

Estudo comparativo da resistência ao desgaste abrasivo com ensaio de roda de borracha e areia seca do revestimento por aspensão de carboneto de tungstênio cobalto cromo e o cromo industrial no aço inox 304.

Victor Teixeira Colombo¹

Anderson Dallefe²

Eduardo Tinelli³

Resumo: O desgaste de peças e equipamentos é um dos problemas que representam grande parte da depreciação dos equipamentos e uma significativa geração de despesas com manutenção e produção. Esse artigo foi executado visando a seleção do revestimento metálico alternativo ao cromo-duro eletrolítico, com as propriedades de resistência ao desgaste abrasivo mais elevada. Nove corpos de prova de inox 304 foram fabricados, três foram revestidos com HVOF - High Velocity Oxy-Fuel flame spraying (aspensão a chama oxi-combustível de alta velocidade com material de adição na forma de pó) de Wc-Co-Cr (carboneto de tungstênio cobalto cromo), três com cromo-duro industrial e posteriormente ensaiados e analisados nos laboratórios da Faculdade SATC, utilizando o abrasômetro de roda de borracha e areia seca. Após os ensaios realizados em laboratório utilizando o abrasômetro com roda de borracha e areia seca seguindo os padrões estabelecidos na norma ASTM G65, iniciou-se a coleta e organização dos dados e análise dos mesmos. Pode se observar uma grande discrepância entre os materiais no que se refere ao aumento da resistência abrasiva conforme mostra as tabelas dos resultados, onde a aspensão com carboneto tungstênio cobalto cromo mostra um aumento da taxa de desgaste abrasivo 100 vezes em relação ao cromo duro e 1700 vezes ao aço inox 304. Resultados esses que aumentam a confiabilidade do equipamento, da manutenção, do tempo entre paradas de manutenção, redução de gastos com manutenção e produção. O trabalho demonstra a importância do conhecimento em tecnologias de revestimentos de superfícies e seus materiais, suas aplicações na rotina de manutenção industrial e os benefícios alcançados com esses processos.

Palavras-chave: Ensaio de desgaste abrasivo; Cromo-Duro; HVOF, tungstênio cobalto cromo.

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas industriais frequentemente encontrados é o desgaste, problema esse que reduz a eficiência de operação dos equipamentos,

eleva os gastos com manutenção, produção e substituição de componentes. A manutenção industrial é uma área que trava uma luta constante contra o desgaste, visando um aumento do tempo médio entre as falhas (MTBF) e consequente redução da substituição de peças e equipamentos. Novas técnicas e processos são constantemente estudados e propostos para reparação e preparação dos componentes para suportar as condições severas de trabalho, visando o aumento da vida útil e redução dos custos de operação e manutenção.

Tendo por base o mecanismo de desgaste, as medidas tomadas para aumento da resistência ao desgaste envolvem diretamente a superfície do material, dando o sentido para o aumento da importância dos tratamentos de superfícies como os revestimentos por cromo duro eletrolítico, aspensão térmica, PVD (Deposição Física a Vapor), etc. Em grande parte da história da manutenção industrial um dos revestimentos contra abrasão e corrosão já bem difundido comercialmente é o revestimento eletrolítico por cromo-duro (HOUDKOVÁ et al., 2011), mas devido a liberação de íons de cromo hexa-valente, presente na lista de materiais tóxicos da Agência de Proteção ao Meio Ambiente - EPA (IBRAHIM; BERNDT, 2007) substância essa, altamente cancerígena que uma vez disperso no ambiente, há a dificuldade de serem retidos por filtros (BOLELLI G, et al, 2006). Surge a crescente preocupação com a sustentabilidade e meio ambiente, levando ao desenvolvimento de novas alternativas de revestimentos menos agressivas ao meio ambiente e as pessoas.

Entre as tecnologias desenvolvidas, a aspensão térmica é o processo de revestimento metálico que se destaca, com uma vasta gama de materiais que podem ser processados através da aspensão por plasma, chama ou arco elétrico (HOUDKOVÁ et al., 2011). Técnicas essas que se mostram capazes de ser uma alternativa ao processo de cromo duro funcional, principalmente a técnica de HVOF (SOUZA; VOORWALD; CIOFFI, 2008). Essa técnica é capaz de produzir revestimentos de alta qualidade com baixo percentual de porosidade (menos que 1 por cento) e ligação altamente aderente aos substratos (PICAS et al., 2011).

O que se pretende estabelecer com este trabalho é produzir e comparar as propriedades de resistência ao desgaste abrasivo de superfície do aço inox 304 revestido por HVOF com carboneto de tungstênio cobalto cromo, em relação ao cromo duro eletrolítico ao material de substrato sem revestimento. Foi selecionado o aço inox 304 levando em conta sua aplicabilidade na indústria alimentícia, têxtil,

química, entre outras e sua presença em componentes de bombas, tubulações e equipamentos.

Os resultados dos ensaios de comparação das propriedades mecânicas de resistência ao desgaste abrasivo dos materiais foram obtidos através de ensaios de desgaste por abrasão em roda de borracha e areia seca respeitando a norma ASTM G65, além dos ensaios de rugosidade. Estabelecendo assim a seleção do revestimento metálico com as melhores propriedades de resistência ao desgaste abrasivo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo abordará os fundamentos teóricos utilizados no desenvolvimento e preparação dos experimentos, posterior análise e conclusão obtida com os resultados. Serão apresentados conhecimentos que abrangem tribologia, desgaste abrasivo, os processos de revestimentos metálicos utilizados, ensaio de desgaste abrasivo com roda de borracha e areia seca e sua norma.

2.1 TRIBOLOGIA

A Tribologia é citada por (JOST, 1990) como a ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionadas. Abrange a ciência do desgaste, lubrificação, atrito e envolve aspectos mecânicos, físicos, químicos e metalúrgicos. A tribologia é de fundamental importância em equipamentos que utilizam superfícies deslizantes e rolantes em contato. O estudo voltado aos sistemas tribológicos leva a uma diminuição ou eliminação das perdas ocasionadas pela fricção e desgaste, tornando com isso a indústria mais eficiente e produtiva.

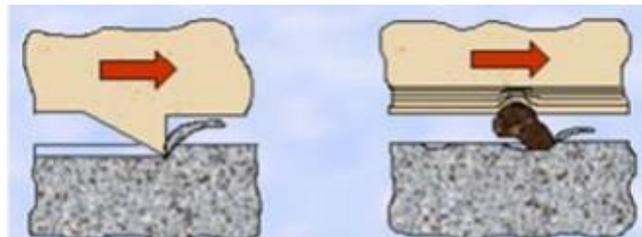
2.1.1 Desgaste abrasivo

O desgaste é a perda progressiva do material da superfície decorrente do movimento relativo e contato de um corpo sólido contra outro corpo sólido, líquido ou gasoso (DIN 50320,1997).

Segundo (HUTCHINGS, 1992) quando existe um contato e movimento entre dois corpos e atrito, há uma perda constante de material, ocorrendo o desgaste mecânico das partes. O desgaste abrasivo é provocado por partículas duras intrínsecas ou livres entre os dois corpos que com o movimento relativo ocasiona uma remoção de material superficial, sendo um dos principais responsáveis por paradas indesejáveis, quebra de equipamentos e reposição de peças, sendo o mais comum e severo na indústria (G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor, 2001). O desgaste abrasivo é classificado por desgaste a dois corpos e desgaste a três corpos, conforme mostra a fig. 1 abaixo.

O desgaste por dois corpos acontece quando as partículas se movem livremente sobre a superfície, um exemplo disso é o lixamento, a superfície dura é o agente abrasivo. O desgaste por três corpos ocorre quando partículas abrasivas como: minérios, pó, areia entres outros, estão presentes na interface entre o corpo e contra corpo, um exemplo é o polimento com uma pasta diamantada. Segundo (PASCOALI, 2004) o desgaste quando envolve três corpos é cerca de duas a três vezes menor do que quando envolve dois corpos.

Figura 1 - Classificação do desgaste abrasivo: abrasão entre dois corpos (a) e abrasão entre três corpos (b).



Fonte: (BRANKOVIC,1998) apud KÖNIG (2007)

A abrasão quando não é capaz de triturar o abrasivo é conhecido como abrasão de baixa tensão, em tensões elevadas ocorre o tritramento do abrasivo, caracterizando o fenômeno de abrasão de alta tensão.

2.2 PROCESSOS DE REVESTIMENTO DE SUPERFÍCIES METÁLICAS

O avanço contínuo de novas tecnologias, métodos de revestimentos tribológicos e a viabilidade da aplicação dos mesmos, possibilitaram o alcance de propriedades mecânicas antes inalcançáveis (HOLMBERG; MATTHEWS, 2009).

Para os revestimentos de materiais serem um processo aceitável, eles devem ter propriedades mecânicas que se sobressaem as do substrato de acordo com cada aplicação. Também devem proporcionar ao revestimento baixa porosidade, boa compatibilidade ao substrato e boa aderência e quando aplicado a substratos metálicos as propriedades micro estruturais devem oferecer alto grau de coesão. Revestimentos aplicados em substratos metálicos ainda devem ter propriedades micro estruturais que proporcionem um elevado grau de coesão de suas partículas de tal forma que não exista o contato do meio externo com o substrato (ASM, 2004).

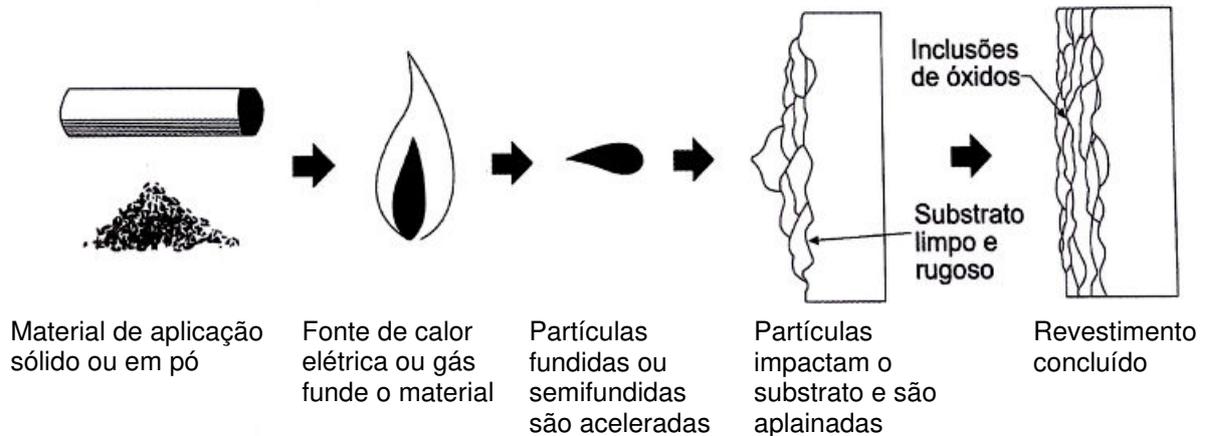
As técnicas utilizadas para aplicação dos revestimentos são divididas em seis grupos: eletroquímicas, termoquímicas, térmicas, físicas, termomecânicas, e mecânicas. Todo grupo de processos permite que se obtenham revestimentos específicos com características e espessuras particulares. Os revestimentos de superfície podem ser formados por uma técnica ou a combinação delas. (BURAKOWSKI; WIERZCHON, 1999).

Apesar de existirem vários processos que tem por objetivo a proteção do substrato contra corrosão, desgaste, trabalho a quente, etc., este estudo tem sua linha de pesquisa voltada à deposição eletroquímica de cromo duro e à aspensão térmica, mais precisamente, a técnica de HVOF com carboneto de tungstênio cobalto cromo.

2.2.1 Aspensão térmica

Segundo a American Weld Society (AWS) a aspensão térmica ou “thermal spray” é definida como um grupo de processos nos quais materiais metálicos e não metálicos em forma de arame, vareta ou pó são depositados em condição fundida ou semifundida em um substrato limpo e rugoso. Para se obter o revestimento através da aspensão térmica a matéria prima geralmente metálica em forma de arame, vareta ou pó é fundida por uma fonte de calor de origem química (combustão) ou elétrica (arco elétrico), acelerado por ar comprimido ou outros gases, conforme a fig. 2 da próxima página.

Figura 2 - Esquema de deposição das partículas.



Fonte: adaptado de Lima e Trevisan (2007).

O revestimento se forma através da deposição de várias camadas de partículas que achatadas e solidificadas resultam em uma estrutura lamelar ou lenticular. O principal objetivo dos revestimentos aplicados por aspersão é a proteção dos substratos contra desgaste erosivo, desgaste abrasivo, corrosão e fadiga superficial (MARANHO, 2006). Outra utilização desse processo é a recomposição dimensional de componentes que sofreram com o desgaste ou degradação, evitando dessa maneira a necessidade de consumo de recursos e custos altos com fabricação de novos componentes.

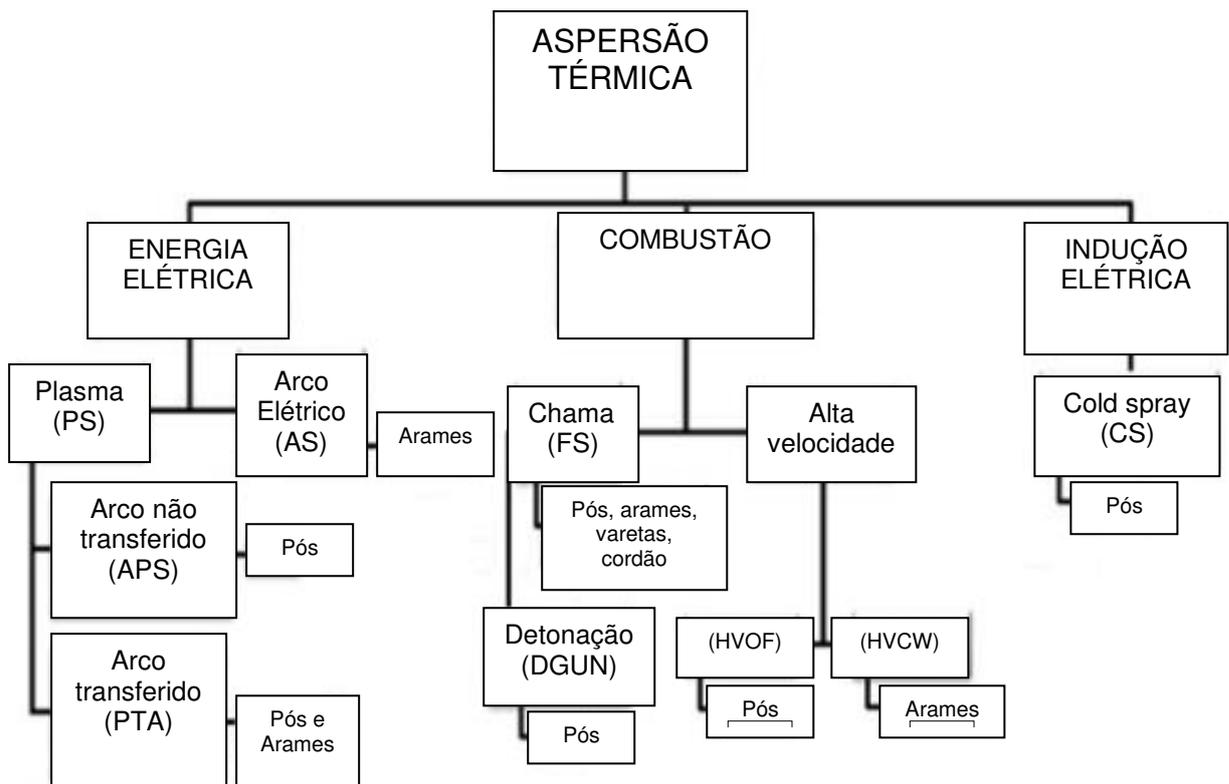
Segundo RIJEZA, (2019) na aspersão térmica existem variáveis que necessitam de um maior controle para obtenção de um revestimento de qualidade:

- Preparação do substrato: a usinagem não pode apresentar cantos vivos: devem ser usinados em chanfros de no mínimo 1 mm ou raio. A região deve estar limpa de óxidos, óleos ou graxas. A superfície deve ser jataada com oxido de alumínio para obtenção da rugosidade adequada para o revestimento;
- Temperatura do substrato: não pode passar de 180 graus C, pois pode ocorrer oxidação e deslocamento do revestimento da superfície do substrato;
- Angulo da pistola de aspersão em relação ao substrato, deve ser o mais perpendicular possível;
- Velocidade de translação da pistola, importante para evitar tensões residuais e sobreaquecimento do substrato.

Esse processo apresenta algumas vantagens em relação a outros processos de revestimentos. Dentre eles está uma maior homogeneização e

densidade dos revestimentos, excelente união com o substrato, não produz resíduos sólidos, flexibilidade por usar metal em pó ou fio e baixa distorção dos componentes. Atualmente os processos de aspersão térmica são classificados conforme o método de geração de calor. As mais utilizadas são a combustão de gases e energia elétrica que são divididos em subgrupos conforme a fig. 3:

Figura 3: Classificação dos processos de aspersão térmica.



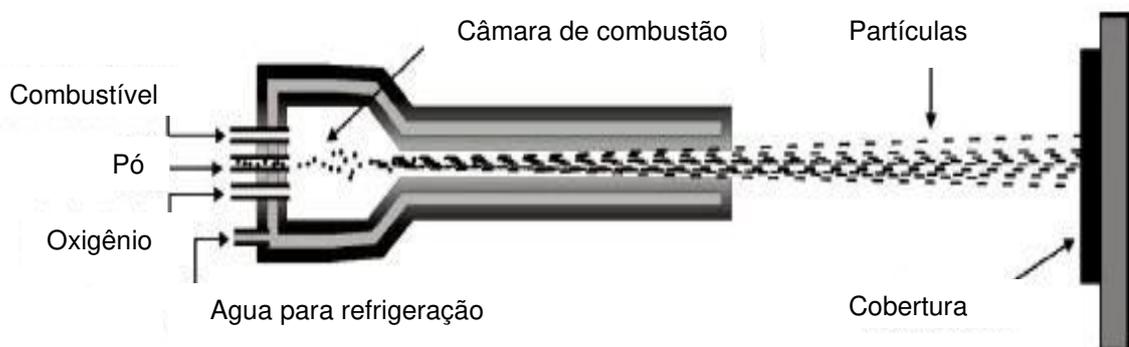
Fonte: adaptado de PAREDES, (2012).

A velocidade que as partículas fundidas ou semifundidas atingem a superfície do substrato influencia nas propriedades dos revestimentos como a porosidade e a adesividade. Os processos que resultam em maior adesividade dos revestimentos são a aspersão térmica por chama, subsônica e supersônica e os processos de detonação, podendo chegar a velocidades acima de 1000 m/s (Marques, 2003).

2.2.1.1 ASPERSÃO TÉRMICA HVOF

A aspersão térmica de alta velocidade com oxigênio combustível utiliza uma queima da mistura de gás combustível e oxigênio a alta pressão, formando assim um jato com alta velocidade. O processo pelo método HVOF foi criado como uma alternativa ao processo de detonação D-Gun e a aspersão com plasma, pois o custo inicial de instalação é menor e o revestimento possui propriedades superiores aos dois processos (ASM, 2004). Os gases combustíveis mais utilizados são: o hidrogênio, o metil acetileno propadieno, o propileno e o propano. Eles são queimados na câmara de combustão do bocal, é comprimido, aquecido e acelerado pra fora. O bocal e a câmara de combustão utilizam um sistema de refrigeração por água, devido ao calor gerado (MANFRINATO, 2010). A injeção do pó geralmente é feita axialmente ou em algumas pistolas radialmente. A distancia da aplicação varia de 120mm a 300mm, sua taxa de alimentação dos pós varia de 20 a 80g/min, o fluxo de gás combustível fica entre 40 e 60l/min, e a taxa de fluxo do oxigênio até 430l/min. A aspersão HVOF obtêm bons resultados para o uso com pós-metals cerâmicos (LIMA; TREVISAN, 2007). A fig. 4 apresenta um esquema de como acontece a aplicação de aspersão HVOF, onde o pó é introduzido axialmente e diretamente na câmara de combustão.

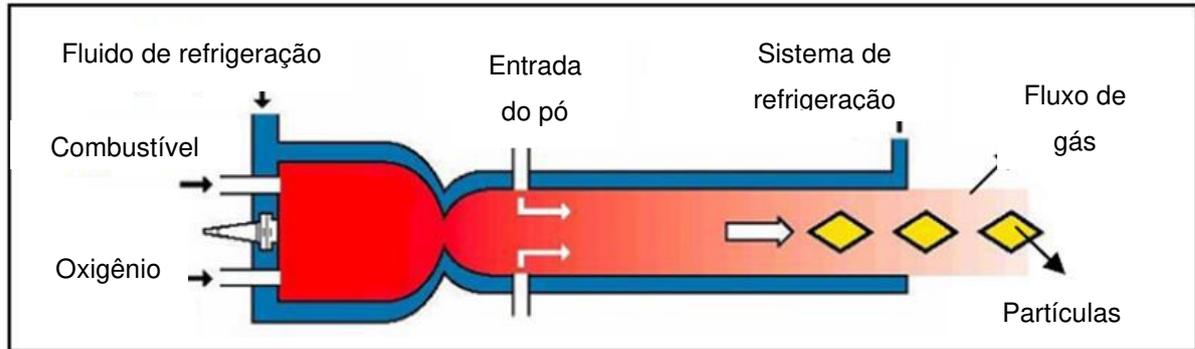
Figura 4 - Esquema de aplicação aspersão térmica por HVOF.



Fonte: Adaptado de Rijeza, (2019).

A fig. 5 mostra o princípio de funcionamento da aplicação de aspersão HVOF, onde o pó é introduzido radialmente num estágio posterior à câmara de combustão.

Figura 5 - Princípio de funcionamento de uma tocha de aspersão térmica HVOF.



Fonte: adaptado de COMELI, (2006).

Os principais materiais para revestimentos que possuem elevada dureza, resistência à corrosão e ao desgaste são: WC-Co (carbeto de tungstênio cobalto), WC-Ni (carbeto de tungstênio níquel), WC-Co-Cr, WC-Cr-Ni (carbeto de tungstênio cromo níquel) e Cr₃C₂-NiCr (carbeto de cromo níquel cromo) (SULZER METCO, 2013).

2.2.2 CARBONETO DE TUNGSTÊNIO COBALTO CROMO

A aplicação do Carboneto de Tungstênio cobalto cromo em revestimentos eleva as propriedades mecânicas como a resistência ao desgaste por abrasão, erosão e desgaste por deslizamento em baixa temperatura. Isso ocorre por possuir a dureza elevada. A adição de cromo na sua composição proporciona um elevado nível de resistência à corrosão sendo excelente na substituição do Cromo Duro. Sua estrutura é densa, levando a um baixíssimo nível de porosidade. Possui uma aderência bastante elevada ao substrato. Aplicações: Hidro geração, Agricultura, Siderurgia, Mineração, Petróleo E Gás (Rijeza, 2019). Na tab. 1 estão às características da aspersão HVOF de WC-CO-CR.

Tabela 1 - Características da aspersão HVOF de WC-CO-CR

Características	
Micro Dureza	1200 a 1350 HV
Porosidade	< 1%
Temperatura máxima de trabalho	450° C
Adesão	> 10.000 PSI
Resistência à corrosão	< 100 horas de Salt Spray
Camada máxima	0,5mm

Fonte: Adaptado de Rijeza, (2019).

2.2.3 Eletro deposição do cromo

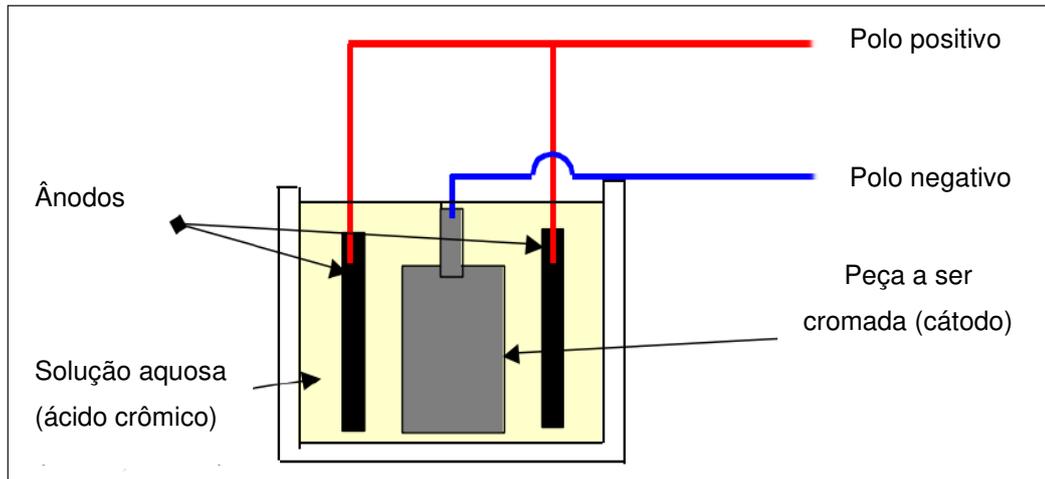
O cromo duro ou eletrodeposição química de cromo é um processo de deposição de cromo sobre substratos metálicos ou não metálicos formando assim o revestimento de superfície (CASTRO, 2012). Essa técnica já é bem difundida na indústria de beneficiamento e recuperação de peças sujeitas a corrosão, desgaste, atrito e até para fins decorativos (LEGG, 2004), porém o elemento está na lista da EPA (Agência Ambiental dos EUA) dos 129 poluentes mais críticos. Grande parte dos metais são nefrotóxicos, ou seja, tóxico para o rim. O cromo, além disso, é responsável por causar doenças fatais como tumores. Sua toxicidade está limitada aos compostos hexavalentes, que tem ação irritante e corrosiva no corpo humano. Quando inalado causa grave irritação das vias respiratórias, reconhecido como um carcinogênico humano. Mesmo existindo um limite para consumo humano de 0,05 miligramas por litro estabelecido pela Organização Mundial da Saúde (OMS) não existem pesquisas científicas comprovando qual o nível de cromo ingerido pode vir causar a doença (Revista TAE, 2013).

A deposição galvânica ou eletrodeposição ocorre por deposição eletrolítica, ou seja a deposição dos íons tri ou hexavalentes do cromo sobre um substrato imerso em um meio eletrolítico, submetido a uma passagem de corrente elétrica pelo substrato(LAUSMANN, 1996). As principais etapas do processo são: Desengraxe alcalino > Decapagem ácida > Desengraxe eletrolítico > Ativação ácida > Banho de Zinco- Cobalto > Cromatização > Selante.

No polo negativo o catodo é fixado na peça em que vai ocorrer a deposição, o polo positivo é fixado aos anodos, conforme mostrado na fig. 6 que devem ser condizentes a geometria da superfície que sofrera a cromagem, a

distância necessita ser constante durante o processo para que a uniformidade da deposição seja garantida (SOUZA, et al., 2003).

Figura 6 - Processo de eletrodeposição do cromo.



Fonte: adaptado de SOUZA, et al., (2003).

Quando a corrente elétrica passa nesse sistema obtém-se a eletrólise. A variação da temperatura e densidade de corrente influencia diretamente sobre a dureza, porosidade e aparência do revestimento, usualmente as temperaturas do processo variam entre 50 e 55 graus Celsius e a densidade de corrente entre 15 e 35 A/dm² (SOHI; KASHI; HADAVI, 2003).

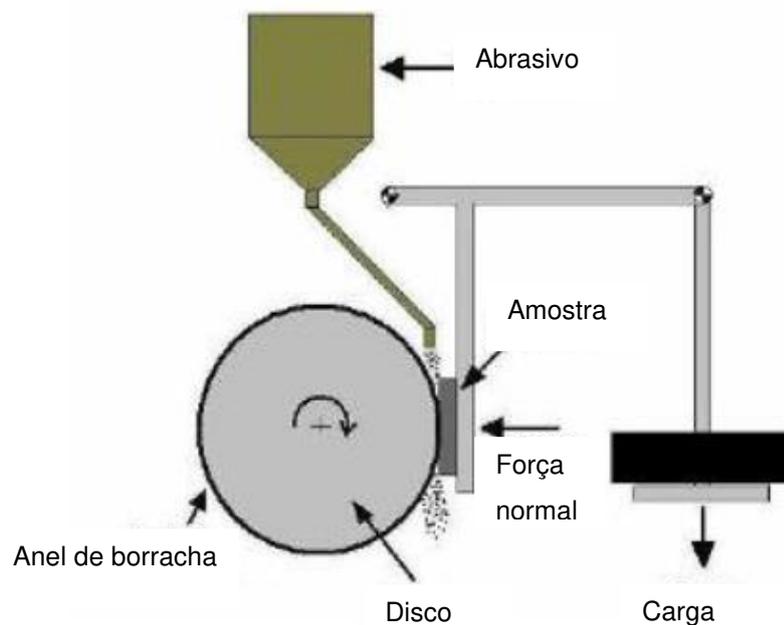
As principais características do revestimento são: espessura de 0,3 a 300 micrometros, dureza entre 850 e 1250 HV, estrutura cristalina hexagonal até 370°C, densidade de 7,1 g/cm³, com ponto de fusão de 1903°C e um coeficiente de dilatação térmica de $8,1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, (LAUSMANNL, Apud SOUZA, 2014).

2.3 ENSAIOS DE DESGASTE ABRASIVO USANDO AREIA SECA E RODA DE BORRACHA

Usando uma relação com os parâmetros de campo, o ensaio de desgaste abrasivo vem sendo utilizado como uma das maneiras mais eficazes na classificação dos materiais resistentes a abrasão, possibilitando a escolha de uma melhor solução para a aplicação. Utilizado para testes de diversos parâmetros que influenciam na resistência ao desgaste como: o tamanho, a forma das partículas abrasivas e as propriedades mecânicas do material (BAYER, 2004).

O ensaio com roda de borracha simula a abrasão de baixa tensão, mantendo um fluxo constante de abrasivos em queda livre entre o corpo de prova pressionado com um sistema de braço alavanca, numa roda revestida com borracha girando no sentido do fluxo abrasivo. O revestimento de borracha é utilizado para evitar o esmagamento dos grãos entre a roda e a amostra. O desgaste será determinado pela perda de massa dividida pela densidade, resultando no volume de material perdido. (BAYER, 2004). A fig. 7 mostra a configuração do equipamento conforme a norma ASTM G65.

Figura 7: Abrasômetro do tipo roda de borracha e areia seca.



Fonte: adaptado de Castro (2010).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo irá demonstrar passo a passo o desenvolvimento dos experimentos, os materiais e processos envolvidos já embasados teoricamente nos capítulos anteriores.

3.1 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Foram fabricados a partir de uma barra chata em inox 304, 9 corpos de prova com dimensões 3" x 1" x 1/2" conforme norma ASTM G65, utilizando uma poli corte e uma esmerilhadeira angular para aproximação das medidas para posterior usinagem. Os corpos foram usinados em uma fresadora ferramenteira utilizando uma ferramenta cabeçote de fresar com pastilha intercambiável com diâmetro de 50mm, com velocidade de corte de 40mm/min e rotação de 600 RPM. Todas as amostras tiveram o esquadrejamento e medidas aferidos após usinagem, a fim de controlar a tolerância de +- 0,12mm de diferença do plano da superfície exigida na norma (ASTM-G65, 2016). O material e as ferramentas para fabricação dos corpos de prova foram disponibilizados pela empresa Metalcol Equipamentos Industriais, Criciúma, SC.

3.1.1 Corpos de prova em inox 304 sem tratamento de superfície

Três corpos de prova passaram pelo processo de corte e usinagem, respeitando as medidas estabelecidas na norma já citadas anteriormente, foram mantidos com o acabamento de usinagem sem nenhum tratamento de superfície com o objetivo de manter a rugosidade resultante do processo para testes.

3.1.2 Corpos de prova em inox 304 com revestimento de cromo duro

As amostras foram submetidas aos processos de corte e usinagem respeitando os parâmetros exigidos na norma, posteriormente foram enviadas para o tratamento superficial de eletrodeposição do cromo. O tratamento de superfície foi executado somente na área a ser ensaiada. Foi mantido o acabamento de superfície realizado na empresa, para obter-se uma fidelização a uma situação real de aplicação na indústria, sempre mantendo os parâmetros exigidos na norma ASTM G65.

3.1.3 Corpos de prova em inox 304 com revestimento de carboneto de tungstênio cobalto cromo por aspersão HVOF.

Os corpos de prova foram submetidos ao processo de corte para aproximação das medidas e posteriormente ao processo de usinagem, as amostras foram enviadas a metalúrgica Rijeza, situada na cidade de São Leopoldo, RS. Os corpos de prova foram submetidos a um processo de preparação de superfície iniciando com uma limpeza para eliminação de óxidos, óleo ou graxa. Após a limpeza completa inicia-se o processo de jateamento com óxido de alumínio visando uma rugosidade adequada para o correto ancoramento do revestimento no substrato, subsequente a este processo as amostras foram pré-aquecidas a 120 °C. No processo de aspersão térmica HVOF utilizou-se o equipamento TAFE/PRAXAIR JP-5000 HP/HVOF e como consumível o pó de carboneto de tungstênio cobalto cromo, na tab. 2 e 3, seguem os parâmetros utilizados e a composição química do material depositado. Os corpos de prova já aspergidos foram submetidos ao acabamento de polimento, ocasionando assim uma rugosidade menor em relação aos outros dois processos.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados na aspersão.

Gases/combustível:		
	Vazão (m ³ /h)	Pressão entrada (psi)
Oxigênio:	1850	210
Nitrogênio:	23 +-2	50
	Vazão (galões/h)	Pressão entrada (psi)
Querosene	6	170

Fonte: adaptado de Rijeza, (2019).

Tabela 3 - Composição química do carboneto de tungstênio cromo.

Revestimento	
Nomenclatura	Carboneto de Tungstênio Cobalto Cromo
Composição	86WC – 10 Co – 4 Cr

Fonte: adaptado de Rijeza, (2019).

3.2 PREPARAÇÕES PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE DESGASTE ABRASIVO

Com os 9 corpos de prova em mãos foi realizado um acabamento com uma lixa 200 nas laterais para retirada de rebarbas proveniente das aplicações na

superfície. Posteriormente realizou-se uma limpeza dos corpos de prova utilizando álcool etílico 99,5° e um pincel, retirando com isso qualquer resíduo indesejável das amostras, as amostras foram secas e identificadas. Com o objetivo de registrar a massa inicial dos corpos para posterior cálculo de perda de volume, inicia-se a medição de massa das amostras utilizando uma balança analítica modelo BEL M214Ai com precisão de 0.0001g como é demonstrado na fig. 8. Cada amostra teve sua massa medida 3 vezes para obter uma média dos 3 valores e maior confiabilidade nos resultados.

Figura 8 - Medição de massa das amostras.



Fonte: do autor, (2019).

Após organização dos dados da massa inicial dos corpos de prova, realizou-se as medições de rugosidade da superfície a ser ensaiada, cada amostra passou por 6 medições rugosidade, foi medida 3 vezes em sentido perpendicular a direção do fluxo abrasivo do ensaio de desgaste e 3 vezes em sentido paralelo ao fluxo do abrasivo, conforme mostrado na fig. 9 na próxima página, com objetivo de determinar as características obtidas em cada processo realizado. As medições foram executadas utilizando um rugosímetro digital portátil Mitutoyo, SJ-310, em Ra e utilizando uma cut-off (comprimento de onda) de 4mm.

Figura 9 - Medição de rugosidade superficial.

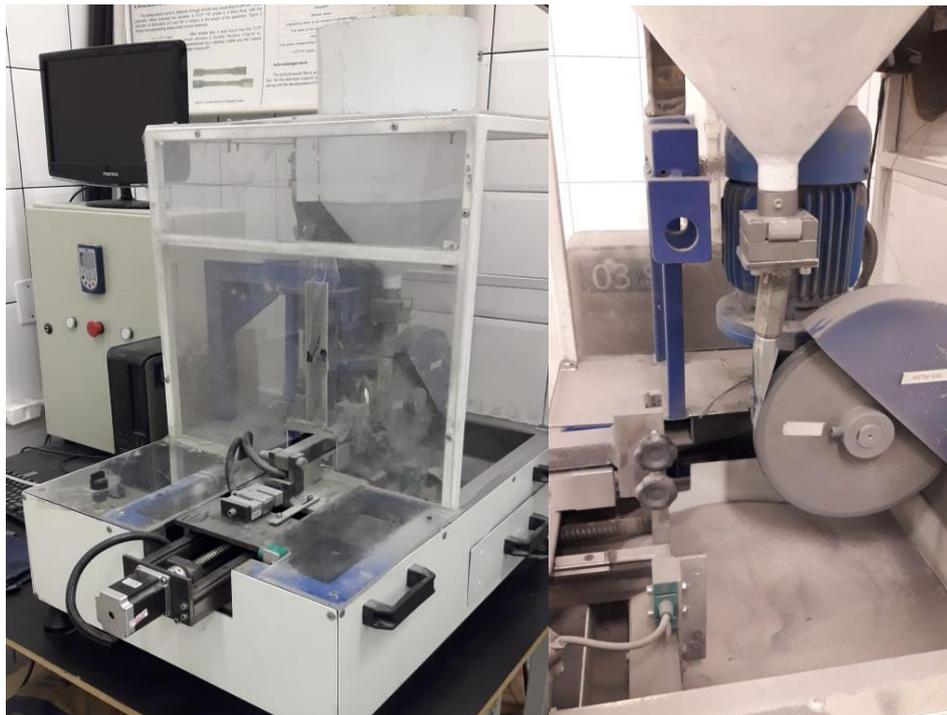


Fonte: Do autor, (2019).

3.3 ENSAIO DE DESGASTE ABRASIVO

É intenção do presente método de ensaio, produzir dados que vão classificar materiais na sua resistência à abrasão sob um conjunto específico de condições determinadas pela norma ASTM G65 (ASTM G65, 2016). Os ensaios foram realizados no laboratório de desgaste de superfícies-LDS da SATC, utilizando um abrasômetro de roda de borracha com areia seca, mostrado na fig. 10.

Figura 10 : Abrasômetro do LDS – Faculdade Satc



Fonte: Do autor, (2019).

Foram ensaiados nove corpos de prova divididos em três grupos, determinou-se o padrão de teste nível A da norma, utilizado para classificação de materiais de média a elevada resistência à abrasão, os parâmetros utilizados no teste foram: rotação da roda de borracha 200 rpm, força normal 130 N, vazão da areia 300 g/min, tipo de areia NBR 7214 N^o. 50, duração do ensaio 6089 rpm. Depois de ensaiados os corpos de prova realizou-se a limpeza dos mesmos com álcool etílico 99,5 e posterior secagem com soprador, em sequência as peças foram pesadas novamente na balança de precisão 0.0001 g modelo BEL M214Ai para posterior cálculo da taxa de desgaste do material.

Após obter os valores médios de massa inicial e da massa dos corpos de prova, realizou se o cálculo da diferença de massa para descobrir a massa perdida (g) das amostras e posteriormente utilizar os dados obtidos para cálculo do peso específico e posteriormente da perda volumétrica ocasionado pelo ensaio abrasivo.

A fim de se chegar ao valor do peso específico de cada amostra, foi calculado o volume das amostras, para isso realizou se a medição dos corpos de prova. Para obtenção do peso específico em g/mm³ foi utilizada a equação básica do peso específico.

$$Pe = \frac{P}{V} \quad [\text{Eq. 01}]$$

Onde:

Pe = peso específico

P = peso inicial e o peso final da amostra em g

V = volume da amostra em mm³.

Com os dados do peso específico em mãos realizou se o cálculo da taxa de perda volumétrica utilizando a equação 2 segundo a norma regente:

$$Q' = \frac{\left(\frac{M_i - M_f}{\rho}\right) \cdot 1000}{4309} \quad [\text{Eq.02}]$$

Onde:

Q' = taxa volumétrica de desgaste abrasivo (mm³/m);

Mi = Massa inicial da amostra;

Mf = Massa final da amostra (g)

ρ = Peso específico do material (g/cm³)

Através desses métodos e em posse desses dados dos corpos de prova foi possível realizar a análise através dos resultados para definir qual revestimento de superfície obteve melhor resultado na resistência ao desgaste abrasivo.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados dados obtidos nos experimentos em laboratório do ensaio de rugosidade, ensaio de desgaste abrasivo e os resultados finais obtidos nas fórmulas para o cálculo da taxa de desgaste.

4.1 ENSAIOS DE RUGOSIDADE

Com o objetivo de caracterizar a influência da rugosidade dos corpos obtida nos 3 processos que foram submetidas às amostras numa situação de desgaste abrasivo a 3 corpos, efetuou-se a medição da rugosidade superficial paralelamente e perpendicularmente ao fluxo de abrasivo do ensaio de desgaste antes do ensaio de desgaste. Cada corpo de prova foi submetido a 3 medições de rugosidade em Ra paralelo ao fluxo do abrasivo e 3 medições perpendiculares ao fluxo da areia abrasiva. Na tab. 4 são apresentados os valores de cada medição.

Tabela 4 - Rugosidade superficial das amostras.

Amostras	Rugosidade da superfície das amostras			
	Média da rugosidade paralela (μm)	Desvio padrão (μm)	Média da rugosidade perpendicular (μm)	Desvio padrão (μm)
HVOF WC-CO-CR	0,024	0,001	0,021	0,001
Cromo duro	0,146	0,029	0,329	0,046
Inox 304 usinado	2,113	0,090	0,951	0,050

Fonte: do autor, (2019).

Pode se observar em relação ao ensaio de rugosidade uma discrepância entre os valores no que se refere às medidas obtidas do aço inox, com as medições perpendiculares e paralelas a direção do ensaio abrasivo, conclui se que a direção da usinagem do corpo de prova influenciou diretamente na rugosidade final do processo. Observou-se também uma menor rugosidade e um menor desvio padrão no processo de aspersão com acabamento polido em relação ao processo eletrolítico com cromo duro lixado.

4.2 ENSAIOS DE DESGASTE ABRASIVO

Através da utilização das medições de massa inicial e após o ensaio de desgaste, pode se obter os resultados em relação à perda de massa das amostras e determinar posteriormente com o uso da equação 2, o revestimento de superfície abordado no artigo com maior resistência ao desgaste abrasivo com areia seca, segue abaixo os resultados das medições de massa inicial e final na tab.5 e 6, na tabela 7 a diferença de massa dos corpos de prova.

Tabela 5 - Valores obtidos nas pesagens iniciais dos corpos de prova.

Inox 304		Medição 1	Medição 2	Medição 3	Massa média	Desvio padrão
Corpo de prova 1		153,2272 g	153,2271 g	153,2269 g	153,2271 g	0,0001
Corpo de prova 2		151,6892 g	151,6894 g	151,6894 g	151,6894 g	0,0001
Corpo de prova 3		149,3174 g	149,3179 g	149,3178 g	149,3178 g	0,0002
Cromo duro		Medição 1	Medição 2	Medição 3	Massa média	Desvio padrão
Corpo de prova 1		146,7001 g	1446,6996 g	146,6994 g	146,7001 g	0,0003
Corpo de prova 2		142,6117 g	142,6115 g	142,6111 g	142,6115 g	0,0003
Corpo de prova 3		142,6645 g	142,6645 g	12,6642 g	142,6645 g	0,0001
HVOF WC-CO-CR		Medição 1	Medição 2	Medição 3	Massa média	Desvio padrão
Corpo de prova 1		154,6805 g	154,6807 g	154,6805 g	154,6805 g	0,0001

A tabela continua na próxima pagina.

Corpo de prova 2	155,7581 g	155,7579 g	155,7581 g	155,7581 g	0,0001
Corpo de prova 3	157,8695 g	157,8699 g	157,8694 g	157,8695 g	0,0002

Fonte: do autor, (2019).

Tabela 6 - Valores obtidos nas pesagens iniciais dos corpos de prova

Inox 304		Medição 1	Medição 2	Medição 3	Massa média	Desvio padrão
Corpo de prova 1		150,967	150,9668	150,9668	150,9668	0,0001
corpo de prova 2		148,2896	148,2891	148,2893	148,2893	0,0002
Corpo de prova 3		146,3721	146,3715	146,3716	146,3716	0,0003
Cromo duro		Medição 1	Medição 2	Medição 3	Massa média	Desvio padrão
Corpo de prova 1		146,6529	146,6529	146,653	146,6529	0,0000
Corpo de prova 2		142,558	142,5581	142,558	142,558	0,0000
Corpo de prova 3		142,5968	142,5969	142,5968	142,5968	0,0000
HVOF WC-CO-CR		Medição 1	Medição 2	Medição 3	Massa média	Desvio padrão
Corpo de prova 1		154,6718	154,6713	154,6712	154,6713	0,0003
Corpo de prova 2		155,7497	155,7497	155,7498	155,7497	0,0000
Corpo de prova 3		157,8596	157,8596	157,8597	157,8596	0,0000

Fonte: do autor, (2019).

Tabela 7: Massa perdida

Inox 304	Massa inicial(g)	Massa final(g)	Massa perdida(g)
Cp1	153,2271	150,9668	2,2603
Cp2	151,6894	148,2893	3,4001
Cp3	149,3178	146,3716	2,9462
Cromo duro	Massa inicial(g)	Massa final(g)	Massa perdida(g)
Cp1	146,7001	146,6529	0.0472

A tabela continua na próxima pagina.

Cp2	142,6115	142,558	0.0535
Cp3	142,6645	142,5968	0.0677
HVOF WC-CO-CR	Massa inicial(g)	Massa final(g)	Massa perdida(g)
Cp1	154,6805	154,6713	0.0092
Cp2	155,7581	155,7497	0.0084
Cp3	157,8695	157,8596	0.0099

Fonte: do autor, (2019).

Com os resultados da massa dos corpos de prova, pode-se obter através da equação 1 e 2, a taxa de desgaste volumétrico de cada corpo de prova, determinando assim o material com a maior resistência a abrasão de baixa tensão, os resultados do cálculo da taxa de desgaste volumétrico seguem na tab. 7.

Tabela 8 - Taxa de desgaste volumétrico das amostras em mm³/m

Aço inox 304	Taxa inicial	Taxa final	Diferença
Amostra 1	0,0667	0.0677	0.0010
Amostra 2	0.1006	0.1030	0.0024
Amostra 3	0.0875	0.0893	0.0018
Cromo duro	Taxa inicial	Taxa final	Diferença
Amostra 1	0.001397	0.001398	0.00001
Amostra 2	0.001588	0.001589	0.00001
Amostra 3	0.002016	0.002017	0.00001
HVOF WC-CO-CR	Taxa inicial	Taxa final	Diferença
Amostra 1	0.0002706	0.0002707	0.00000
Amostra 2	0.0002473	0.0002473	0.00000
Amostra 3	0.0002916	0.0002916	0.00000

Fonte: do autor, (2019).

Através desses resultados utilizando uma relação entre os revestimentos e o material de substrato, pode se observar uma taxa de desgaste aproximadamente 170 vezes menor do cromo para o substrato, e relacionando o processo HVOF tungstênio-cromo ao substrato, a aspensão resultou em uma taxa de desgaste 1700 vezes menor do que o aço inox 304 usinado.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Através dos resultados obtidos nesse artigo, ficou em evidência a necessidade dos ensaios específicos em laboratório para determinar com precisão qual revestimento possui melhor resistência a abrasão a baixa tensão.

As amostras também foram submetidas a ensaios de rugosidade que determinou um resultado extra do artigo, através de medições perpendiculares e paralelas a usinagem, observou-se a influência dos processos que foram submetidos os corpos de prova e seus acabamentos na rugosidade final e a homogeneidade da mesma nos revestimentos.

Perante aos resultados obtidos no ensaio de desgaste, observou se um aumento da resistência à abrasão utilizando os revestimentos, em relação ao substrato utilizado a aspersão térmica HVOF com tungstênio cromo obteve aproximadamente 1700 vezes mais resistência que o aço inox 304, enquanto o revestimento de cromo duro eletrolítico teve um resultado 10 vezes menor comparado à aspersão utilizada no artigo e aproximadamente 170 vezes em relação ao substrato utilizado, demonstrando assim uma alta resistência à abrasão obtida na aspersão.

Com esses resultados concluímos que a aspersão térmica HVOF utilizando o tungstênio-cromo é um processo viável em indústrias de alta produção onde paradas não programadas e um MTBF curto podem acarretar em enormes prejuízos aos resultados de produção e manutenção, acarretando em um custo final maior do produto.

Levando em conta os resultados obtidos nesse artigo, são feitas as seguintes sugestões para artigos futuros:

Em relação aos ensaios de rugosidade, deve se realizar ensaios que determinem a influência do acabamento final nos materiais utilizados no artigo na resistência ao desgaste abrasivo.

REFERÊNCIAS

- ASM Internacional. **ASM Handbook of Thermal Spray Technology**. ASM Internacional. Washington, EUA, 2004. p. 338.
- ASTM G65-16. **Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry AWS**; AMERICAN WELDING SOCIETY – **Thermal spraying – Practice, Theory and Application**. AWS. 1985. p. 170.
- BAYER, G. Raymond. **Mechanical Wear Fundamentals and Testing**: 2. ed. USA, 399p. 2004.
- BLOMBERG, A., HOGMARK, S., LU, J.; **An electron microscopy study of worn ceramic surfaces**, *Tribol. Int.*, v. 26, n. 6, p. 369-381, 1993.
- BOLELLI G, et al. **Corrosion resistance of HVOF-sprayed coatings for hard chrome replacement**. *Corrosion Science*. 2006;
- 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. F. **Resistência ao desgaste Abrasivo das Sapatas de Trator de Esteira após o Processo de Recuperação**. UTFPR, Curitiba, 2010.
- CHEIS, Daiana. *Revista TAE*. **Os danos que o Cromo Hexavalente pode causar à saúde**. Disponível em : <http://www.revistatae.com.br/6928-noticias> Acesso em : 21 de outubro de 2019.
- COMELI, F. W. **Estudo de Revestimento Aspergido por HVOF Contra o Desgaste em Hastes de Válvulas de Turbinas Termelétricas**. Dissertação de Mestrado, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Dezembro, 2006.137p.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 50320: Análise Sistemática dos Processos de Desgaste. Classificação dos Fenômenos de Desgaste. Metalurgia e Materiais**. São Paulo: ABM, 1997, p. 619-622.
- EYRE, T. S. **Friction and wear mechanisms of metals**, In: **II Seminário Sobre Materiais Resistentes ao Desgaste**, Uberlândia, ABM 1991, Anais, p.263-292.
- G. W. STACHOWIAK, A. W. Batchelor. **Engineering Tribology**, BH (Butterworth Heinemann), 2001.

HOLMBERG, K.; MATTHEWS, A. **Coatings tribology: properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering**, Volume 10. 2 ed. Ilustrada. Elsevier, 2009. p. 560.

HOUDKOVÁ, Š. et al. **Comparative Study of Thermally Sprayed Coatings Under Different Types of Wear Conditions for Hard Chromium Replacement**. Tribology Letters, v. 43, n. 2, p. 139-154, 8 maio. 2011.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Londres: Edward Arnold, 1992.

IBRAHIM A, Berndt CC. **Fatigue and deformation of HVOF sprayed WC-Co coatings and hard chrome plating**. Materials Science and Engineering. 2007; 456(1-2): 114-119.

JOST, H. P., 1990, **Tribology-origin and future**, Wear, v.136, pp.1-17. .

KONIG, R.G.; OLIVEIRA,C.A.S.; GILAPA,L.C.M^a. **Estudo do efeito de revestimentos na resistência ao desgaste em matrizes de corte para a conformação a frio de elementos de fixação**. CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA,8. 2007.Cusco, Peru.

LAUSMANN, G. A. **Electrolytically deposited hardchrome**. v. 87, p. 814–820, 1996.

LEGG, K.O., **Hard chromium replacements**. Proc. 4th Int. Chromium Colloquium Conf., Ste Etienne, France, May, 2004.

LIMA, C. R. C.; TREVISAN, R. E. **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Artliber, 2007. 148 p.

MANFRINATO, M. D.; VARAVALLO, R.; ROSSINO, L. S.; CAMARGO, F.; MALUF, O. **Metallic Coating Adhesion Obtained Through Spraying Testing**. In: **18 Internation Federation for Heat Treatment and Surface Engineering**, 2010, Rio de Janeiro/RJ, 2010.

MARANHO, O.; SINATORA, Amilton. **Aspersão térmica de ferro fundido branco multicomponente**. 2006. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MARQUES, P. V. **Aspersão Térmica**. Infosolda, 2003. Disponível em: http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos_solda/asperso-termica.pdf. Acesso em 15 de outubro de 2019

PAREDES, RAMON S. CORTES, **Aspersão Térmica, Projeto de Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagem Especiais**, Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Curitiba PR, 2012.

PASCOALI. S. **Introdução ao Desgaste Abrasivo**. Florianópolis, SC, 2004.

PICAS, J. A. et al. **Tribological evaluation of HVOF thermal-spray coatings as a hard chrome replacement.** *Surface and Interface Analysis*, v. 43, n. 10, p. 1346-1353, 29 out. 2011.

REVISTA TAE. **Os danos que o Cromo Hexavalente pode causar à saúde.** 2019. Disponível em <http://www.revistatae.com.br/6928-noticias> . Acesso em : 11 de outubro de 2019.

RIJEZA (Rio grande do sul). **E - book tudo que você precisa saber sobre aspersão térmica.**2019. Disponível em : <https://www.rijeza.com.br/espaco-academico/apresentacoes/ebook-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-aspersao-termica>. Acesso em: 10 de outubro 2019.

RIJEZA (Rio Grande do Sul). **E-Book Ligas Metálicas para Revestimentos Contra Desgastes.** 2019. Disponível em: <https://www.rijeza.com.br/espaco-academico/apresentacoes/e-book-ligas-metalicas-para-revestimentos-contradesgastes>. Acesso em: 10 de outubro 2019.

RIJEZA (Rio Grande do Sul). **Revestimentos contra desgaste.** 2019. Disponível em: <https://www.rijeza.com.br/aspersao-termica>. Acesso em: 21 out. 2019.

Sand/Rubber Wheel Apparatus. West Conshohocken. Pennsylvania. 2016

SOHI, M. H.; KASHI, A.; HADAVI, S. M. **Comparative tribological study of hard and crack-free electrodeposited chromium coatings.** *Journal of Materials Processing Technology*, v. 138, n. 1-3, p. 219–222, jul. 2003.

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, MATHEUS MACHADO DE. **Avaliação do comportamento tribológico e das propriedades de superfície do aço 4140 revestido pelos processos hvof e cromo duro eletro depositado.** 2014

SOUZA, R. C.; VOORWALD, H. J. C.; CIOFFI, M. O. H. **Fatigue strength of HVOF sprayed Cr₃C₂-25NiCr and WC-10Ni on AISI 4340 steel.** *Surface and Coatings Technology*, v. 203, n. 3-4, p. 191-198, nov. 2008.

SULZER METCO. **The Coatings Company. Coating Materials.** Disponível em: <https://www.sulzer.com/pt/Products-andServices/Coating-Materials>. Acessado em 10 de outubro, de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo. A minha família pela paciência quando abri mão de compromissos para me dedicar à execução desse artigo e pelo incentivo em conquistar uma formação acadêmica.

Ao meu padrinho Everton Colombo, proprietário da metalúrgica Metalcol equipamentos industriais LTDA. – Criciúma-SC, pelo fornecimento da matéria prima e equipamentos para fabricação dos corpos de prova, ao Darlan Geremia diretor da Rijeza metalurgia de São Leopoldo-RS que me forneceu o revestimento de aspersão HVOF de tungstênio-cromo com nenhum custo, a engenheira Bruna Bones que me orientou na escolha do revestimento adequado e me deu total assistência no decorrer do artigo, ao Ricardo Marcon, gerente comercial da Cromocil – Içara-SC, que forneceu o revestimento de cromo duro com nenhum custo.

Agradeço ao meu orientador e co-orientador pela orientação no decorrer do meu ACC, ao meu colega Marcio Afonso pelo auxílio na execução dos ensaios e a SATC pela longa jornada do ensino fundamental a graduação que percorri nessa instituição.