

AValiação de Revestimentos Protetores para Aumentar a Durabilidade dos Corpos Moedores do Moinho de Câmara Vertical

Henrique Gomes Santana¹

Franco Wronski Comeli²

Resumo: O moinho de câmara vertical é um equipamento fundamental na produção de tintas e seus derivados, seus corpos moedores apresentam durabilidade limitada, devido à constante movimentação dos discos em contato com as esferas de zircônio utilizadas para realizar o processo de diminuição da granulometria dos minérios beneficiados, causando perda de massa progressiva em seus componentes, ocasionando elevado desgaste. O presente trabalho tem como objetivo encontrar uma composição que venha aumentar a vida útil dos discos que compõe o eixo principal do equipamento, utilizando revestimentos protetores, que tenha características que venham aumentar a dureza superficial do substrato, procurando o melhor custo benefício. Nos ensaios realizados em laboratório, o revestimento por HVOF (carbeto de tungstênio), teve a menor taxa de desgaste, seguido pelo cromo duro Eletrodepositado, resultados que não foram comprovados pelos testes realizados em campo, onde o cromo duro, teve o pior desempenho. Tecnicamente, o carbeto de tungstênio obteve os melhores resultados de modo geral, com a taxa de desgaste em laboratório e a resistência aos impactos provenientes da intensa movimentação do mecanismo, mostrando-se uma boa alternativa para utilização no equipamento estudado.

Palavras-chave: Moinho de câmara vertical. Desgaste. Revestimentos Protetores. Aspersão Térmica (HVOF).

1 INTRODUÇÃO

A indústria química em geral, possui uma grande variedade de máquinas e equipamentos de médio e grande porte, tais como: tanques de estocagem, balanças, empacotadoras, e diversas máquinas que possuem movimentos rotativos ou lineares, que visam mudar as características física e químicas dos elementos processados. O processo de moagem visa diminuir a granulometria dos minerais sólidos. A intensa movimentação dos minerais sendo beneficiadas no processo, exige um elevado esforço mecânico do equipamento, e principalmente, resistência à abrasão, que é causada pela interação dos insumos com as esferas de zircônio, e com os mecanismos de moagem, tornando o ambiente extremamente agressivo para o

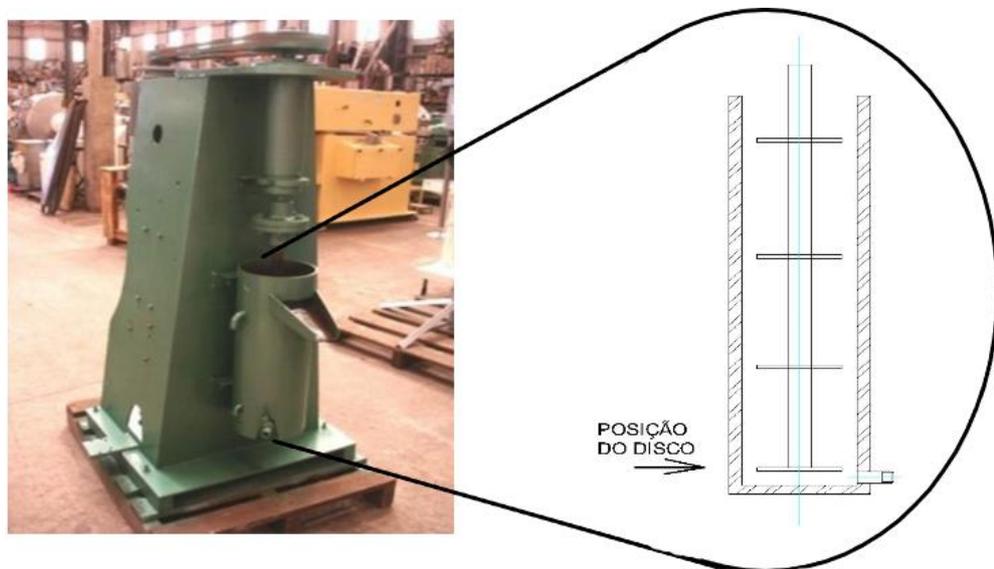
¹ Graduando em engenharia mecânica. E-mail: hsantanametal@gmail.com

² Prof. Me. Franco Wronski Comeli. E-mail: franco.comeli@engie.com.br

equipamento, e deve-se ainda levar em consideração as características físicas e químicas dos minerais sólidos, para avaliar composições que agreguem durabilidade e produtividade. Por isso é indispensável um estudo dos materiais que poderão ser utilizados na confecção dos corpos moedores. Segundo Wills e Napier-Munn (2006) *apud* Miguel (2014), pelo menos metade do custo operacional de uma planta é gasto na etapa de cominuição (energia, corpos moedores e revestimento).

O moinho de câmara vertical, objeto de estudo do presente trabalho, apresenta um elevado desgaste de seus componentes, ocasionando redução na produtividade de base pastosa para fabricação de tintas. O equipamento possui um conjunto de discos que compõe o sistema principal de passagem forçada do moinho, como pode-se observar na Fig.1, e trabalha com movimentos circulares, em constante atrito com esferas de silicato de zircônio, e uma composição de minerais dissolvidas em solventes, que após o beneficiamento formam a composição base utilizada na produção de tintas.

Figura 1: Imagem do moinho, com detalhe em corte da câmara e posição de funcionamento do conjunto principal.



Fonte: do Autor (2019)

A interação entre os elementos de moagem e o material beneficiado ocasionam a perda progressiva de massa dos corpos moedores, como podemos observar na Fig. 2.

Figura 2: (a) Comparação dos discos desgastados com novo, (b) conjunto desgastado.



(a)



(b)

Fonte: do Autor (2019)

O desgaste dos discos acaba proporcionando baixa na produção, paradas forçadas para manutenção, mal funcionamento do equipamento até a inviabilidade de continuar operando, necessitando de substituição de todos os elementos do conjunto. O aperfeiçoamento de máquinas e equipamentos é uma alternativa muito utilizada para solucionar problemas ou melhorar sua performance. Essas melhorias podem partir desde a substituição destes equipamentos por novas tecnologias, ou modificando determinado parâmetro que não apresenta desempenho satisfatório. Sendo assim, o presente trabalho irá realizar uma análise de revestimentos protetores, com propriedades específicas, como elevada dureza superficial, visando melhorar o funcionamento dos moinhos de câmara vertical, comparando-os com o material atualmente utilizado, que será devidamente caracterizado. Nos ensaios de desgaste foram analisados os seguintes materiais: aço SAE 1045 revestido com carbetos de cromo e carbetos de tungstênio aplicado pelo processo de aspersão térmica por HVOF, aço SAE 1045 revestido com cromo duro e ferro fundido branco nitretado a plasma. Foram realizados ensaios de desgaste tipo roda de borracha ASTM G65, e realizados testes de dureza e microdureza em todos os materiais avaliados no trabalho. Em adição foram realizados testes em campo para se avaliar o desempenho dos revestimentos estudados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção será dedicada a referenciar os temas de estudo, abrangendo materiais, dureza e revestimentos protetores.

2.1 DESGASTE

O desgaste pode ser definido, segundo referência às normas DIN 50320 (1997) e a ASTM (1993) *apud* Metamoros (2004), como a perda progressiva de massa da superfície de um corpo sólido causada pela ação mecânica, os diferentes tipos de desgaste ocorrem pela ação do movimento relativo entre um sólido com outro sólido, líquido ou gás. Sendo ainda classificada em quatro principais mecanismos de desgaste: adesão, abrasão, fadiga superficial e reação triboquímica.

Avaliando o sistema tribológico que compõe o equipamento estudado, dentre os tipos de desgaste acima citados, pode-se concluir que o mecanismo que mais influência na perda de massa é o desgaste abrasivo, devido a constante interação entre os corpos moedores e os insumos utilizados.

O desgaste é quantificado pela perda de volume que o corpo de prova sofre após o ensaio tipo roda de borracha, a Eq. 1 (ASTM G65, 2015), irá quantificar a perda de massa.

$$V_p = \frac{M_p}{\rho} * 1000 \quad (1)$$

Onde:

V_p = volume perdido (mm^3).

M_p = massa perdida (g).

ρ = densidade (g/cm^3)

Segundo Hutchings (1992), *apud* Souza (2011), Em certas condições de movimento de deslizamento a seco entre superfícies metálicas em regime de desgaste moderado, onde a perda de volume ocorre de forma progressiva e regular, Archard encontrou uma equação empírica que pode ser traduzida da seguinte forma: o volume de material removido é diretamente proporcional a carga aplicada à superfície e à distância de deslizamento, e inversamente proporcional a dureza da superfície mais macia, demonstrada na Eq. 2.

$$Q = K * \sum F_n * L \quad (2)$$

Onde:

Q = quantidade de material removido (mm^3).

F_n = força normal aplicada à superfície (N).

L = distancia percorrida durante o ensaio (mm).

K =coeficiente de Archard ou coeficiente de desgaste (adimensional).

2.2 MATERIAIS RESISTENTES AO DESGASTE

Segundo Callister (2002), várias técnicas de endurecimento estão à disposição de um engenheiro, e com frequência a seleção depende da capacidade de um material de ser adaptado às características mecânicas exigidas para uma aplicação específica, e conforme Perrott, (1977), apud Souza, uma forma de conter o desgaste é por meio de recobrimento da superfície com material de alta dureza.

A correta avaliação dos materiais que poderão vir a compor o novo conjunto, é sem dúvidas um ponto determinante do trabalho, que deve levar em conta características como ductilidade, resistência mecânica, dureza superficial, e avaliar as possíveis reações que podem diminuir a performance do material durante o processo de beneficiamento, ou operação do equipamento. Atendendo a essas condições, o presente trabalho irá direcionar suas pesquisas para a caracterização do material existente no conjunto moedor do moinho de câmara vertical, fabricado a partir de uma composição de ferro fundido branco, e os possíveis substitutos, que são ferro fundido branco com tratamento termoquímico de nitretação, aço (*Society of Automotive Engineers*) SAE 1045 revestido com cromo duro eletrodepositado, aço SAE 1045 com revestimento aspergido por HVOF - WC (carbeto de tungstenio) e aço SAE 1045 com revestimento aspergido por HVOF - WCo-Cr(carbeto de cromo).

2.2.1 Ferro Fundido Branco

Esse material é um tipo de liga que não possui grafita livre em sua microestrutura, que é formada por carbonetos difundidos em uma matriz austenítica, o carbono combina com o ferro, devido à velocidade de resfriamento diferenciada e

ao baixo valor de silício, com elevado teor de cromo, o metal tem elevada dureza. Segundo Novelli (2004), sua dureza pode variar entre 400 à 600 HV , valor obtido através média dos carbonetos de cromo que variam entre 900-1200 HV, e da perlita que varia entre 200-300 HV. É utilizado na fabricação de equipamentos para a moagem em geral, cilindros laminadores em trens de laminação, pás de britadores e outros componentes similares. Seu uso está limitado a aplicações que necessitam de uma superfície muito dura e muito resistente à abrasão e sem um grau elevado de ductilidade (Callister,2002).

2.3 REVESTIMENTOS PROTETORES

Geralmente utilizados para alterar determinada característica da superfície do metal base utilizado, como desgaste e oxidação, os revestimentos podem ser de diversos métodos de aplicação, assim como sua composição pode ser de um ou mais elementos combinados.

O endurecimento superficial é muito utilizado para se obter um material com uma superfície muito dura e resistente a abrasão, podendo ser de formas bem simples, aplicando solda sobre o material ou depositando um revestimento protetor, ou tratamento termo-químico, criando alterações na superfície. A nitretação é um tratamento termoquímico que visa o endurecimento superficial do metal pela difusão de nitrogênio e consequente formação de nitretos. O nitrogênio se difunde através do reticulado cristalino e precipita na zona superficial, como esta fase é mais dura que a martensita, obtêm-se uma superfície resistente à abrasão (Van Vlack, 2015).

O processo de nitretação ocorre à baixas temperaturas, sem entrar na faixa austenítica, causando menos deformações e sem necessidade de um tratamento térmico subsequente para aumento de dureza. No estudo de Gobbi (2009), obtêve-se microdurezas superficiais entre 1190 à 1426 HV, para ligas de alto cromo,variando diretamente a dureza com o tempo de exposição do processo.

A galvanoplastia atua como um ramo da indústria metal-mecânica dedicada ao tratamento de superfícies metálicas ou plásticas, mediante processos químicos ou eletrolíticos, com diversos materiais, tais como: cádmio, cobre, níquel, estanho, ouro, cromo e zinco (Casagrande, 2009). O processo de eletrodeposição de cromo duro, se apresenta como uma alternativa consistente na elaboração de um conjunto resistente

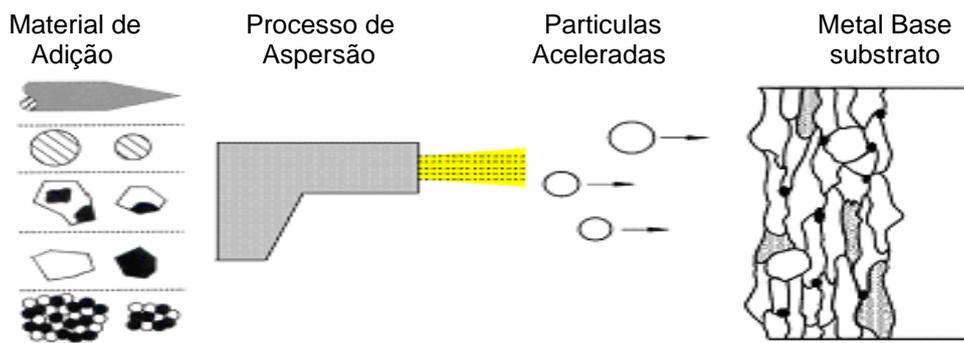
a abrasão e choques mecânicos com núcleo tenaz. Segundo Bertole (1960), *apud* Cheik (2010), o cromo duro tem dureza entre 860 à 1195 HV.

2.4 ASPERSÃO TÉRMICA – HVOF

Dentre os diversos processos de revestimento disponíveis no mercado, a aspersion térmica se apresenta como uma boa solução na alteração das características da superfície dos materiais, dispondo ao engenheiro uma grande diversidade de aplicações, devido à variedade de compósitos e processos de deposição.

De acordo com Tucker (2004), *apud* Karaoglanli *et al.* (2017), os métodos de revestimento por pulverização térmica baseiam-se no princípio da deposição de materiais à base de metal, cerâmica e cermet em pó, arame ou forma de vareta em materiais substrato depois de ser aquecido a temperaturas próximo ou maior que seu ponto de fusão, HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*) é um método de revestimento desenvolvido para pulverização de alta velocidade de pós aquecidos cujo as características podem ser observadas na Fig. 3.

Figura 3: Esquema representativo do processo de aspersion térmica.



Fonte: adaptado de Zimmermann (2004), *apud* Comeli (2006).

Segundo Kawakita *et al.*, (2003), o método de aspersion por HVOF possibilita a formação de um revestimento de alta densidade com pouca mudança da composição durante a aspersion. Isso é possível devido a velocidades das partículas supersônicas acima de 500 m/s e temperaturas relativamente baixas para os compósitos, de até 2000° C. O processo é muito utilizado para aplicação de revestimentos duros como cermets, utilizados para aumentar a resistência ao

desgaste e ou corrosão. A correta preparação do metal base para a aplicação da camada protetora, é fundamental para que ocorra uma boa adesão e para se obter um revestimento de boa qualidade e homogêneo.

O tungstênio tem como principais características alto ponto de fusão e elevado módulo de elasticidade, 3420° C e 400 GPa respectivamente, são qualidades desejáveis ao revestimento. Quando combinado com carbono, obtêm-se o carbetos de tungstênio, que pode ser aplicado com outros elementos, como cromo e níquel, aliando elevada dureza ao compósito da camada protetora. As características e composições podem ser analisadas na Tab.1.

Tabela 1: Diferentes compósitos: Dureza x Desgaste

| Tipo de Pó | Dureza HV_{0.3} | Desgaste mm³ (ASTM G65) |
|-------------------|--------------------------------|---|
| WC-17Co | 1390 | 35 |
| WC-12Co | 1310 | 25 |
| WC-10Co-4Cr | 1410 | 30 |
| WC-17Ni | 1030 | 36 |

Fonte: Adaptado de Freire (2000, p. 61)

Os dados da Tab. 1 demonstram que o composto a base de tungstênio pode ter elevada dureza, dependendo de suas combinações, que por sua vez, não tem relação direta com o desgaste, se fazendo necessário uma análise minuciosa da composição do revestimento à ser aplicado nos corpos de prova, e posteriormente nos discos que irão compor o novo conjunto do moinho de câmara vertical.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta seção serão apresentados os procedimentos para a caracterização dos revestimentos e os ensaios de desgaste para a avaliação do desempenho dos revestimentos contra o desgaste abrasivo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO DISCO ATUAL

O disco de ferro fundido branco utilizado atualmente foi caracterizado segundo a sua: composição química, dureza e microestrutura. Uma amostra do disco

original foi seccionada e usinada para se efetuar a análise química em um espectrômetro de emissão ótica marca SPECTROCAST.

A dureza da amostra na condição fornecida e nas demais condições estudadas foi determinada em durômetro de bancada Mitutoyo Modelo DUROTWIN – DT 20. A dureza foi realizada na escala Rockwell C tendo como penetrador um cone de diamante, pré carga de 98,7 N (10 kg) e carga de 1471N (150 kg).

Antes do ensaio de dureza todas as faces planas dos corpos de prova foram lixadas com lixa 200, a fim de garantir planicidade das mesmas, em todas as medições de dureza, foram efetuadas três leituras na face externa usinada dos corpos de prova.

Para a realização da micrografia, a amostra testada foi preparada aplicando operação de lixamento em politriz mecânica, foram utilizadas lixas d'água (SiC) com granulometrias de: 120, 220, 320, 400, 600, 800, 1200. Na operação de polimento foi utilizada pasta de alumina N°4. Após polimento, a amostra foi lavada com álcool isopropílico e atacada com NITAL (2,5% HNO₃) e colocada em recipiente protegido de umidade e temperatura.

3.2 CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Foram fabricados quatro corpos de prova para cada condição testada. Para a realização dos ensaios de desgaste e dureza, as amostras em aço SAE 1045 foram revestidas com cromo duro e aspergidas com carbeto de cromo e carbeto de tungstênio, e tiveram as seguintes dimensões; 12,7 x 25,4 x 60 mm. Os demais corpos de prova a base de ferro fundido branco, mediram 12,7 x 20 x 50 mm. A identificação e quantidade dos corpos de prova estão mostradas na Tab. 2.

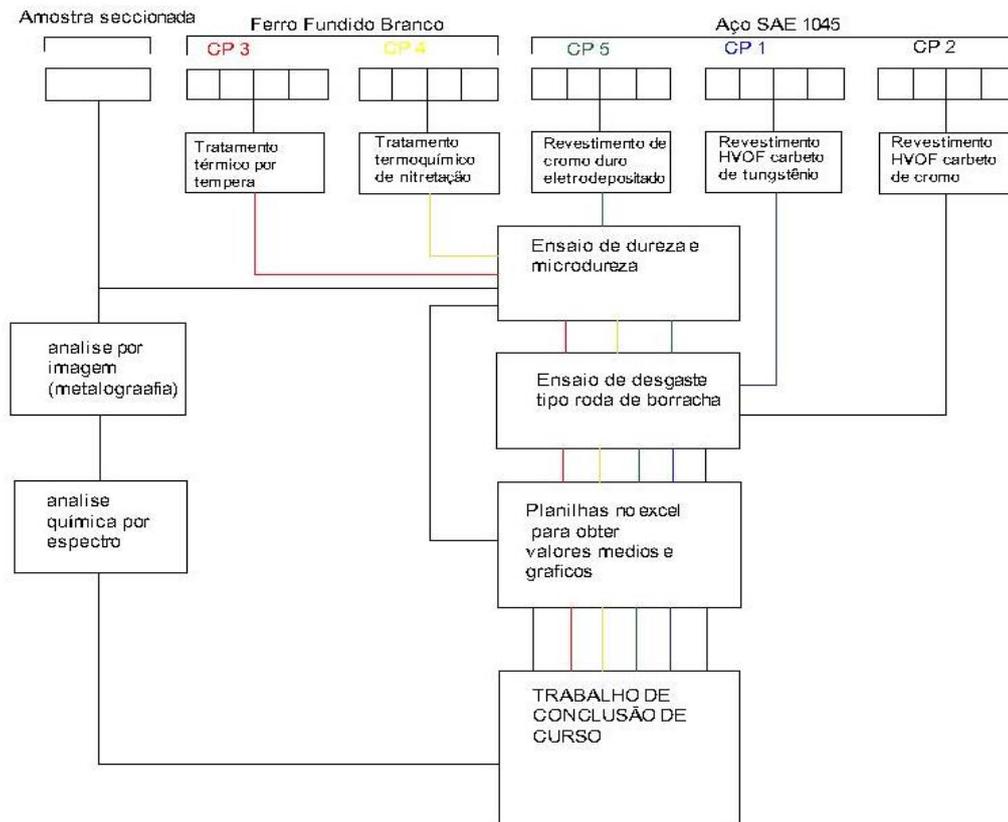
Tabela 2: Corpos de prova.

| Denominação | Composição | Quantidade |
|--------------------|---|-------------------|
| CP 01 | Aço SAE 1045 + HVOF (Carbeto de Tungstênio) | 4 peças |
| CP 02 | Aço SAE 1045 + HVOF (carbeto de Cromo) | 4 peças |
| CP 03 | Ferro Fundido Branco | 4 peças |
| CP 04 | Ferro Fundido Branco Nitretado | 4 peças |
| CP 05 | Cromo Duro Eletrodepositado | 4 peças |

Fonte: do Autor (2019)

Os revestimentos, ensaios realizados, obtenção de dados, podem ser observados de forma esquemática na Fig. 4.

Figura 4: Sequência de processos aplicados para cada material.



Fonte: do Autor (2019)

3.3 REVESTIMENTOS APLICADOS

Os corpos de prova confeccionados receberam revestimentos que visam aumentar sua dureza superficial, cada um com características de processo, aplicação e composição química diferentes.

3.3.1 Cromo Duro

O processo de eletrodeposição do revestimento de cromo duro foi realizado na empresa CROMOCIL CROMO DURO LTDA, localizada em Içara - SC.

Os elementos à serem testados (disco e corpos de prova), tiveram suas superfícies devidamente preparadas. Após foram submetidos a um procedimento

conhecido como banho de cromo, que consiste na imersão do substrato em uma solução de ácido crômico, que é composto por uma mistura de anidro crômico (Cr_2O_3), água (H_2O) e ácido sulfúrico (H_2SO_4), a ancoragem ocorre através de reação química, em um ambiente controlado à uma corrente entre 30 e 60 A/cm² e temperatura entre 50 e 65 °C. Os materiais revestidos obtiveram uma camada com uma espessura de aproximadamente 200 µm, que será constante para todos os revestimentos, facilitando assim a análise e suas comparações posteriores.

3.3.2 Nitretação

A fim de avaliar uma técnica de tratamento térmico diferenciada para o material atualmente utilizado no equipamento, foi aplicado aos elementos de teste o tratamento termoquímico de nitretação, realizados na empresa NITRION DO BRASIL, em Guaramirim – SC.

Os materiais foram devidamente limpos por jateamento e receberam tratamento térmico de normalização, deixando a superfície com dureza uniforme, sem reações inerentes dos processos de fabricação, para após serem inseridos em um forno de plasma, com uma atmosfera controlada, composta por 80% de hidrogênio (H_2) e 20% de nitrogênio (N_2) à uma pressão de 500 Pa, frequência de 9000 Hz e temperatura de 500 °C, por três horas, proporcionando uma camada com profundidade aproximada de 200 µm.

3.3.3 Aspersão Térmica

O processo de deposição dos carbeto de tungstênio (WC) e carbeto de cromo (Cr_3C_2), por HVOF foram realizados na empresa METALURGICA RIJEZA, que fica situada em São Leopoldo - RS. Os corpos de prova tiveram as superfícies devidamente preparadas, recebendo jateamento por granalha, com um abrasivo composto por oxido de alumínio (Al_2O_3) eletro fundido, proporcionando uma boa ancoragem e limpeza eficaz.

Após a preparação, os corpos de prova, foram pré-aquecidos à 120 °C, antes da aplicação dos revestimentos, que foram realizados no equipamento

TAFA/PRAXAIR JP5000, cujo parâmetros de funcionamento podem ser observados na Tab.3.

Tabela 3: Parâmetros utilizados para aplicação do revestimento aspergido por HVOF.

| Parâmetro | Oxigênio | Querosene | Nitrogênio | Distância | RPM | Pressão de combustão |
|------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----|----------------------|
| Quantidade | 1750 Scfh | 57 Gph | 21 Scfh | 432 mm | 5 | 100 Psi |

Fonte: do Autor (2019)

As siglas SCFH e GPH significam pés cúbicos por hora e galões por hora respectivamente, o equipamento utiliza compósitos em forma de pó, a uma alimentação de 75 g/min., sendo aquecidos a temperaturas de até 2000 °C, e acelerados contra o substrato a uma velocidade entre 1000 e 1200 m/s, formando revestimento de 200 µm de espessura.

3.4 ENSAIO DE DESGASTE.

Os ensaios foram realizados no laboratório LAVITRI (Laboratório de Vibrações e Tribologia) do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade SATC. Antes de iniciar os testes os corpos de prova foram submetidos à limpeza do tipo ultrassônica em uma solução de álcool, no equipamento Metason 14, da marca Panambra, em seguida pesados em uma balança modelo AD 500, da marca Marte, com precisão de três casas decimais e um range de 0,02 até 515 g.

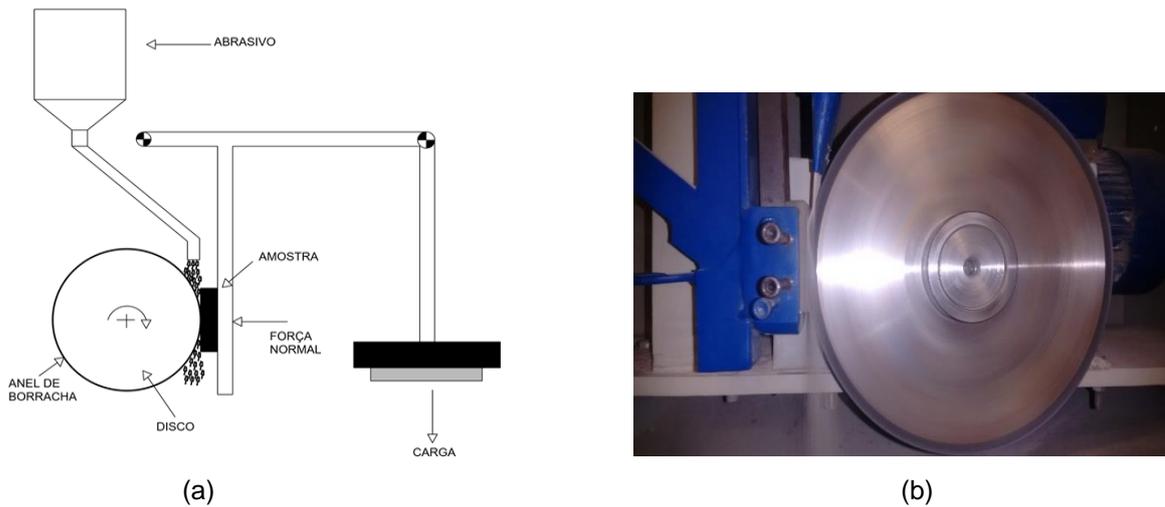
Os ensaios de desgaste foram interrompidos a cada seis minutos para a coleta das informações da perda de massa totalizando um tempo de trinta minutos para cada corpo de prova.

Para o cálculo das perdas de massa foram utilizados as Eq. 1 e Eq. 2 como mostrado na revisão bibliográfica.

A Fig. 5 ilustra de forma representativa o procedimento do ensaio de desgaste segundo a norma ASTM G 65-91 que consiste em um teste laboratorial, onde os corpos de prova são condicionados ao atrito forçado, friccionando contra uma roda revestida com borracha, em movimento giratório, adicionando areia como

abrasivo, com granulometria entre 200 a 300 μm , sendo aplicada uma carga aplicada de 130 N ao corpo de prova contra a roda em movimento.

Figura 5: (a) Esquema representativo do ensaio tipo roda de borracha ASTM G65, (b) detalhe do corpo de prova sendo submetido ao ensaio.



Fonte: do Autor (2019)

3.5 TESTE EM CAMPO

Foram fabricados discos com os mesmos materiais e revestimentos dos corpos de prova, a fim de se avaliar a resistência do desgaste abrasivo em condições reais de operação. A identificação dos corpos de prova e dos revestimentos testados estão mostrados na Tabela 4.

Os testes em campo, realizados na empresa Farben, na matriz, situada em Içara-SC, os discos foram posicionados no local mais agressivo do sistema tribológico do equipamento, demonstrado na Fig. 1.

Tabela 4: Discos para testes em campo.

| Denominação | Composição | Quantidade |
|-------------|--------------------------------|------------|
| MD 01 | HVOF (Carbeto de Tungstênio) | 1 Disco |
| MD 02 | Ferro Fundido Branco | 1 Disco |
| MD 03 | Ferro Fundido Branco Nitretado | 1 Disco |
| MD 04 | Cromo Duro Eletrodepositado | 1 Disco |

Fonte: do Autor (2019)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados e análises dos experimentos realizados neste Trabalho de Conclusão de Curso.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL EXISTENTE

A composição química no disco de ferro fundido branco utilizado atualmente está mostrada na Tab. 5. Segundo a norma ASTM A532 o ferro fundido branco é da classe III Tipo A. Este ferro fundido ligado ao cromo apresenta elevada dureza, difícil usinabilidade, baixa resistência ao impacto e alta resistência a abrasão. Suas aplicações podem ser em placas de revestimento, chapas de desgaste, blindagens, rolos e anéis para moagem.

Tabela 5: Composição química

| Elementos químicos % | C | Si | Mn | Cr | Mo | Ni | Fe |
|---------------------------|--------------|-------|-------|----------------|-------|------|--------|
| Amostra analisada | 2.794 | 1.216 | 0.761 | 27.472 | 0.493 | 1.43 | 65.485 |
| Base ASTM A532 III Tipo A | De 2.0 a 3.0 | 1.5 | 2.0 | De 23.0 a 30.0 | 2.0 | 2.5 | ----- |

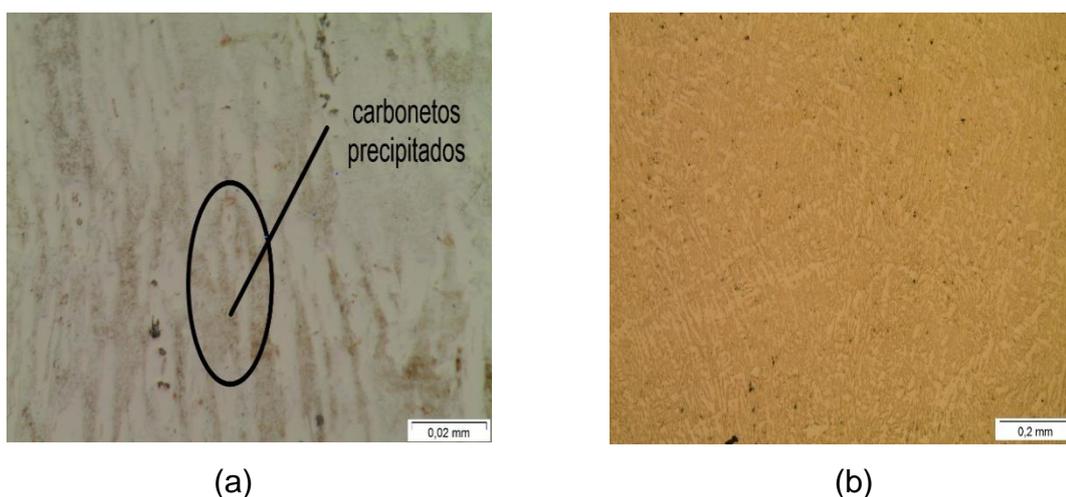
Fonte: do Autor (2019)

A dureza medida do disco seccionado mostrou um valor médio de 53 HR_c o valor de dureza encontrados são típicos dos ferros fundidos brancos do Tipo III A, enquanto a micro dureza da seção analisada da amostra seccionada, tiveram em média, os seguintes valores: 925 (± 10) HV na superfície, e 620 (± 80) HV, resultados que caracterizam tratamento térmico na peça estudado.

A microestrutura analisada mostrada na Fig. 6 possui uma microestrutura tipicamente de carbonetos primários duros e/ou eutéticos em uma matriz de austenita ou uma transformação desses produtos. A natureza da matriz é função da velocidade de transformação no resfriamento e da composição química. Estes ferros fundidos brancos altos cromo, são conhecidos por sua alta resistência ao desgaste do tipo abrasivo. Essa resistência é relacionada à presença de carbonetos primários e/ou

eutéticos do tipo M7C3. Estes carbonetos possuem alta dureza (em torno de 1500 a 1800 HV25).

Figura 6: (a) Ampliação de 1000x com ataque de nital à 2,5% e (b) 100x sem ataque



Fonte: do Autor (2019)

4.2 ENSAIO DE DESGASTE ASTM G65

Os ensaios de desgaste tipo roda de borracha, quantificaram a perda de massa, que é a principal causa do desgaste. Os resultados das perdas de massa e volume removidos médios dos quatro corpos de prova de cada material testado estão dispostos na Tab. 6.

Tabela 6: Ensaio tipo roda de borracha dos materiais testados.

| Corpo de Prova | Volume Removido (mm ³) | Variação da Massa (g) | Desvio Padrão (g) |
|----------------|------------------------------------|-----------------------|-------------------|
| CP 01 | 1,5812 | 0,0247 | 0,0098 |
| CP 02 | 12,1756 | 0,0813 | 0,0311 |
| CP 03 | 8,4248 | 0,0603 | 0,0231 |
| CP 04 | 11,6825 | 0,0837 | 0,0308 |
| CP 05 | 2,2685 | 0,0163 | 0,0057 |

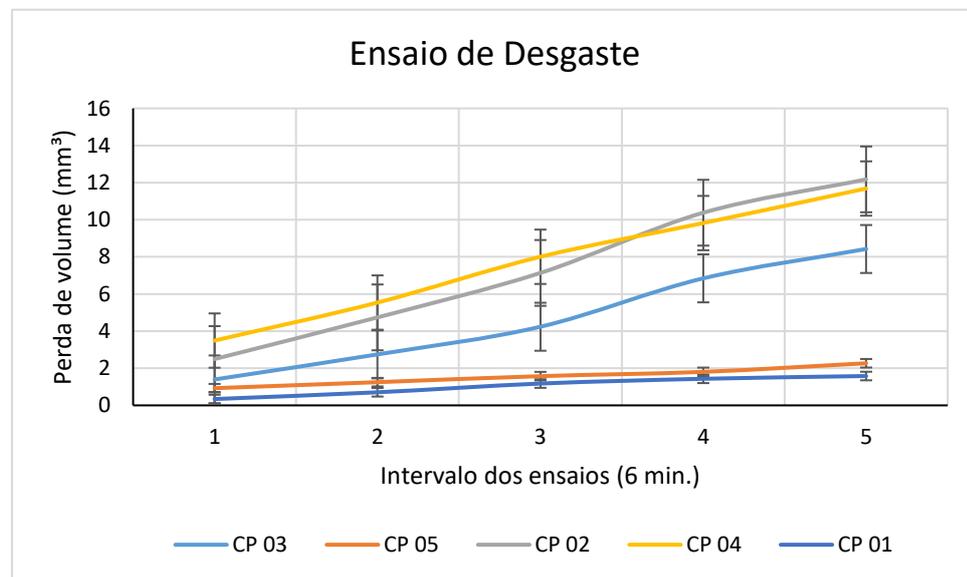
Fonte: do Autor (2019)

Como pode-se observar na Tab. 6, o cromo duro apresentou a menor perda de massa entre os materiais testados seguido do carbeto de tungstênio, porem para

o volume removido, o melhor desempenho foi o do carbeto de tungstênio, devido a sua densidade maior (17 g/cm^3). Mesmo sendo indicado para aplicações contra o desgaste o carbeto de cromo não obteve bom resultado se mostrando menos resistente ao desgaste que o carbeto de tungstênio. A amostra nitretada a plasma não obteve maior resistência que o ferro fundido branco temperado, que é o estado de fornecimento atualmente utilizado, muito provavelmente a temperatura de processo para difusão do nitrogênio reduziu a dureza da matriz. Vale ressaltar o bom desempenho do cromo duro, quando comparado com o aço SAE 1045 na condição fornecida este apresenta uma resistência ao desgaste abrasivo muito superior.

Na Fig. 7 pode-se perceber que o carbeto de tungstênio e cromo duro, além de apresentar os menores valores de volume removido, apresentam desempenho contra o desgaste muito parecidos. Os outros materiais testados em função das linhas mostradas na Fig.7 mostram um crescimento linear do volume perdido com o tempo.

Figura 6: Perda de volume em mm^3 segundo ASTM G65.



Fonte: do Autor (2019)

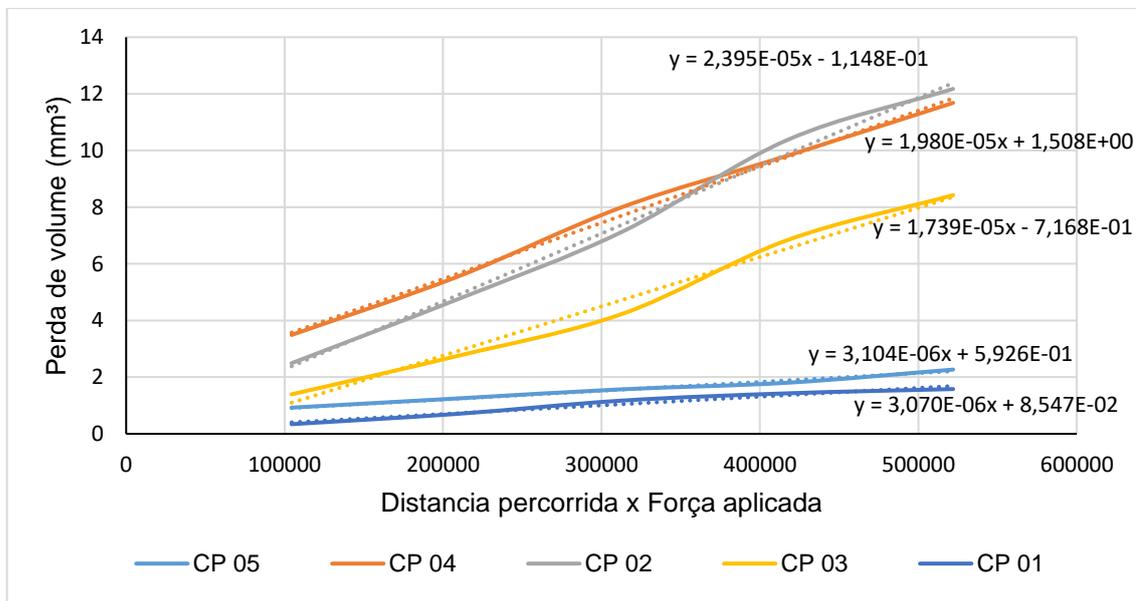
O coeficiente de Archard resultante e a dureza estão apresentados na Tab. 7. Quando se leva em consideração a carga e a dureza da superfície conforme Eq. 2 o ferro fundido branco, o carbeto de cromo e o ferro fundido branco nitretado apresentaram as maiores perdas de massa entre os materiais testados.

Tabela 7: Coeficiente de Archard x Dureza.

| Corpo de Prova | Archard ' K ' (adimensional) | Dureza HV | Dureza HR _c |
|----------------|------------------------------|--------------|------------------------|
| CP 01 | 3,070 E-06 | ----- | ----- |
| CP 02 | 2,395 E-05 | ----- | ----- |
| CP 03 | 1,739 E-05 | 906,8 (± 49) | 53 |
| CP 04 | 1,980 E-05 | 862,7 (±97) | 45 |
| CP 05 | 3,104 E-06 | 728,9 (± 41) | 30 |
| CP 06 | 4,715 E-05 | 254,7 (± 36) | 22 |

Fonte: do Autor (2019)

Figura 8: Resultado do coeficiente de desgaste das condições testadas.



Fonte: do Autor (2019)

Archard (1953), salienta que para desgaste “leve” o valor de ‘ K ’ deve ser de até 10^{-8} , enquanto que para desgaste “severo”, considerar ‘ K ’ a partir de 10^{-2} , como pode-se observar nas equações da Fig. 8, que representam o coeficiente de desgaste (Archard), os valores obtidos ficaram medianos para carbetos de cromo, ferro fundido branco nitretado e ferro fundido branco temperado, e mediano para leve para cromo duro e carbetos de tungstênio.

4.3 TESTES EM CAMPO

Antes de se iniciar os testes reais os discos foram devidamente pesados e após 500 horas de operação novamente se procedeu a pesagem para se avaliar a

resistência ao desgaste por intermédio da redução de massa. Os resultados da variação da massa e volume podem ser observados na Tab. 8.

Tabela 8: Resultados dos testes reais.

| Corpo de Prova | Massa Inicial (g) | Massa Final (g) | Volume Removido (cm ³) | Varição de Massa (g) |
|--------------------------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|----------------------|
| Carbeto de Tungstênio | 2310 | 2100 | 26,75 | 210 |
| Ferro Fundido Branco | 2200 | 1852 | 48,67 | 348 |
| Ferro Fundido Branco Nitretado | 2200 | 1738 | 64,61 | 462 |
| Cromo Duro | 2285 | 1115 | 149,05 | 1170 |

Fonte: do Autor (2019)

A condição que houve a menor perda de massa em operação foi o carbeto de tungstênio, como pode ser observado na Fig. 9, porem com apenas 400 horas trabalhadas, seguido pelo ferro fundido branco utilizado atualmente, que como os demais materiais testados teve 500 horas trabalhadas, o ferro fundido branco possui carbonetos presentes em sua microestrutura que proporcionam resistência ao desgaste em toda extensão do material diferentemente dos revestimentos testados. Apesar do cromo duro ter tido um bom desempenho nos ensaios de desgaste segundo a ASTM G65, nos testes reais teve um desempenho muito inferior às demais condições testadas.

Figura 9: (a) Disco aspergido com carbeto de tungstênio após 400 horas trabalhadas, (b) disco antes da montagem.



(a)



(b)

Fonte: do Autor (2019)

O ferro fundido branco nitretado teve um despenho menor que a condição fundida atualmente utilizada, a nitretação a plasma não contribuiu para a melhora da resistência ao desgaste.

5 CONCLUSÕES

Nos testes de desgaste realizados em laboratório a condição aspergida pelo processo HVOF com carbeto de tungstênio e o cromo duro eletrodepositado mostraram excelente desempenho em relação às demais condições testadas. Tanto o carbeto de tungstênio como o cromo duro não foram influenciados pelo tempo de ensaio apresentando baixa inclinação da linha que representava a perda de massa, os demais materiais testados sofreram maior desgaste em função do tempo de teste.

Apesar da nitretação ser indicada para situações onde se busca melhorar a resistência ao desgaste, nos testes realizados neste trabalho este tratamento termoquímico não obteve resultados positivos. A microestrutura do ferro fundido branco aliada à temperatura do processo de difusão deve ter causado redução de dureza superficial ou produzido uma camada dura mais instável.

Nos testes em campo o carbeto de tungstênio, manteve sua camada protetora intacta, apresentando boa ancoragem, sem trincas ou deslocamentos, quanto a variação do volume, o melhor desempenho foi do composto atualmente utilizado, o ferro fundido branco com tratamento térmico por tempera, considerando o maior número de horas trabalhadas. O disco revestido com cromo duro eletrodepositado, teve um elevado desgaste nos testes em campo, não validando os testes em laboratório.

Finalmente com base nos resultados dos ensaios de desgaste e testes em campo, o estudo determinou que o carbeto de tungstênio se apresentou como uma boa solução para diminuir a intensidade do desgaste nos corpos moedores do moinho de câmara vertical, porém, sendo aplicado o revestimento sobre o material atualmente utilizado, uma vez que ficou comprovado o elevado desgaste do aço SAE 1045, podendo ser utilizado apenas nas posições de desgaste mais severo, essa composição irá proporcionar uma deterioração homogênea sistema, diminuindo as paradas para manutenção, realizando a substituição de todos os discos de uma só

vez, e proporcionando ao equipamento maior vida útil de seus componentes, a um custo relativamente baixo.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a realização dos testes no presente trabalho, pode-se sugerir as seguintes pesquisas:

Fazer a caracterização das matérias primas beneficiados no moinho, para determinar sua dureza e abrasividade.

Realizar testes de imagem nos corpos de prova utilizados, afim de analisar os revestimentos, sua ancoragem e microestrutura.

Realizar teste em campo com o disco atualmente utilizado revestido com aspersão térmica por HVOF, carbeto de tungstênio, aumentando o número de horas trabalhadas, afim de determinar a durabilidade.

REFERÊNCIAS

ARCHARD, J. F.; *Contact and Rubbing of Flat Surface. Journal of Applied Physics*. p. 981–988, 1953.

ASTM G65, *Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus. Annual Book of ASTM Standards Volume 03.02, ASTM, Philadelphia, PA, pp. 247-259, 2015.*

Callister JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

Casagrande, D. F. M.” **Minimização dos Impactos de uma Indústria Galvânica Através do uso de Soluções Livres de cianeto**”, Monografia de Mestrado, Centro Universitário Feevale, Novo Hamburgo/RS, 26 p, 2009.

Cheik, R. C. “**Estudo de uma Linha de Cromagem Visando Aumento de Produtividade**”, Monografia de graduação, Centro universitário La Salle-UNIASALLE, Canoas/RS, 47 p,2010.

Comeli, F. W. “**Estudo de Revestimento Aspergido por HVOF contra o Desgaste em Hastes de Válvulas de Turbinas Termelétricas**”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis/SC, 28-43 p, 2006.

Freire, F. “**Revestimentos Duros de WC Aplicados por Aspersão Térmica pelo Sistema HVOF**”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis/SC, 7 p, 2000.

Gobbi, V. J. “**Influência da Nitretação a Plasma na Resistência ao Desgaste Microabrasivo do Aço Ferramenta AISI D2**”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília-UNB, Brasília/DF, 75 p,2009.

Karaoglanli A.C., Oge M., Doleker K. M., Hotam M. 2017, “**Comparison of tribological properties of HVOF sprayed coatings with different composition**”, Elsevier, New York, vol. 21, pp. 300-308, 2017.

Kawakita J., Kuroda S., Fukushima T., Kodama T. **Development of Dense Corrosion Resistant Coatings by an Improved HVOF Spraying Process**. Science and Technology of Advanced Materials. Agosto, 2003.

Metamoros, P, E. **Modelo de Desgaste Oxidativo Baseado em Parâmetros Termodinâmicos**. Tese de Doutorado, EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

Miguel, S. A. “**Estudo da Influência de Variáveis no Processo de Moagem em Moinho de Esferas de Ingredientes Ativos para Agroquímicos**”, Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 13 p., SP, 2014.

Novelli L. A.” **Contribuição aos Estudos dos Mecanismos de Interação das Partículas Abrasivas com as Microestruturas de Ferros Fundidos em Processo de Desgaste**”, Dissertação de Mestrado, Rede Temática em Engenharia de Materiais-REDEMAT, Ouro Preto/MG, Brasil 8 p, 2004.

Souza, C. J. “**Desgaste Abrasivo em Compósitos Metal-Cerâmicos: Estudo Aplicado ao Desenvolvimento de Coroas de Perfuração**”, Dissertação de Mestrado, Rede Temática em Engenharia de Materiais-REDEMAT, Ouro Preto/MG, Brasil,14, 28 p, 2011.

Van Vlack, L. H. **Princípios de Ciências dos Materiais**. 21ªed. São Paulo: Blucher, 2015.