico. Como desvantagem, menciona que a utilização desta liga traz sérios riscos à saúde humana e ambiental, devido à grande presença de metais pesados presentes em seus efluentes, tais como o cromo hexavalente.

De acordo com Pinsky e Kruglianskas (2017), a sustentabilidade apesar de muito debatido e cobrado no setor industrial, ainda é visto como um impasse de projetos e encarecimento do produto. Citam o Brasil, como um país chave para essa alavancada no modo de pensar em relação ao meio ambiente, tento em vista a preservação das suas próprias riquezas naturais.

Diante do exposto problema sobre as restrições do uso do cromo duro, novos métodos vêm sendo desenvolvidos, a fim de permanecer no status

de ecologicamente correto, além de ser financeiramente viável. Nesse aspecto, o uso da aspensão térmica hipersônica (HVOF) vem se destacando em aplicações industriais. De acordo com Jafari (2017), essa técnica tem como princípio, a aplicação do material em pó sendo pré-fundido e pulverizado por uma tocha. No momento da combustão o material atinge velocidade hipersônica, fundindo este a peça a ser protegida. O autor ainda menciona, que dentre os tipos de aspensão térmica, a HVOF se destaca, pois produz revestimentos com porosidade inferior a 1 %, devido a sua alta velocidade de ataque na peça.

Para a aplicação da aspensão térmica do tipo HVOF, duas ligas se destacam. A primeira, WC-CoCr, ou seja, uma liga composta por material com elevada dureza, o carboneto de tungstênio (WC), ligando com cobalto (Co), material macio, que eleva sua tenacidade, mais cromo (Cr), proporcionando resistência a oxidação. A segunda liga, Stellite 6 que tem como material base o cobalto (Co), e possuindo alta porcentagem de cromo (Cr), tem como principal característica, resistência a oxidação, erosão e cavitação, além de resistir a altas temperaturas sem perder suas propriedades.

Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa é comparar resultados de ensaios tribológicos para os revestimentos de WC-CoCr e Stellite 6, produzidos a partir de aspensão térmica - HVOF e o cromo duro eletro depositado. A fim de propor novos revestimentos em componentes de válvulas rotativas, amplamente utilizada como meio de descarga de filtro de mangas na indústria cerâmica. Para estudo será realizado testes de desgaste abrasivo, através de ensaios ASTM G65 (roda de borracha).

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Nesta seção será elaborado um estado da arte para embasamento teórico referente a ensaios de desgaste abrasivo de corpos de prova revestidos por aspensão térmica HVOF.

2.1 TRIBOLOGIA

A tribologia é definida como a ciência e a tecnologia de atrito, desgaste e lubrificação. No decorrer da toda a história, a tribologia foi importante em várias aplicações na indústria, por exemplo, ferrovias, automóveis, aeronaves e no processo de fabricação de componentes de máquinas. Além do importante papel na indústria mecânica, a tribologia com o natural avanço tecnológico é utilizada para desenvolver e melhorar componentes eletromecânicos e da nanotecnologia (KAJDAS; WILUSZ, 1990; BHUSHAN, 2013).

De acordo com Castro (2012), atualmente existem quatro divisões principais que se pode encontrar na literatura, referente a tribologia, são elas: mecânica dos sólidos, mecânica dos fluidos, ciência dos materiais e química. Previamente, a mecânica dos sólidos aborda modelos de atrito e desgaste em componentes mecânicos. A mecânica dos fluidos estuda o comportamento de lubrificantes líquidos que agem em superfícies que há movimento relativo. Na ciência dos materiais a tribologia entra no estudo de desgaste em microescala e, na química enfatiza na reatividade entre lubrificantes e superfícies sólidas.

2.2 ATRITO

Segundo Cozza (2011), o atrito é definido como a resistência do movimento relativo entre duas superfícies, gerando formas de energia não mecânica no interior do sistema, na maioria das vezes desperdiçada no meio.

Para a definição do coeficiente de atrito μ , tem-se a seguinte Eq. (1):

$$\mu = \frac{T}{N} \quad (1)$$

T = Força de atrito [N]

N = Força normal [N]

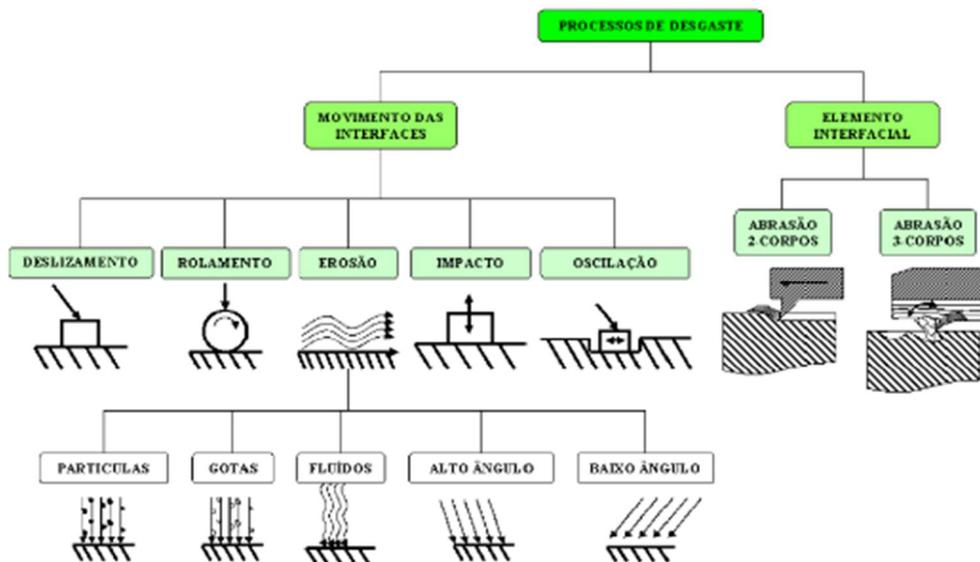
Relacionando o coeficiente de atrito (μ) com a distância percorrida (m), tem-se como resultado da evolução do coeficiente de atrito. A partir desta relação podem-se definir etapas de instabilidade e estabilidade do revestimento (BLAU, 2005; CANCELUNDO, 2009; CASTRO, 2018).

2.3 DESGASTE

Segundo Budinski (1988), o desgaste pode ser descrito como a perda de material através do movimento relativo de duas ou mais superfícies em contato. Na Fig.1, tem-se a classificação dos processos de desgaste e quais as formas de ataque na peça.

Em quase todas as situações é possível identificar o mecanismo principal de desgaste, que normalmente é determinado pelas propriedades mecânicas e estabilidade química do material, pela temperatura dentro da zona de contato e condições de funcionamento, como por exemplo, a pressão de trabalho em sistemas óleo-hidráulicos (CASTRO, 2012).

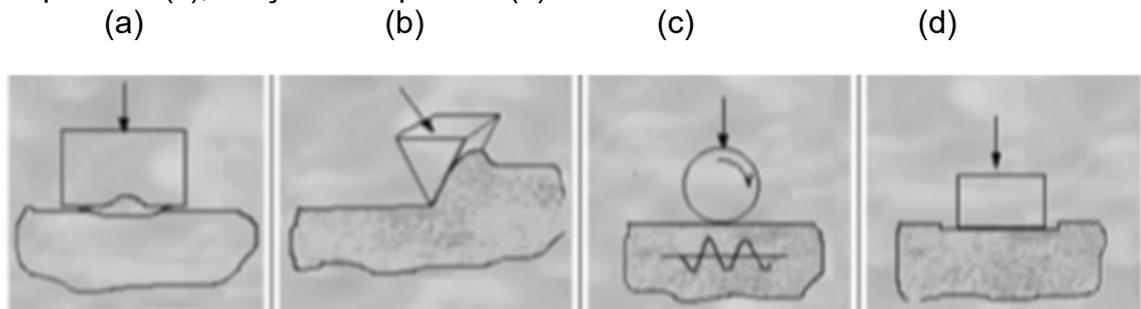
Figura 1: Classificação dos processos de desgaste.



Fonte: Adaptado de ZUM GAHR (1987).

Para Comeli (2006), o desgaste se subdivide em quatro mecanismos: adesão, abração, fadiga superficial e reação triboquímica, Fig.2.

Figura 2: Mecanismos de desgaste adesivo (a); abrasivo (b); fadiga superficial (c); reação triboquímico (d).



Fonte: Castro (2012).

O desgaste por fadiga superficial pode ser caracterizado pela formação de trincas na superfície do material causado por um elemento rolante, que em movimentos cíclicos eleva sua tensão de cisalhamento (ZUM GAHR, 1987; STOTERAU, 2004; SOUZA, 2014).

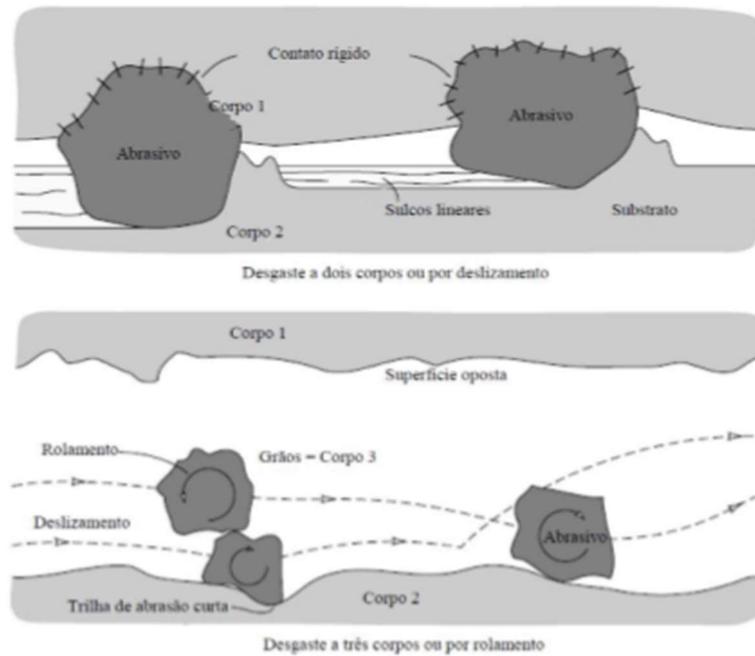
No desgaste triboquímico, o material é submetido a interações com reações químicas. O processo de desgaste se dá pela continuidade das interações triboquímicas entre a superfície e o meio (CASTRO, 2012; ZUM GAHR, 1987).

2.3.1 Desgaste abrasivo

A ASTM define que o desgaste abrasivo se dá pelo atrito de partículas duras em superfícies iguais ou de menor dureza (ASM, 1992; STACHOWIAK; BATCHELOR, 2000). Materiais de baixo teor de carbono também podem causar desgaste abrasivo, se neles possuem partículas relativamente mais duras que a superfície atacada (STACHOWIAK; BATCHELOR, 1993 *apud* CASTRO, 2012).

Segundo CASTRO (2010), os processos de desgaste abrasivo podem ser de dois ou três corpos, ocorrendo em baixas ou altas tensões. A Fig.3 apresenta claramente de que forma agem os dois tipos de desgaste abrasivo.

Figura 3: Modos de desgaste abrasivo.



Fonte: Stachowiak; Batchelor (2000).

Em casos extremos este tipo de desgaste também pode levar o material a fratura, causando desprendimentos de partes, levando a danificação do equipamento (LEITE, 2008). Para descrever o desgaste ou perda de volume de um material, utiliza-se a Eq. (2) denominada de equação de Archard. Na Eq. (2) se prevê um crescimento linear da perda volumétrica, de acordo com a carga aplicada a uma determinada distância percorrida.

$$Q = k_a \left(\frac{F_n \cdot L}{H} \right) \quad (2)$$

Q = Perda de volume [mm³]

F_n = Carga normal aplicada [N]

L = Distância percorrida [mm]

H = Dureza do material [N/mm²]

K_a = Coeficiente adimensional de desgaste por deslizamento

Como a constante K_a não é tão popularmente empregada nos ensaios de desgaste, substitui-se esta constante pela relação dela com a dureza do material, ou seja, K_a/H . De acordo com esta relação, uma nova constante K_d é empregada, denominada de taxa específica de desgaste.

$$Q = K_d (Fn \cdot L) \quad (3)$$

K_d = Taxa específica de desgaste [mm^2/N]

A perda de volume pode ser considerada através da Eq. (4):

$$Q = \frac{M_i - M_f}{\rho} \times 1000 \text{ [mm}^3\text{]} \quad (4)$$

$M_i - M_f$ = Perda de massa [g]

ρ = Densidade [g/cm^3]

Uma das técnicas para diagnosticar cada tipo de superfície e prever resultados da vida útil do material é o desgaste por roda de borracha e areia (CASTRO, 2012).

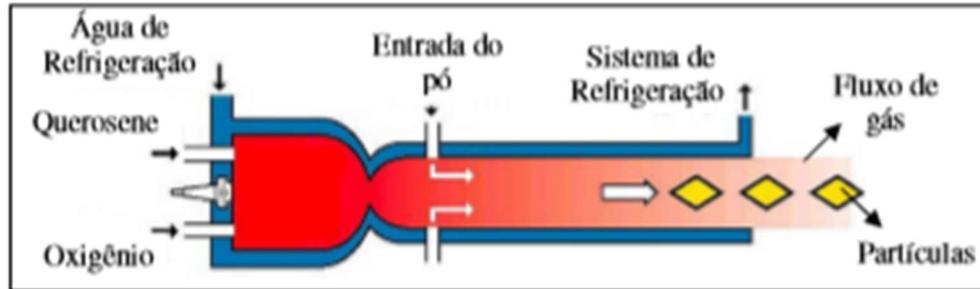
Esse tipo de ensaio é ditado pela norma ASTM G-65 (roda de borracha e areia). Que se dá pelo atrito entre três corpos, com ensaios cronometrados de acordo com o número de rotação da roda ou com a vazão de areia, com o objetivo de se obter a perda de volume da superfície do corpo de prova através do desgaste abrasivo, de acordo com a Eq. (3).

2.4 ASPERSÃO TÉRMICA

A aspersão térmica ocorre através da injeção de material em forma de pó, arame ou vareta diretamente na fonte de calor (combustão de gases, arco elétrico ou plasma), aonde são projetadas em direção a superfície desejada. Com o ganho de alta velocidade, o impacto na superfície também é alto (BERGMANN, 2011).

Conforme mostrado na Fig. 4, se tem uma ideia do processo de ataque a superfície, bem como de onde vem a fonte de calor e de onde o material é injetado.

Figura 4: Princípio de funcionamento da pistola utilizada pelo processo de aspersão térmica HVOF.



Fonte: Tafa Inc., apud comeli (2006).

A aspersão térmica além de obter resultados significativos na sua aplicação, diminui a praticamente “zero” a poluição ambiental, fazendo dela, uma técnica potencialmente significativa para substituição da eletrodeposição de cromo duro. Ao entrarem em contato com a superfície, uma camada em forma de estrutura lamelar junto com partículas não fundidas é formada na superfície do material. Trincas, óxidos e poros também são gerados e, essas falhas ou imperfeições se dão muito de acordo de como e qual material sofreu o processo de aspersão térmica. O processo se dá através de mais de uma técnica ou procedimento, também sendo responsável pelo resultado final da deposição (LIMA, 2002; SCHIEFLER, 2004).

Na Tab.1 são apresentados, as principais características dos principais métodos de aspersão térmica. Se destacam dois métodos, ASP e HVOF, em relação a taxa de aspersão. Com uma ligeira vantagem na utilização do método HVOF, pela sua temperatura de chama de 1.700°C, em quanto o método ASP chega a temperaturas de 5.600°C, não sendo eficaz em alguns tipos de aços.

Tabela 1: Características de alguns processos por aspersão térmica.

Processos	Temp. da chama (°C)	Veloc. da partícula (m/s)	Teor de óxidos (%)	Custo relativo	Taxa de aspersão (kg/h)	Energia (kW/kg)
FS	2.200 - 2.600	30 - 180	4 - 6	3	7	25 - 100
ASP	5.600	240	0,5 - 3	1	16	4 - 6
HVOF	1.700	200 - 1000	0,2	5	14	100 - 270
D-gun	3.900	910	0,1	10	1	100 - 270
PS	5.600	240	0,5 - 1	5	5	30 - 80

Fonte: ASM (2004); Kreye et al. (2000); Schiefler (2004).

O processo de aspersão térmica se dá mais objetivamente depois de concluída três etapas distintas. Segundo Comelli, F. (2006), os procedimentos são eles: a) pré-usinagem da superfície para remover possíveis irregularidades presentes e uniformizar a sua textura; b) limpeza e remoção de gorduras da superfície; c) jateamento abrasivo da superfície (por exemplo, com partículas de alumina), visando criar uma rugosidade controlada.

2.5 PROCESSO HIGH VELOCITY OXYGEN FUEL (HVOF)

O processo HVOF é um dos métodos de se depositar um material através da aspersão térmica. Uma das vantagens de se aplicar através deste procedimento, é a maneira de como ele é aplicado, atingindo velocidade hipersônica a baixas temperaturas se comparada ao método ASP, minimizando os danos do revestimento e da superfície atacada. No momento da combustão, a velocidade alcança 2.000 m/s a uma temperatura de 2.800°C. Com velocidade alta e temperatura baixa respectivamente em relação a outros métodos de aspersão (NUCCI, 2005; JAFARI; EMAMI; MAHMOUDI, 2017).

Os combustíveis usados no processo HVOF incluem, querosene, hidrogênio, propileno, propano, acetileno, metil-acetileno propadieno e gás natural. Os materiais a serem depositados, em forma de pó, são introduzidos no interior da chama, dentro do tubo de saída dos gases e podem produzir

revestimentos sobre uma variedade ilimitada de substratos. Ao atingirem o substrato, as partículas fundidas/semi-fundidas deformam-se, espalhando-se lateralmente e solidificando-se rapidamente para formarem as microestruturas típicas dos revestimentos obtidos por aspersão térmica via HVOF (NUCCI, 2005).

Para alcançar essa velocidade a baixas temperaturas, o HVOF conta com uma série de avanços tecnológicos empregados, dentre eles na criação de um bico convergente/divergente acoplado diretamente a câmara de combustão da pistola de aspersão, aonde se dá a aceleração do fluxo de gás. Esses bicos podem gerar pressões de 3 a 10 bar, dependendo de sua geração (SCHIEFLER, 2004; LIMA; TREVISAN, 2007; SOBOLEV *et al.*, 2004).

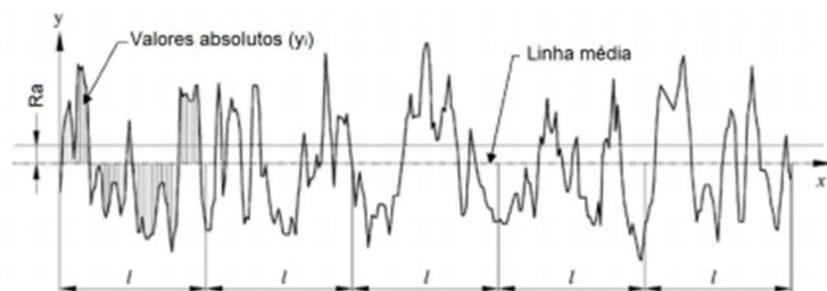
Segundo Pawlowski (2008) *apud* Castro (2012), após o revestimento, algumas propriedades são adquiridas, dentre elas: aderência da camada superior a 90 MPa; porosidade inferior a 1% e espessura de material depositado na faixa de 100 a 300 μm (0.1 a 0.3 mm) e durezas até 1.245 HV.

2.6 PARAMETRO DE RUGOSIDADE R_a

De acordo com Souza (2014), toda superfície que sofre qualquer tipo de alteração, tende a ter modificação nos seus valores de rugosidade da superfície, mesmo que pequenas. Souza (2014) ainda cita que, a avaliação da rugosidade de uma superfície não é a medição do perfil, mas sim a atribuição de um valor numérico ou um parâmetro, que irá fornecer informações confiáveis desta superfície.

Castro (2012), cita que o parâmetro de rugosidade R_a é a média dos resultados obtidos nas medições de picos e vales, conforme ilustrado na Fig. 5.

Figura 5: Definição do parâmetro de rugosidade R_a .



Fonte: Souza (2014).

Esses resultados são coletados através de um pequeno comprimento retilíneo chamado de *cut-off* (comprimento da amostragem), que é a distância medida em milímetros de cada um dos 7 intervalos λ que o rugosímetro mede. Após o processo de medição, são filtrados o primeiro e o último intervalo que poderiam influenciar no valor da medida. Neste trabalho, utilizou-se o valor do *cut-off* de 0,8, porque feitas algumas medidas preliminares, o R_a medido ficou na faixa de 0,2-2 μm .

O parâmetro R_a é o mais utilizado pela indústria para controle de qualidade em geral e monitoramento de processos produtivos onde mudanças graduais no acabamento superficial podem ocorrer (DAVIM, 2009).

2.7 WC-CoCr

Com o objetivo de obter um material com características de resistência ao desgaste a liga WC-CoCr é a união de material de cerâmica dura (WC), com uma liga de metal mais macio (CoCr). De acordo com Picas (2018), o revestimento de WC através do processo HVOF, exibe resultados satisfatórios a resistência de desgaste abrasivo e erosivo, devido a presença de uma fração de alto volume de partículas de WC delimitadas por um ligante de liga de cobalto ou cromo-cobalto resistente.

A seguir, na Tab. 2 a composição química da liga.

Tabela 2: Composição química.

Material	W (%)	Co (%)	Cr (%)	C (%)	Fe (%)
WC CoCr	Balanço	8,5-11,5	3,4-4,6	4,8-5,6	Máx. 0,2

Fonte: Bezerra (2016).

Segundo Hailang (2018), após o revestimento de WC-CoCr através da aspersão térmica HVOF, testes tribológicos foram realizados, relativos ao comportamento de desgaste de deslizamento. Consequentemente revelaram uma significativa diminuição na taxa de desgaste aplicada em uma determinada liga.

Na Tab. 3, as características do revestimento.

Tabela 3: Características do revestimento.

Revestimento	Dureza (HV)	Porosidade (%)	Temp. máx. de trabalho (°C)	Espessura máx. (mm)	Resistência à abrasão (mm ³ /min)	Adesão (MPa)
WC CoCr	1.100 -1.300	< 1	450	0,5	0,10	> 82

Fonte: Rijeza (2018).

Por ter uma dureza elevada, carbeto de tungstênio (WC) ligados com Co, são principalmente usados para combater o desgaste em peças mecânicas, pois a matriz tenaz de cobalto é capaz de conciliar uma elevada dureza com uma razoável tenacidade. Porém para temperaturas elevadas e meios agressivos, este sistema tem uma baixa resistência a corrosão, tendo sua aplicação limitada (BEZERRA, 2016). Diante desta baixa resistência a corrosão em temperaturas mais elevadas, foi adicionado a liga o Cr, que dentre todas as características, se destaca a sua resistência a corrosão.

2.8 STELLITE 6

A liga Stellite 6 foi projetada para resistir a múltiplos tipos de desgaste, com ótima resistência a oxidação, erosão e cavitação. Tem como base o cobalto, e mesmo sofrendo ações de altas temperaturas, consegue permanecer com suas propriedades. Uma liga que há muito tempo já é utilizada na soldagem, e que na aspensão se mostrou economicamente viável para se utilizar (GOTARDO *et al.*, 2018).

A seguir, na Tab. 4 a composição química da liga.

Tabela 4: Composição química.

Material	C (%)	Si (%)	Cr (%)	Ni (%)	Co (%)	W (%)	Fe (%)	B (%)
Stellite 6	1,20	<1,5	29,0	<3,0	Balanço	4,50	<3,0	2,0

Fonte: Gotardo *et al.* (2018).

Segundo Ciubotariu (2016), esta liga não é apenas adequada para proteção contra desgaste por deslizamento, mas também se mostra muito resistente contra cargas de impacto. O que a torna uma ótima opção para revestimentos em peças expostas a ambientes hostis de trabalho.

Na Tab. 5, as características do revestimento.

Tabela 5: Características do revestimento.

Revestimento	Dureza (HV)	Porosidade (%)	Temp.de trabalho (°C)	Espessura máx. (mm)	Resistência à abrasão (mm ³ /min)	Adesão (MPa)
Stellite 6	450-650	< 1	320-600	0,7	6,25	> 73

Fonte: Rijeza (2018).

De acordo com Houdková (2016), além da resistência a oxidação, a estabilidade de suas propriedades mecânicas em relação a carga térmica é crucial em relação as áreas de aplicação mais comuns em alta temperatura. E que aplicando recozimento após a aspensão aumenta a dureza e sua força de coesão. Houdková (2016), ainda conclui que, após este procedimento o revestimento se mostrou ainda mais resistente ao desgaste abrasivo e adesivo.

O principal problema na utilização desta liga em revestimentos, é sua fragilidade no ato da deposição do material na peça e, medidas especiais de deposição devem ser tomadas e ainda melhoradas. Dentre esses procedimentos, se destaca a aplicação de uma refusão a laser, a fim de melhorar a microestrutura do revestimento, tornando-o mais homogêneo (CIUBOTARIU, 2016).

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Nesta etapa foram apresentadas as atividades necessárias para realização dos ensaios, caracterização e análise, conforme descritos a seguir.

3.1 ABRASOMETRO RODA DE BORRACHA

A caracterização tribológica se deu pela validação do ensaio de desgaste abrasivo ditado pela norma ASTM G-65. Que tem como princípio, o desgaste de três corpos, através do contato roda de borracha x areia x corpo de prova.

Como substrato, os corpos de prova foram fabricados em aço SAE 1020, com densidade de $7,86 \text{ g/cm}^3$. Obtendo-se resultados dos ensaios de desgaste abrasivo ainda mais próximos da realidade aplicada. Com dimensões de $55 \times 26 \times 12,7 \text{ mm}$, foram compilados resultados de três corpos de prova, um para cada tipo de revestimento.

Para fabricação dos revestimentos depositados por aspersão térmica HVOF, foi utilizado equipamento Tafa/Praxair JP-5000 μV modelo 5120, com pistola a b modelo JP5000. Após, a deposição dos revestimentos nos substratos, os corpos de prova foram submetidos a um processo de preparação da superfície, através de lixamento manual.

A norma ASTM G-65 é subdividida em procedimentos, escolhido de acordo com a aplicação e material utilizado. Como o objetivo é mensurar o volume perdido em material aspergido, será utilizado o procedimento A.

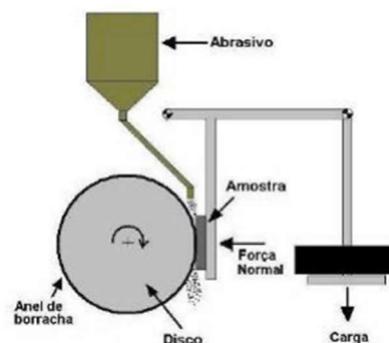
A Fig. 6 (a) apresenta uma imagem real do equipamento nas dependências do LAVITRI (Laboratório de Vibrações de Tribologia), Engenharia Mecânica da UniSATC, e, a Fig.6 (b) o esquema do ensaio de desgaste abrasivo.

Figura 6: Abrasometro UniSATC (a); processo do ensaio (b).

(a)



(b)



Fonte: Do autor (2020); Castro (2011).

A seguir na Tab. 6, segue os parâmetros utilizados de acordo com o procedimento A.

Tabela 6: Parâmetros utilizados para o ensaio de desgaste abrasivo.

Rotação da Roda de Borracha	200 RPM
Fluxo de Massa da Areia	324 g/min
Tempo de Ensaio	30 minutos
Granulometria do Abrasivo	246,67 ± 66,71 µm
Temperatura de secagem do abrasivo	120°C
Contra Peso	130 N
Abrasão Linear	4.309 m
Revoluções da Roda	6.000

Fonte: Do autor (2020).

Com o material abrasivo (areia) previamente peneirado e submetido a um processo de secagem durante 10 minutos em forno de micro-ondas, é posto para utilização. Para os corpos de prova, uma limpeza ultrassônica durante 10 minutos é feita individualmente.

Durante os 30 minutos de testes para cada corpo de prova, seis paradas cronometradas foram feitas, para medição da perda de massa do corpo de prova, utilizando uma balança modelo Denver modelo APX-200 com precisão de 0,1 mg.

Para compilação dos dados, será utilizada a Eq. (4) para determinar o volume perdido de material e a Eq. (3) para obtenção dos valores de taxa específica de desgaste.

A medição de rugosidade foi feita por meio de um rugosímetro MITUTOYO SJ-310 (habilitado pela ISO:1997). Foram coletados os parâmetros de roughness average (Ra) na horizontal e vertical em 5 pontos do corpo de prova, totalizando 7 coletas para cada eixo, uma antes do início dos ensaios e as demais intercaladas a cada parada de 5 minutos até o término do ensaio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

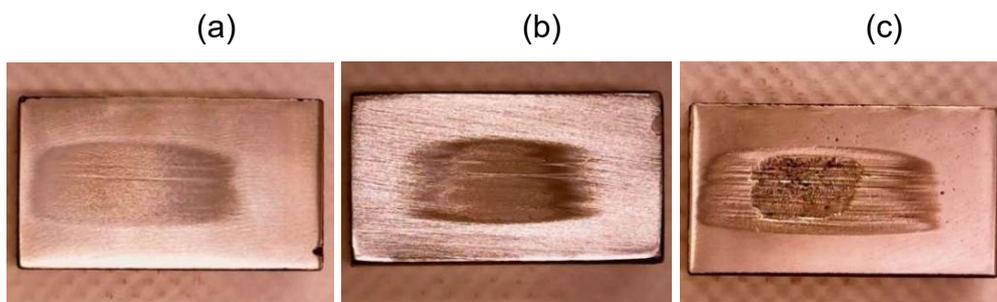
Neste tópico foi avaliada a resistência ao desgaste abrasivo e as taxas de rugosidade da superfície dos revestimentos metálicos depositadas pelo processo de aspersão térmica HVOF, em comparação a eletrodeposição de cromo duro. Atualmente, nos rotores das válvulas rotativas são empregadas chapas de aço SAE 1020 revestidas com cromo duro.

4.1 ENSAIO DE DESGASTE ABRASIVO

Após a realização dos ensaios seguidos pelos parâmetros da norma ASTM G-65, se obteve imagens e resultados de perda de volume e taxa de desgaste dos corpos de prova.

Na Fig. 7 está apresentada as das trilhas de desgaste dos revestimentos estudados. Nota-se pela concentração das trilhas no centro de todos os corpos de prova, que os mesmos estavam bem fixados e a roda centralizada com seu eixo, resultando assim, mais credibilidade nos resultados finais.

Figura 7: Trilhas de desgaste (a) WCCoCr; (b) Cromo duro; (c) Stellite 6.



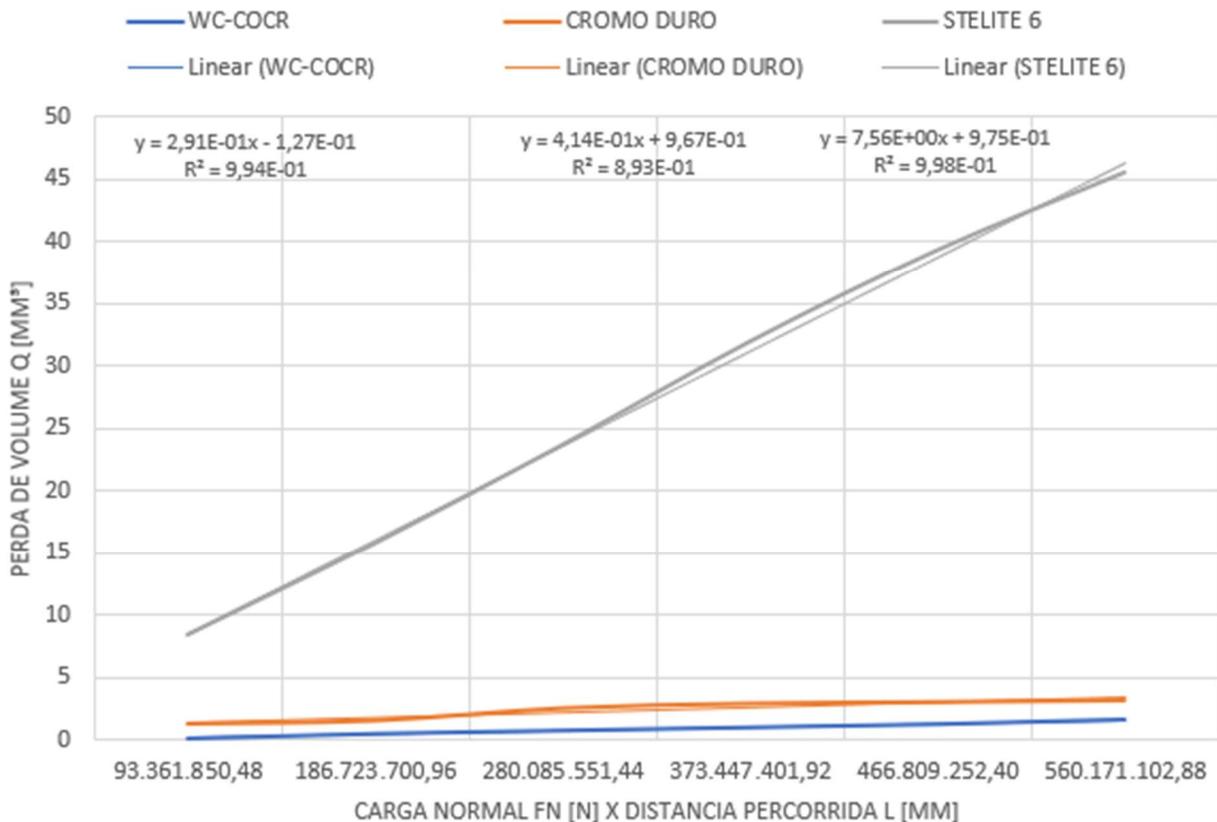
Fonte: Do autor (2020).

O revestimento de Stellite 6 se destaca de maneira negativa perante a esta condição de ensaio abrasivo. Percebe-se a expressiva perda de material em lascas, devido à má efetividade na aderência do revestimento sobre o substrato no processo da aspersão. Uma das justificativas dessa má aderência da liga no substrato, poderia estar vinculada aos parâmetros usados para realizar a aspersão, dessa forma pode-se ter resultados bons e ruins, dependendo do

material depositado. Estima-se a necessidade de aplicação de refusão após a peça ser revestida para melhorar o processo de deposição.

Em posição o revestimento de Stellite 6, nota-se uma ligeira vantagem no corpo de prova aspergido com WC-CoCr, apresentado na Fig. 8.

Figura 8: Perda de volume (eixo Y) e carga x distância (eixo X).



Fonte: Do autor (2020).

Os resultados apresentados na Fig. 8 foram obtidos através da equação de Archard Eq.(3). A partir desta equação se destaca o revestimento de WC-CoCr, sendo o material que mais resiste ao desgaste abrasivo, de acordo com a menor inclinação da reta, representada pelo fator K_d (taxa específica de desgaste).

Na Fig. 8 e posteriormente na Fig. 9, se comprova a grande resistência do revestimento WC-CoCr, diante das características do teste. Possivelmente por sua liga possuir uma ótima conciliação do material duro (WC), a tenacidade do cobalto (Co) e material do substrato.

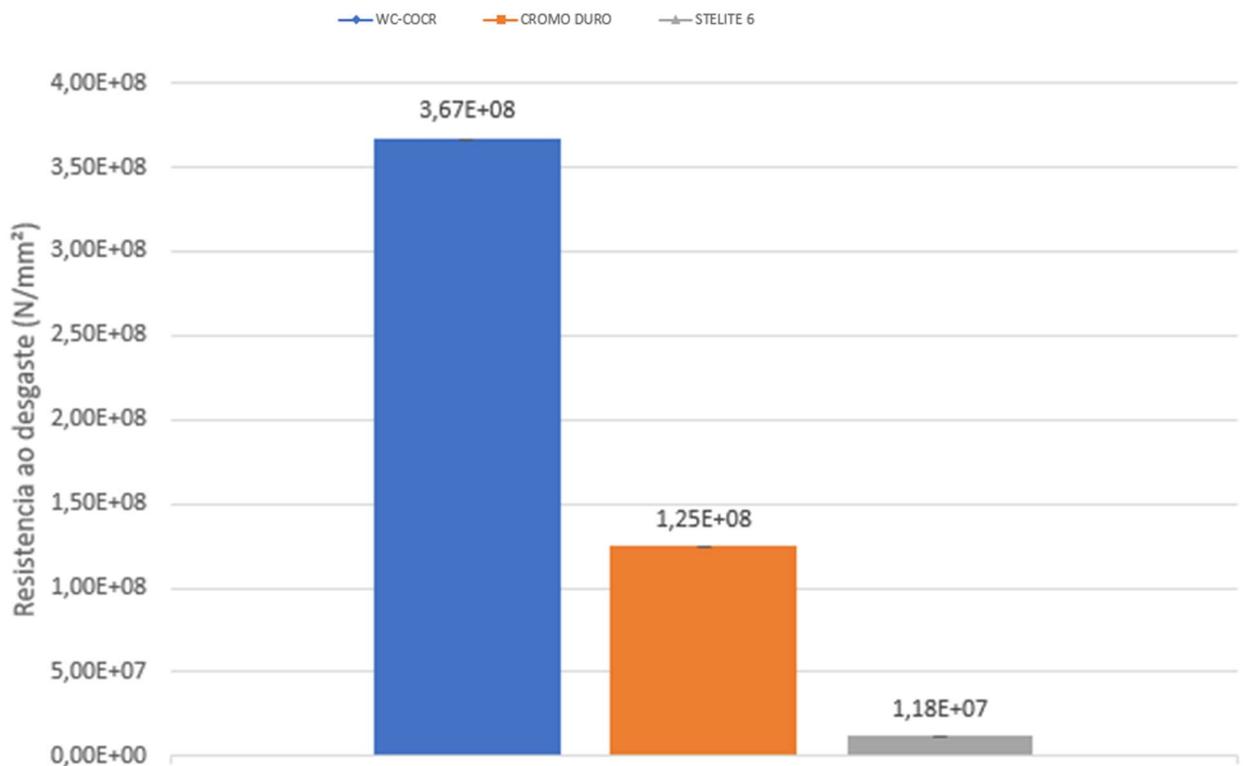
Observa-se nos resultados da taxa de desgaste do revestimento por Cromo duro uma não linearidade na sua inclinação. Ou seja, principalmente após os 20 minutos de ensaio, sua perda de material é quase nula. Tendo uma tendência de ganho de massa caso o ensaio se prolongasse por mais alguns minutos.

De acordo com a afirmação de Seabra (2000), o desgaste abrasivo é provocado por uma partícula dura, proveniente de meios exteriores (fluxo de areia), impondo-se entre as superfícies. Por consequência do contato, partes dessas partículas acabam aderindo-se as superfícies provocando endentamento.

Justificando a capacidade que o revestimento tem de aderir as partículas de areia durante o ensaio.

Abaixo na Fig. 10, de maneira mais explícita, é apresentada a diferença de resistência ao desgaste dos revestimentos estudados. Esta resistência que é inversamente proporcional a taxa específica de desgaste (mm^2/N).

Figura 10: Resistência ao desgaste.



Fonte: Do autor (2020).

Para facilitar o entendimento, na Tab. 7 de forma numérica está apresentado os principais resultados finais.

Dando ênfase na diferença de massa perdida do revestimento por Stellite 6 em relação ao WC-CoCr e Cromo duro. Os dois últimos com valores bem próximos, mas com ligeira vantagem do WC-CoCr.

Tabela 7: Resultados dos ensaios.

Revestimento	Perda de massa (g)	Perda de volume (mm ³)	Taxa específica de desgaste (mm ² /N)	Resistência ao desgaste (N/mm ²)
WC-COCR	0,013	1,653	2,72545E-9	3,67E+8
CROMO DURO	0,025	3,18	8,00601E-9	1,25E+8
STELITE 6	0,358	45,547	8,44889E-8	1,18E+7

Fonte: Do autor (2020).

4.2 ENSAIO DE RUGOSIDADE

Na compilação dos dados, se faz claro a relação direta dos valores de rugosidade superficial com a resistência ao desgaste de cada revestimento.

Conforme a Tab. 8 a seguir, os parâmetros de rugosidade Ra dos revestimentos de melhor desempenho (WC-CoCr e Cromo duro) se mantiveram baixos durante todo ensaio

Tabela 8: Comparação das rugosidades Ra antes e após o ensaio.

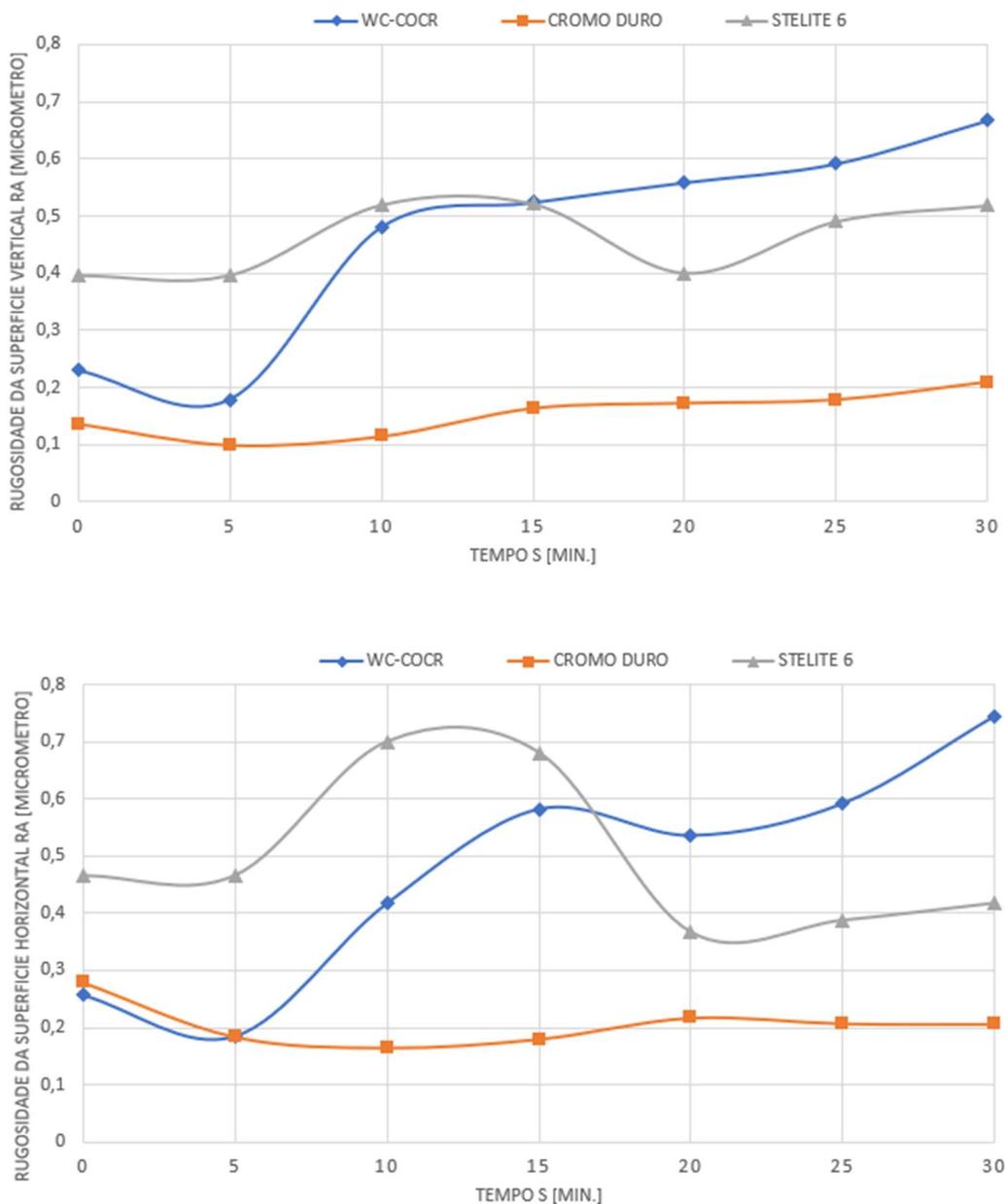
MATERIAL	Vertical [µm]		Horizontal [µm]		Variação y	Variação x
	Antes	Depois	Antes	Depois		
WCCOC R	0,230 ± 0,01	0,362 ± 0,01	0,257 ± 0,01	0,440 ± 0,01	0,132 ± 0,01	0,183 ± 0,01
CROMO DURO	0,137 ± 0,01	0,210 ± 0,01	0,279 ± 0,01	0,206 ± 0,01	0,073 ± 0,01	0,073 ± 0,01
STELITE 6	0,396 ± 0,01	0,519 ± 0,01	0,466 ± 0,02	0,418 ± 0,02	0,123 ± 0,01	0,048 ± 0,01

Fonte: Do autor (2020).

Ao contrário do revestimento Stellite 6, que apesar de pouca variação durante as coletas de dados, mostrou valores altos de rugosidade superficial. Ou seja, com seus picos e vales bem expressivos.

Na Fig. 11, se faz uma relação da rugosidade superficial medida na vertical e horizontal com o tempo de ensaio.

Figura 11: Relação da medição da Rugosidade superficial Ra com o tempo de ensaio.



Fonte: Do autor (2020).

A Fig. 11 demonstra que o revestimento por cromo duro apresentou menor variação na rugosidade Ra. Justificando mais estabilidade em relação aos revestimentos aspergidos.

Possivelmente esse bom resultado se deve ao fato de que após um período de tempo sendo submetido ao ensaio, a superfície do revestimento por cromo duro ganha um aspecto polido, conseqüentemente baixos valores de rugosidade Ra.

5. CONCLUSÃO

Analisando os resultados, pode-se concluir que a resistência ao desgaste abrasivo varia significativamente de acordo com a natureza de cada revestimento e de seu procedimento de deposição no substrato.

Os resultados a partir dos ensaios conforme a ASTM G-65 (roda de borracha e areia) dos revestimentos por aspersão térmica HVOF se mostraram satisfatórios com a liga WC-CoCr, com 1,634 mm³ de volume perdido, em comparação à os 3,18 mm³ do revestimento por cromo duro. Tornando a liga aspergida uma alternativa confiável comparada a eletrodeposição. Em oposição, a liga Stellite 6 aspergida, obteve resultados abaixo do esperado, com 45,547 mm³ de volume perdido, com valores de rugosidade estáveis, porem altos. Concluindo que nem todas as ligas possuem os mesmos parâmetros de deposição, se tornando ineficazes em determinados processos de desgaste.

A partir dos resultados desta pesquisa, evidencia que quanto menor são os valores de rugosidade da superfície, melhor será sua resistência ao desgaste abrasivo, conseqüentemente elevando o desempenho quando aplicado em válvulas rotativas. Pois nesta aplicação, além de ter que possuir taxas de resistência ao desgaste alta, deverá possuir um índice de rugosidade baixo, causando assim melhor fluidez no fluxo de material durante o funcionamento do equipamento.

No contexto geral, a pesquisa, bem como o processo experimental, obteve resultados satisfatórios, com a liga WC-CoCr aspergida chegando a resultados finais de resistência ao desgaste, quase 30% superior em relação ao revestimento hoje aplicado, no caso o cromo duro

O trabalho procurou buscar um problema real da indústria para dentro do campo universitário, a fim de obter melhorias a partir de ensaios laboratoriais.

REFERÊNCIAS

ASTM G 65. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. 2004.

BERGMANN, C.P. and J. Vicenzi, **Protection against Erosive Wear using Thermal Sprayed Cermet: A Review.** 2011: Springer Berlin Heidelberg.

BEZERRA, B. F. A. **Análise da Taxa de Desgaste de um revestimento WC-CoCr/Ni-Cr.** Dissertação para Título de Engenheiro de Materiais, UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Novembro, 2016.

BHARAT BHUSHAN, **Introduction to Tribology**, 2nd edition, 2013, pags 23 e 24.

BOTH, G. B. **Caracterização e Avaliação Tribologica de Superfícies Resistentes ao Desgaste para Aplicação em Ferramentas de Conformação a Frio.** Dissertação de Mestrado, UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, RS – Dezembro, 2011.

BUDINSKI, K.G.; **Surface Engineering for Wear Resistance.** Prentice Hall, EUA. 1988. p. 420.

BURAKOWSKI, T; WIERZCHON, T.; **Engineering of Metals - Principles, Equipment, technologies.** CRC Press LLC, EUA. 1999. p. 592.

CASTRO, R. M. **Avaliação das propriedades de superfície e do comportamento ao desgaste abrasivo de hastes de cilindros hidráulicos revestidas pelos processos de HVOF e cromo duro eletrodepositado.** Dissertação de Mestrado, UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2012. p. 96.

CASTRO, C. A. **Resistencia ao Desgaste Abrasivo das Sapatas de Trator de Esteira após Processos de Recuperação**. Dissertação de Mestrado, UFPR – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, Maio, 2010.

CIUBOTARIU, C; FRUNZEVERDE, D; MARGINEAN, G; SERBAN, V; BIRDEANU, A. **Optimization of the laser remelting process for HVOF-sprayed Stellite 6 wear resistant coatings**. ELSEVIER, Março, 2016.

COMELLI, F.W. **ESTUDO DE REVESTIMENTO ASPERGIDO POR HVOFCONTRA O DESGASTE EM HASTES DE VÁLVULASDE TURBINAS TERMELÉTRICAS**. Dissertação para Mestrado, UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. 2006.

COZZA, C. R. **Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante**. Tese para obtenção de título de Doutor em Ciências, USP – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Julho, 2011.

DAGOSTIM, F. B.; CURI, E. M. **Análise e Desenvolvimento de um Sistema de Trem de Pouso para uma Aeronave em Escala Voltado para a Competição SAE Brasil Aerodesign**. Artigo para obtenção de título de Engenharia Mecânica, Faculdade SATC, Criciúma, SC, Brasil, 2016.

DAGOSTIM, F. B.; SILVA, R. M.; CURI, E. M.; CASTRO, R. M. **Bancada de Impacto para Determinar o Comportamento Dinâmico das Borrachas Utilizadas no Revestimento das Rodas do Trem de Pouso de um Aeromodelo Rádio-Controlado**. Artigo publicado no 5º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – SICT-Sul. Faculdade SATC, Criciúma, SC, Brasil, 2016.

DAVIM, J. P., **Surface integrity in machining**. Springer, 2009.

HAILANG, L; BO, W; ZHENGWEI, Q; GUOPEI, Z; DEZHI, W. **Surface Microstructure and Ant-wear of WC-CoCr Coatings Cladded by Electron**

Beam. Central South University, Changsha 410073, China; Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China, November, 2018, ELSEVIER.

HAMED JAFARI, SOBHAN EMAMI, YASSER MAHMOUDI. **Numerical investigation of dual-stage high velocity oxy-fuel (HVOF) thermal spray process: A study on nozzle geometrical parameters**, Applied Thermal Engineering, Volume 111, 25 January 2017, Pages 745–758.

HOLMBERG, KENNETH and ERDEMIR, ALI. **Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions**. VTT Technical Research Centre of Finland, VTT FI-02044, Finland. Maio, 2017.

HOUDKOVÁ, S; SMAZALOVA, E; PALA, Z. **Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Properties of HVOF-Sprayed Co-Cr-W Coating**. Journal of Thermal Spray Technology. February, 2016, Pages 546-557.

KAJDAS, C.H., S. S. K.; E. Wilusz, **Edited by, in Tribology Series**. Elsevier, 1990.

LEITE, R. V. **Estudo Comparativo entre Ligas Resistentes ao Desgaste Abrasivo, Aplicadas por Soldagem em Chapas Metálicas para Fabricação de Placas Antidesgastes**. Dissertação de Mestrado, UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, Uberlândia, MG, Março, 2008.

LIMA, C.C.T., R., **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicações**, in Artliber. 2002: São Paulo.

LIMA, C.C; TREVISAN, R. **Aspersão térmica – Fundamentos e Aplicações**. Artliber Editora. São Paulo, 2007.

NUCCI, R. **Avaliação da Resistência ao Desgaste de Cermets Depositados pelo Processo de HVOF e do Cromo Duro Eletrolítico**. Dissertação de Mestrado, USP - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Maio, 2005. 97p.

PAWLOWSKI, L. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings**.

Ed. John Willey & Sons Ltd, 2^a ed. England. p. 647. 2008.

PICAS, J; PUNSET, M; RUPÉREZ, E; MENARGUES, S; MARTIN, E; BAILE, M.
Corrosion mechanism of HVOF thermal sprayed WC-CoCr coatings in acidic chloride media. ELSEVIER, Outubro, 2018.

PINSKY, VANESSA and KRUGLIANSKAS, ISAK. **Inovação tecnológica para a sustentabilidade: aprendizados de sucessos e fracassos.** *Estud. av.* [online]. 2017, vol.31, n.90, pp.107-126. ISSN 0103-4014. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142017.3190008>.

SCHIEFLER, M. O. F. **Estudo Microestrutural e Eletroquímico de Revestimentos Metálicos Depositados por Aspersão Térmica.** Tese de Doutorado, POSMEC –Universidade Federal de Santa Catarina. 313p. 2004.

SEABRA, L. M. S. C., 2000, “**Comportamento Tribológico de Polímeros Alimentares Contra Aço Inoxidável em Escorregamento não Lubrificado**”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto – UP, Porto/OTE, Portugal, 148 p.

SOBOLEV, V. V., **High Velocity oxy-fuel spraying: theory, structure-property relationships and applications.** Money Publishing, Londres, Inglaterra. 2004. p. 397.

SOUZA, A., LABONI, A., COUTINHO, I. **Revestimentos Superficiais - Tecnologia de Superfícies – Aplicação de Cromo Duro em Ferramentas, Moldes e Matrizes.** 1º Encontro de Integrantes da Cadeira Produtiva de Ferramentas, Moldes e Matrizes, p.1-10, 2003.

SOUZA, M. M. **Avaliação do Comportamento Tribológico das Propriedades de Superfície do Aço 4140 Revestido pelos Processos HVOF e Cromo Duro Eletrodepositado.** Dissertação de Mestrado, UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, SC, Agosto, 2014.

SOUZA, R., NASCIMENTO, M. D., VOORWALD, H., PIGATIN, W. **Carbeto de Tungstênio - Uma Alternativa ao Cromo Duro Eletrodepositado**. Jornadas SAM 2000 - IV Colóquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga , p.575-576, 2000.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology. 2. ed.** Austrália: Butterworth-Heinemann, 2000.

TAKIMI, A.; POSSAMAI, L.; BERGMANN, C. **Revestimentos depositados por aspersão térmica hipersônica (HVOF) como alternativa ao cromo duro**. UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. 2002.

Acesso:

http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EME715/AT%20PGMEC/Artigos%20para%20Semin%C3%A1rio/UFRGS_Revestimentos%20A0AP%20HVOF%20como%20alternativa%20ao%20cromo%20duro%20A0.PDF

ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam: Elsevier, 1987.

STOTERAU, R.L. **Tribologia**. UFSC –Universidade Federal de Santa Catarina –Departamento de Engenharia Mecânica. 2004.

<https://www.rijeza.com.br/espaco-academico/artigos-tecnicos/revestimentos-depositados-por-aspersao-termica-hipersonica-hvof>.