

## **EFEITO DA REFUSÃO A LASER NAS PROPRIEDADES TRIBOLÓGICAS DA LIGA WC-CoCr DEPOSITADA POR HVOF PARA USO EM SUPERFÍCIES DA PERFURATRIZ HIDRÁULICA - COP 1028**

**Magno Dias<sup>1</sup>**

**Richard de Medeiros Castro<sup>2</sup>**

**Resumo:** Equipamentos na mineração são submetidos a condições severas de funcionamento, e tendem a ter defeitos recorrentes no seu mecanismo de desgaste sendo necessário a troca de peças, o que ocasiona um elevado custo as empresas. Outro problema enfrentado é o correto descarte destas. A engenharia de superfície vem propondo novas tecnologias de deposição e revestimentos, buscando uma maior vida útil aos equipamentos e um menor custo as empresas, porém ainda se trata de conceitos relativamente novos, sendo assim, se faz necessário, estudos tribológicos para a melhor compreensão das suas possíveis aplicações. O intuito deste estudo é buscar o maior entendimento do comportamento tribológico de superfícies revestidas com a liga WC-CoCr depositado por aspersão térmica - HVOF, e após o processo de refusão a laser avaliar a difusão nos elementos de liga do substrato, bem como os mecanismos de desgaste. Para esta pesquisa, foram depositadas a liga WC-CrCo por HVOF, usando superfícies fabricadas em AISI 1045 como substrato e, posteriormente foram refundidas por laser com diferentes potências e velocidades, a fim de avaliar a dureza, rugosidade, atrito e os mecanismo de desgaste. Foram obtidas durezas de 1087 HV para a amostra sem refusão, após a refusão teve-se um aumento na dureza para 1313 HV para amostra LR1, porém, ao aumentar a potência, houve um decréscimo na dureza na amostra LR2, ficando com 840 HV. As análises em MEV e EDS mostraram que os substratos são termicamente afetados. As aplicações destes revestimentos tenderam a substituição de tratamentos mais custosos como, por exemplo; o cromo duro, muito usado em hastes de cilindro, além da fácil reparação de um componentes mecânicos quando necessário.

**Palavras-chaves:** HVOF. WC-CoCr. Refusão a laser. Tribologia.

### **1 INTRODUÇÃO**

Nos métodos modernos de extração de carvão, maquinários robustos e com alta tecnologia são empregados para a remoção desta jazida. Um dos principais problemas encontrados é o desgaste em componentes que operam com movimentos oscilatório e rotacionais. Um equipamento que trabalha nessas condições é chamado de perfuratriz hidráulica (PH) ou martelo de potência. É utilizada para fazer a

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: magnodias@outlook.com.br

<sup>2</sup> Prof. Do Centro Universitário UniSATC. E-mail: richard.castro@satc.edu.br

perfurações nos tetos das galerias para dar sustentabilidade por parafusos, evitando que ocorra desmoronamentos. Devido ao fato desse equipamento trabalhar em roto-percussão e contato frequente com materiais abrasivos, o desgaste é inevitável, e consequentemente causam vazamentos e perda significativa na eficiência destes.

O desenvolvimento de novos métodos para revestimentos de superfície vem evoluindo ao longo dos anos. Uma destas novas tecnologia é a aspensão térmica (AT) por HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*). Tal método possibilita revestir a superfície de componentes com geometria complexa, fornecendo-os características tribológicas eficientes contra desgaste. O uso do particulado de WC-CrCo, quando aspergido por AT-HVOF proporciona boa dureza e excelente resistência ao desgaste, uma vez que a dureza do WC pode chegar a 1.250 HV, superior ao 1.000 HV do cromo duro, a técnica mais usada atualmente. Porém devido a frágil ligação metalúrgica entre o revestimento e a superfície que ocorre na AT-HVOF, se faz necessário a aplicação de outra técnica como incremento.

Diante disso, a tecnologia de refusão a laser pode ser uma alternativa para complementar o processo. De acordo com Cui e Song (2012) um feixe a laser de alta potência com uma densidade adequada possibilita uma melhor interação metalúrgica entre a superfície da base e o material depositado. O rápido resfriamento que ocorre neste método, tende a modificar as estruturas morfológicas e cristalinas dos materiais submetidos, aumentando ou diminuindo as suas particularidades mecânicas. Diante disso, estudos tribológicos se fazem necessário para um melhor direcionamento do uso destas técnicas. (CUI e SONG, 2012; DAS, B. et al, 2019; CHEN, et al, 2005; GHADAMI e AGHDAM, 2019; CHIKARAKARA, et al, 2010).

Com intuito de obter um maior entendimento, este trabalho busca explorar o comportamento tribológico a seco de superfícies revestidas com a liga WC-CrCo depositado por AT – HVOF. As amostras serão refundidas com o processo a laser em diferentes faixas de potências e velocidades de varredura. Avaliar a difusão nos elementos de liga do substrato e revestimento, a influência da transferência de calor ocasionada pelo laser sobre a microdureza de ambos. A avaliação dos mecanismos de desgaste e atrito, se darão por meio de ensaios no tribômetro pino sobre disco. As análises de morfologia foram feitas por microscopia ótica, eletrônica de varredura (MEV), juntamente com espectroscopia por energia dispersiva (EDS).

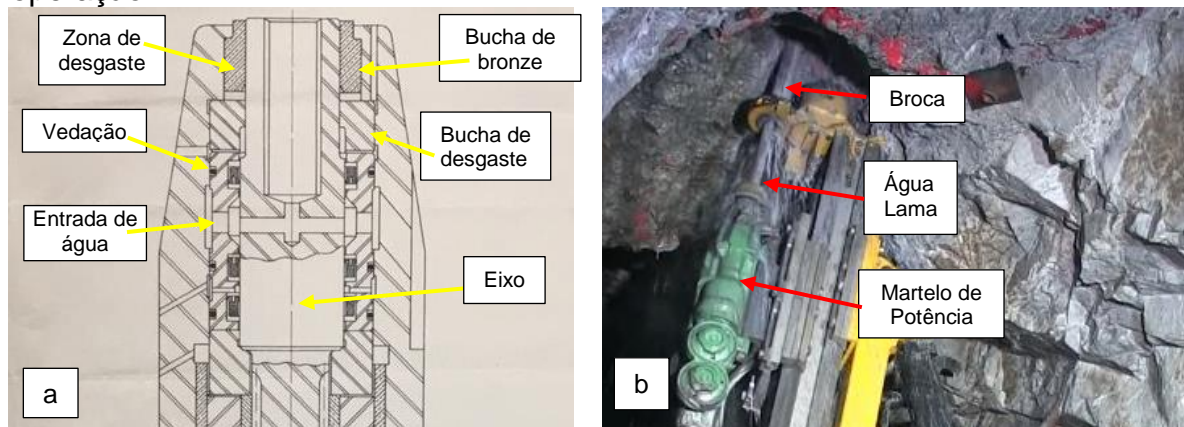
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para que haja uma boa compreensão do assunto tratado, bem como fundamentar e organizar os conhecimentos, serão apresentadas informações consideradas de maior relevância. Foi dividido em Perfuratriz Hidráulica de Rocha, Atrito e Rugosidade, Aspersão Térmica HVOF e Refusão das Superfícies por Laser.

### 2.1 PERFURATRIZ HIDRÁULICA DE ROCHA (MARTELO DE POTÊNCIA)

Nos processos de perfuração de tetos a PH-COP 1028, normalmente trabalha na posição vertical como se observa na Fig.1. As perfurações no teto das galerias de mineração, são executadas com o intuito de alocar uma aste com rosca na sua estemidade que posteriormente é atarrachada no teto, criando um espécie de viga. O que dá uma maior sustentabilidade as galerias de mineração

Figura 1. Perfuratriz Hidráulica, (a) esquemático mecânico da PH (b) PH em operação.

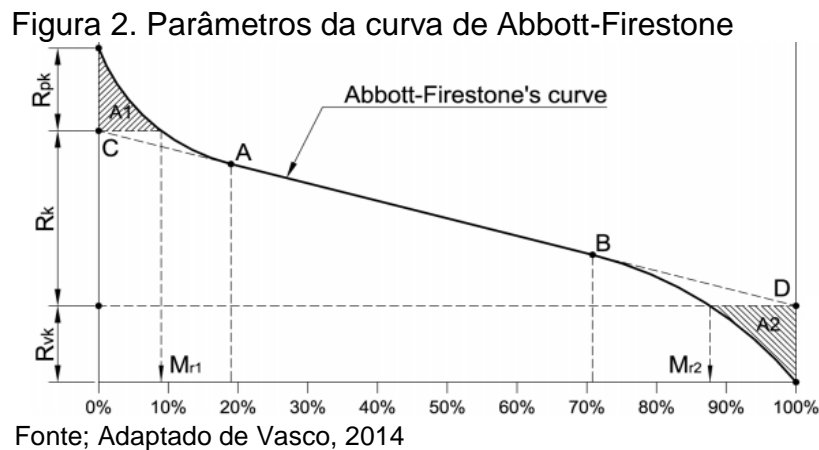


Fonte: do autor (2020).

A Fig. 1b mostra a PH em operação. É possível entender que lama que sai do furo em execução escoar pela mesma, e inevitavelmente partículas abrasivas contidas na lama adentram em seu primeiro estágio (Fig. 1a), se alocando entre eixo e a bucha de desgaste. Truhan (2007) realizou ensaio com lama de perfuração simulada como lubrificante em um bloco sobre disco e observou que o desgaste do anel acompanhava desgaste no bloco, devido à influência da alta dureza da sílica contidas na lama de perfuração. Além do movimento giratório do eixo do COP 1028 é submetido a movimentos axiais, intensificando os mecanismos de desgastes.

## 2.2 ATRITO E RUGOSIDADE

As interações interfaciais acarretam problemas advindos da energia gerada por atrito entre dois componentes em movimento (LUDEMA, 1996). O atrito e a rugosidade estão ligados as asperezas superficiais que estão relacionadas com a complexidade estrutural e das características mecânicas da natureza dos materiais, assim como a preparação e sua interação com ambiente e os demais materiais (BHUSHAN, 2013). Para um melhor caracterização das superfícies faz se necessário o uso da curva de Abbott Firestone (Fig. 2), este é um método importante de caracterização, especialmente quando se trabalha com superfícies onde é necessário introduzir parâmetros específicos, um exemplo das quais são as hastes de cilindros hidráulicos, em que características tribológicas específicas devem ser obtidas e, são caracterizadas pela distribuição de picos e vales (SALCEDO et al, 2018).



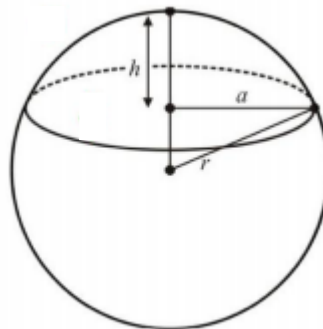
As características de superfícies são comumente avaliadas por parâmetros de rugosidade como;  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ,  $R_{pk}$ ,  $R_{vk}$  (REBAI, 2014). Essas características não são facilmente visíveis com os valores dos parâmetros de rugosidade, pois os parâmetros são sintéticos e não fornecem informações sobre a natureza da superfície (SALCEDO et al, 2018). Os principais parâmetros para a caracterizar a planicidade de uma superfície são;  $R_{pk}$  é a altura média dos picos que se projetam do perfil de rugosidade do núcleo,  $R_{vk}$  é a profundidade média dos vales que se projetam do perfil de rugosidade do núcleo (VASCO et al, 2014). Ainda de acordo com Vasco (2014),  $M_{r1}$  e  $M_{r2}$  são as menores e maiores proporções de material do perfil de rugosidade do núcleo. A subtração de  $M_{r2}$  menos  $M_{r1}$ , obtém-se o fator  $R_{mr}$ , tal fator dá uma

referência da porcentagem de superfície plana contida. A fabricante de vedações hidráulicos Trellerbog, sugere que o Rmr não deve ser inferior a 70% para obtenção de lubrificação e vedação eficiente.

### 2.3 DESGASTE E ATRITO

O desgaste geralmente está associado à perda de material dos corpos em movimento relativo (STOLARKI, 1990). Para Stachowiak e Batchelor (2013) a energia gerada pelo atrito em deslizamento entre duas superfícies provoca o fenômeno de perda de material. Conforme as propriedades físicas e químicas do material, as asperezas passam por várias etapas de deformações devido a estarem submetidas a cargas, (STACHOWIAK E BATCHELOR, 2013). Rebai (2014) comenta que, limites grãos altos, geram taxas elevadas de desgaste, em contrapartida, limites de grãos baixos, tem uma baixa taxa de desgaste. Por meio de um tribômetro pino-sibre-disco realiza-se o ensaio de desgaste. Posteriormente é medido com auxílio de um microscópico ótico a dimensões das trilhas de desgaste no disco e para o pino é encontrado o valor do raio ( $a$ ) da área desgastada. Fazendo o uso da Eq. (1), encontra-se a altura ( $h$ ). A Fig. 3 ilustra os parâmetros dimensionais aferidos em uma esfera do tribômetro.

Figura 3. Semiesfera de desgaste



Fonte; Do autor (2020)

$$h = r - (r^2 - a^2)^{0,5} \quad (1)$$

Onde:

$h$  = altura desgastada (m);

$r$  = raio do pino (m);

a = área desgastada do pino (m);

Encontrando o valor h, podemos calcular o volume removido por meio da Eq. (2). (KOEENDER, 2017)

$$Q = \frac{1}{6} \pi \cdot h(3a^2 + h^2) \tag{2}$$

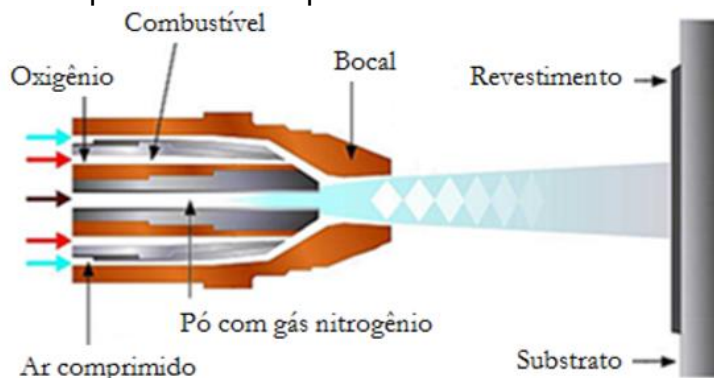
Onde:

Q = volume removido (m<sup>3</sup>);

#### 2.4 ASPERSÃO TÉRMICA - HVOF

No processo HVOF (Fig. 4), o gás ou líquido combustível, podendo ser propileno, hidrogênio, propano ou querosene, é introduzido na câmara de combustão junto com o oxigênio (PAWLOWSKI, 2008). O processo ocorre à alta pressão em uma câmara de combustão gerando um jato de exaustão de alta velocidade, sendo que a temperatura da chama é dependente da relação oxigênio/gás combustível (PAREDES, 2012). O pó é introduzido no bocal, em geral axialmente, e é aquecido e acelerado para fora do mesmo (PANZIEIRA, 2016). A Fig. 4, exibe o exemplo do funcionamento de uma pistola do processo de HVOF.

Figura 4. Esquemático da pistola utilizada pelo processo de aspersão térmica – HVOF



Fonte; Adaptado de Castro, (2015).

De acordo com Pawloski (2008), o processo HVOF possui a capacidade de pulverização de partículas semifundidas em altas velocidades, resultando em um



revestimento bastante denso, com elevada aderência e baixos teores de óxidos. A Tab. 1, apresenta as principais características e parâmetros usados no processo de aspersão térmica por HVOF.

**Tabela 1. Parâmetros da Aspersão Térmica HVOF.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Distância de aplicação	150 a 300 mm
Alimentação de pó	20 a 120 g/min
Tamanho das partículas	5 a 45 $\mu$ m
Taxas do fluxo de gás combustível	40 a 60 l/min
Nível de ruído	140 decibéis
Aderência da camada	90MPa
Porosidade	<1%
Espessura de material depositado	100 a 300 $\mu$ m

Fonte; Adaptado de Panzeira, (2016).

Para Bolelli (2009), o processo HVOF são definitivamente menos sensíveis à natureza do substrato, elas não requerem pré-tratamentos complexos de superfície. Geralmente, a preparação da superfície para a pulverização térmica envolve apenas a remoção de graxa usando jato de areia. Outro ponto que G. Bolelli (2009) ressaltam são as camadas acima 100  $\mu$ m e boa flexão em relação à escolha do material para ser aspergido.

## 2.5 REFUSÃO DAS SUPERFÍCIES POR LASER

Os tratamentos de superfície são frequentemente usados para melhorar as propriedades das camadas superficiais e subsuperficiais dos materiais (CHIKARAKARA et.al, 2010). A rápida fusão e resfriamento que ocorrem quando o laser passa sobre a peça alteram a microestrutura para um grão ultrafino na área de refusão. Estas novas propriedades do material incluem maior dureza e maior resistência ao desgaste (CUI, 2012).

Segundo Teleginski (2016), ao atingir a superfície, o feixe de laser tem parte da sua energia refletida e parte absorvida, provendo o aquecimento do revestimento e substrato, que se difunde para dentro da superfície. A extensão da difusão da energia térmica é estimada por meio de comprimento de difusão térmica ( $L_{(D)}$ ) que é definida como a distância em que a temperatura cai 10% em relação à superfície, (RONZANI, 2017). Tal comprimento depende da característica térmica do

material e do tempo de irradiação do laser dado por meio da Eq. (5) com base nos parâmetros do diâmetro do foco pela velocidade de refusão. A Eq. (6) é possível calcular a difusão térmica. Na Eq. (7),  $k$  é a difusividade térmica do material (TELEGINSKI, 2016 apud STEEN; MAZUNDER, 2010).

$$t_i = \frac{\varnothing_f}{V} \quad (5)$$

$$k = \frac{K}{C_p \rho} \quad (6)$$

$$L_{(D)} = 2\sqrt{kt_i} \quad (7)$$

Onde:

$L_{(D)}$  = comprimento de difusão térmica ( $\mu\text{m}$ );

$t_i$  = tempo de irradiação do laser (s);

$\varnothing_f$  = diâmetro do foco (mm);

$V$  = velocidade de refusão (mm/s);

$k$  = difusividade térmica ( $\text{cm}^2/\text{s}$ );

$K$  = condutividade térmica ( $\text{W}/\text{cm}^\circ\text{C}$ );

$C_p$  = calor específico do material ( $\text{J}/\text{kg K}$ );

$\rho$  = peso específico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

Após a realização de pesquisas preliminares, Ronzani (2017) definiu as constantes a térmicas do tungstênio mais adequados a se utilizar para calcular o comprimento da difusão térmica é a uma temperatura de 1000 K. Estes valores estão apresentados na Tab. 2.

Tabela 2. Constantes térmicas do Tungstenio.

Condutividade térmica $k$ ( $\text{W}/\text{cm}^\circ\text{C}$ )	Calor Específico do Material $C_p$ ( $\text{J}/\text{kgK}$ )	Peso Específico $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );
118	148	19.300

Fonte; Adaptado de Ronzani, (2017).

Dependendo da energia absorvida, o material será aquecido até a temperatura de fusão (penetração profunda termo em inglês *keyhole*) ou a temperatura de vaporização (fusão por condução). Sendo assim, o parâmetro de



potência do laser (Eq. 8), o qual é em função do diâmetro do feixe do laser, a taxa de velocidade e a potência do feixe do laser faz-se importante para uma aproximação da potência adequada.

$$LPD = \frac{P}{(V \cdot D)} \quad (8)$$

Onde:

LPD = potência do laser (MW);

P= potência do feixe do laser (W);

D = diâmetro do feixe do laser (mm);

V = velocidade de refusão (mm/min);

### 3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 PUNHO DO MARTELO

A peça “Punho” do Martelo de Potência COP 1028, foi fornecido pela Carbonífera Metropolitana S/A para o presente estudo. Esta peça foi descartada, pois, os danos nelas contido afetavam diretamente a eficiência da PH. Na Fig. 5, é apresentado a peça ser estudada do martelo de potência,

Figura 5: Degaste apresentado no eixo do martelo de potência.



Fonte: Do autor (2020)

A Fig. 5, mostra a região onde ocorre o desgaste da camada de cromo duro e posteriormente do material-base. Em um primeiro momento, percebe-se que há

ocorrência de mecanismos de desgaste ocasionado pela lama que adentra no primeiro estágio da PH, como já comentado no item 2.1. Estes afetam posteriormente na retirada prematura do cromo duro depositado sobre o aço base. Vale a pena ressaltar que esta peça danificada será descartada. Será necessário realizar todo o processo de usinagem e tratamento com cromo duro novamente, gerando um custo a empresa.

### 3.2 PREPARAÇÃO DOS SUBSTRATOS PARA O REVESTIMENTO

Os corpos de prova em aço AISI 1045 foram fabricados com diâmetro de 50 mm x 10 mm de espessura para uso como substrato. A composição química do mesmo está exposta na Tab. 3, e foi obtida por espectrometria atômica de massa.

Tabela 3: Composição química dos substratos

Composição Química (% em peso)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,45	0,16	0,70	0,013	0,030	0,11	0,093

Fonte: Do autor (2020)

Com finalidade de preparar a superfície para que as partículas propelidas tenham máxima potencialização e aderência no momento do impacto, os substratos foram submetidos a três etapas de preparação, que são; limpeza, adequação a rugosidade e pré-aquecimento. A seguir, são descritos individualmente cada procedimento (PAREDES, 2012).

### 3.3 LIMPEZA

A limpeza do substrato, foi usado os padrões e métodos, conforme consta na norma ABNT NBR 6405. O processo escolhido para a limpeza foi por meio de jato abrasivo com óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), para que assim uma rugosidade e limpeza adequada a norma ISO 8501-1 seja atingida. O grau de limpeza desejado é classificado como Sa1, norma NACE 3, no qual consta, que a superfície esteja livre do qualquer resíduo de óleo, gordura, sujeiras visíveis, carépas de laminação, ferrugem, tintas e matérias estranhas de fraca aderência (PAREDES, 2012).

### 3.4 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE: RUGOSIDADE

Após a limpeza, foi avaliada a rugosidade em conformidade com a norma ABNT 6405. A Tab. 4 mostra os valores de comprimentos mínimos da amostragem de acordo com a norma.

Tabela 4. Comprimentos mínimos da amostragem - ABNT 6405

Rugosidade $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Comp. de amostragem (mm)	Percurso de medição $l_m$
Até 0.1	0.25	1.25
De 0.1 até 2	0.80	4.00
De 2 até 10	2.50	12.50
Acima de 10	8.00	40.

Fonte: Do autor (2020)

Paredes (2014) apud LIMA E TREVISAN, (2002) comenta que a rugosidade da superfície mais adequada para a maioria dos revestimentos é aquela que apresenta  $R_a$  na faixa de 2,5 a 13  $\mu\text{m}$ , porém para uma espessura menor de revestimento, a faixa indicada fica próxima de 1,3  $\mu\text{m}$ . Os presentes corpos de provas em estudo, apresentaram um  $R_a$  de 6.8  $\mu\text{m}$  após os procedimentos de preparo, o comprimento de medição sugerido para esta rugosidade pela norma ABNT 6405 é de 12,50 mm.

### 3.5 PRÉ-AQUECIMENTO

O objetivo do pré-aquecimento é queimar e volatilização de graxas, óleos e retirar toda possível umidade da superfície do substrato. Outro ponto que vale ser ressaltado ao fato de o pré-aquecimento diminuir as tensões internas e gerar dilatação na superfície, o que, proporciona uma melhor adesão metalúrgica das partículas. O pré-aquecimento foi feito com a própria pistola de AT dentro da na faixa de 90 até 150°C.

### 3.6 DEPOSIÇÃO DOS REVESTIMENTOS POR HVOF

O equipamento utilizado para aspergir do pó WC-CoCr com densidade entre 4,8 e 5,0x10<sup>4</sup> kg/m<sup>3</sup>, foi um HP-HVOF, JP-5000. Confirmou-se a morfologia do pó WOKA 3653 fornecido pela empresa Oerlikon Metco, por meio do

Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Os tamanhos das partículas variaram na faixa de 45 a 15  $\mu\text{m}$ . Para a confirmação da composição química foi utilizado o Espectrômetro de Dispersão Eletrônica (EDS). A Tab. 5 apresenta um comparativo do pó mensurado entre o utilizado, com relação ao do fabricante.

Tabela 5. Composição química que o pó WC-CoCr deverá apresentar.

Material	Conteúdo dos elementos em peso - %				
	W	Co	Cr	C (Total)	Fe (máx)
(Oerlikon)	Balance	8,5 – 11,5	3,4 – 4,6	4,8 – 5,6	0,2
(Mensurado)	Balance	10,3	4,3	4,7	0,2

Fonte: Adaptado de Oerlikon (2018).

A parametrização utilizada na pulverização HVOF está exposta na Tab. 6. A distância entre a tocha e o substrato foi ajustada em 305 mm, com um tamanho de pistola de 152,4 mm, e a taxa de alimentação de pó foi ajustada em  $15 \times 10^{-4}$  kg/s.

Tabela 6. Parâmetros que serão usados na AT HVOF.

Elementos	Pressão [Pa] $\times 10^5$	Fluxo [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] $\times 10^{-8}$
Nitrogênio	$15,0 \pm 1,0$	$8652,2 \pm 8,3$
Oxigênio	$9,7 \pm 1,0$	$2016,7 \pm 2,1$
Querosene	$9,1 \pm 1,0$	$644,4 \pm 0,8$

Fonte: Do autor (2020)

A espessura final do revestimento WC-CoCr deverá ficar com aproximadamente,  $280 \pm 7$   $\mu\text{m}$ , com uma deposição realizada em 5 minutos. A espessura do revestimento foi controlada por um número definido de passagens pelo substrato e de acordo com os parâmetros da Tab. 5.

### 3.7 REFUSÃO A LASER

A fim de obter uma Ra próximo a do cromo duro (o material que recobre o a peça da PH), onde a mesma é próxima de 0,3  $\mu\text{m}$ . As amostras foram lixadas manualmente com lixa 1500, após foram limpas com acetona para eliminação de possíveis contaminações. Para o controle da posição do substrato sob o feixe de laser, foi controlado usando uma mesa CNC (Computer Numerical Control) de 3 eixos comandados numericamente pelo programa Match 3. A Distância de desfoque do

feixe laser foi de 35 mm e o gás de proteção foi o Ar a uma vazão de 35 l/min. Na Tab. 7, contém os parâmetros que foram usados na refusão em diferentes amostras. A Fig. 6, expõe uma ilustração que mostra o esquemático do processo executado. Para o cálculo da densidade de potência, foi com base na Eq. (8).

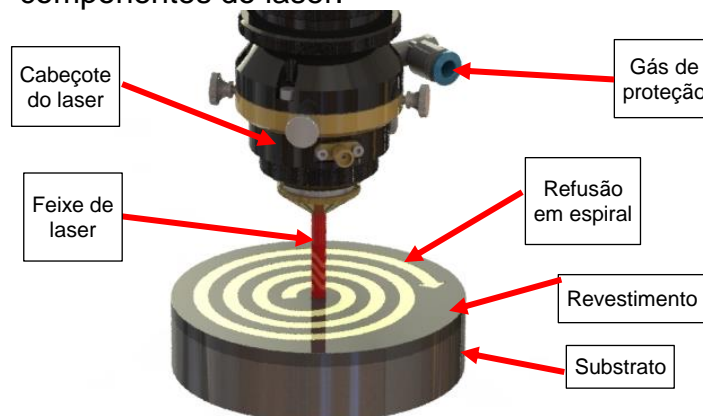
Tabela 7. Parâmetros que serão usados na refusão a laser.

Amostra	Diâmetro do feixe do laser (mm)	Potência (W)	Velocidade de varredura (mm/min)	Densidade de Potência (J/mm <sup>2</sup> )
LR 1	1	400	600	0.7
LR 2	1	600	200	3.0

Fonte: Do autor, (2020)

Fazendo uso da Eq. (5), chegou-se a um tempo de irradiação de 0.15 segundos para amostra RL1 e 0.1 segundos para amostra LR2. Como estes valores e os dados da Tab. 2, foi calculado o comprimento da difusão térmica pela Eq. (7). Para amostra LR1 e LR2, o comprimento ficou em 4979  $\mu\text{m}$  e 4065  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Mesmo o fluxo de calor não sendo unidirecional, pode ser considerando apenas perdas por condução, (RONZANI, 2017). O fluxo de calor ultrapassa a cama de 280  $\mu\text{m}$  do revestimento e atinge o substrato com eficiência.

Figura 6. Esquemático do processo e componentes do laser.



Fonte; do autor (2020)

A refusão foi realizada com diferentes velocidade e potência (Tab.7) em duas amostras para efeito de comparação. Tomou-se como ponto de partida o centro da peça, se direcionando para a borda em formato espiral, como mostra a ilustração na Fig. 6.

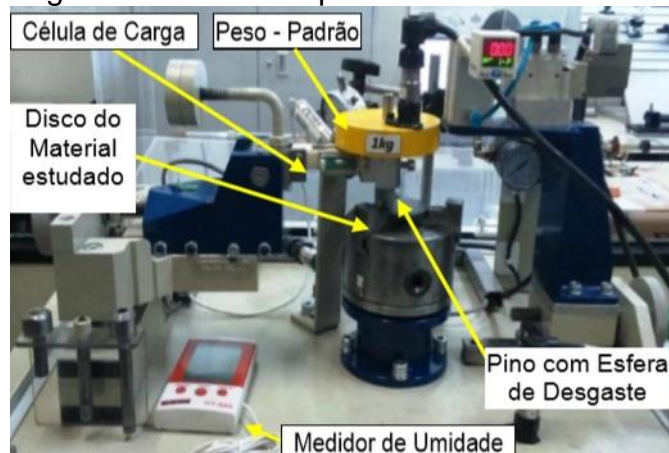
### 3.8 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DUREZA DOS REVESTIMENTOS

Para a caracterização microestrutural dos revestimentos aspergido utilizaram-se métodos convencionais. Em um primeiro momento o corte da seção transversal do substrato, seguido de lixamento da superfície fazendo com uso de lixas de granulometria de 80, 120, 220, 320, 400, 600, 1200. Em seguida as amostras serão polidas com auxílio de uma politriz. O substrato será imerso em resina fixadora, onde se aplicou um catalisador seguido da espera de cura do mesmo e por fim recebeu o ataque químico com Nital 2%. Em seguida seguindo a norma ASTM E384, foram obtidos os perfis de microdureza Vickers  $HV_{0.01/15}$ . O equipamento utilizado foi um microdurômetro modelo HMV-02 TADW – SHIMADZU. O tempo de indentação foi de 10 segundos com uma carga de 9.807 N. As imagens foram capturadas com ampliações de 100x e 500x, empregando-se um microscópio ótico, modelo BX 51M – OLYMPUS. A análise microestrutural foi realizada por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV) suportada por espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

### 3.9 AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA

Para o procedimento dos ensaios de desgaste foram utilizados os equipamentos do Laboratório de Vibrações e Tribologia – LAVITRI, do departamento da engenharia mecânica da Faculdade SATC. A Fig. 7 expõe a tribômetro empregado no ensaio.

Figura 7. Tribômetro pino sobre disco.



Fonte; do autor (2020)

Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente entre 24 e 25 °C com uma umidade relativa do ar entre 50 e 80%. Para mensurar os valores de atrito e desgaste, foi utilizado um tribômetro de modelo TR-01 adaptado da norma ASTM G99. Neste ensaio, um pino fixo de ponta esférica de oxido de zircônia  $ZrO_2$  com um diâmetro de 6 mm é pressionado com uma carga controlada contra o disco rotativo. Foi utilizada uma esfera de zircônia como pino simulando a bucha de desgaste em contato com o “punho” da PH, e um disco com 50 mm de diâmetro. Ao decorrer do ensaio os coeficientes de atrito foram monitorados. A Tab. 8 mostra os parâmetros de ensaio.

**Tabela 8. Parâmetros que foram usados no ensaio ASTM G99**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidades</b>
Carga normal	30	N
Velocidade linear	0.47	m/s
Distância percorrida	1500	m
Raio da trilha	15	mm
Diâmetro do pino	6	mm
Velocidade de rotação	300	rpm

Fonte; Do autor (2020)

Para uma melhor compreensão da deformação plástica das asperezas das superfícies revestidas com WC-CrCo, bem como a comparação da rugosidade antes e após o deslizamento. Foram aferidas em todas as amostras, 3 medições dentro da trilha criada pelo desgaste quando submetido a ensaio do tribômetro e 3 medições fora da trilha.

## **4 RESULTADO E DISCUSSÕES**

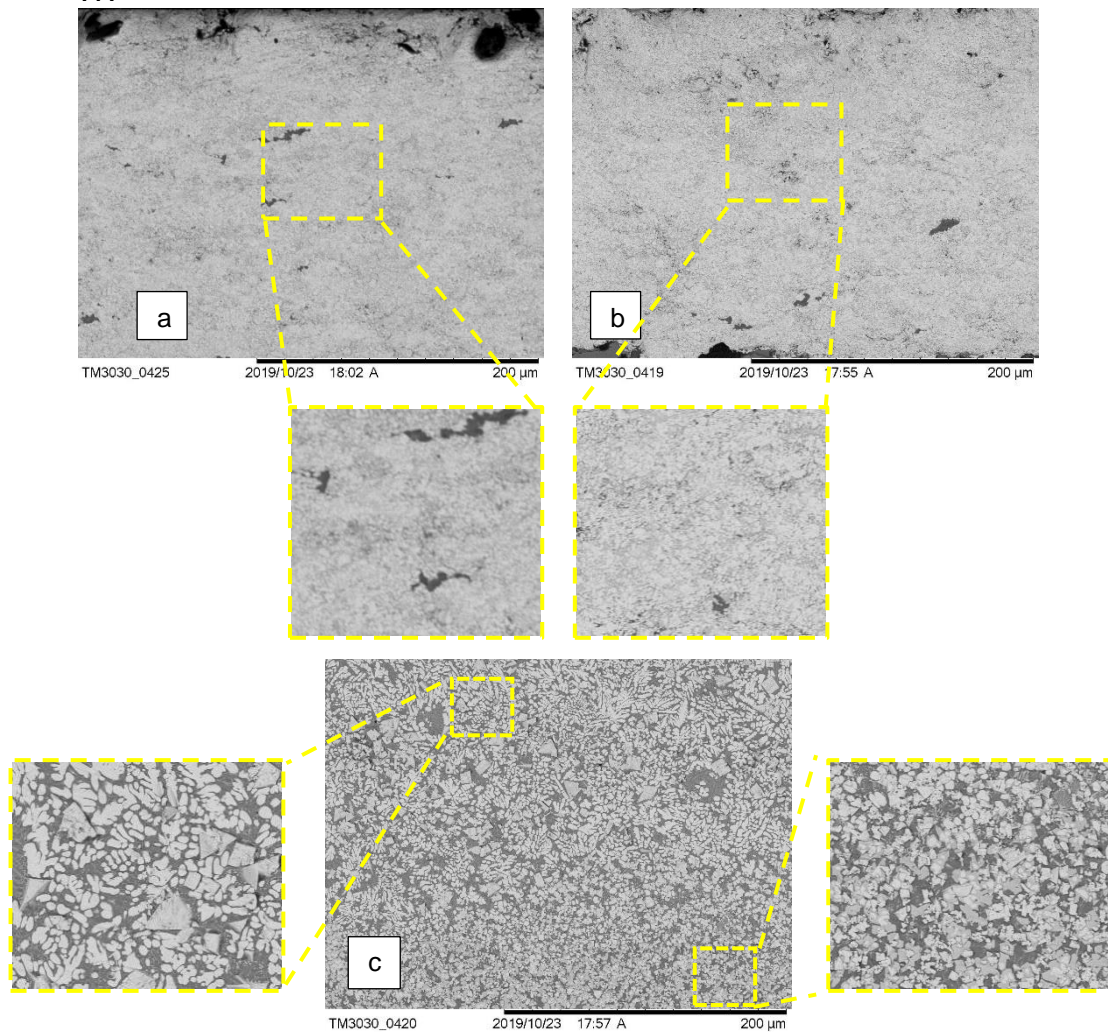
### **4.1 MICROESTRUTURA E MICRODUREZA DOS REVESTIMENTOS**

Como visto no item 2.2, o atrito e a rugosidade estão relacionados com as características mecânicas das asperezas. Sendo assim, a microdureza das asperezas, podem auxiliar previamente em um melhor entendimento na compreensão do comportamento mecânico do material. Os ensaios de microdureza foi realizado de acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 2, com base na norma ASTM



E384. A Fig. 8 apresenta a seção transversal aumentada em 500X das microestruturas na camada do revestimento WC-CoCr aspergidos por HVOF e com a refusão a laser das amostras analisadas.

Figura 8. Seções transversais dos revestimentos. (a) SR Sem Refusão, (b) LR1 com refusão a 400 W e (c) LR2 com refusão a 600 W.

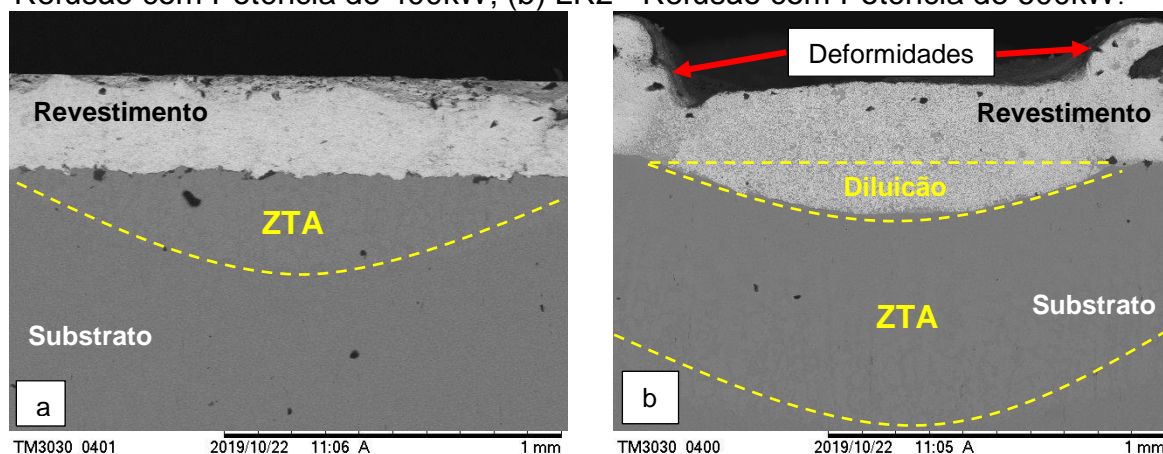


Fonte; do autor (2020)

Observa-se na Fig. 8a um revestimento com baixa porosidade, nenhuma trinca e características lamelar típico de partículas depositado por HVOF. Na Fig. 8b já é possível nota uma maior homogeneidade das partículas e uma menor porosidade quando comparado com a Fig. 8a. Lee (2018) também obteve uma diminuição da porosidade em seus estudos e nem uma trinca visível. Já a Fig. 8c o arranjo granulométrico está mais aparente, isso se deu devido ao aumento da potência, ocasionando uma maior diluição da matriz CoCr, permitindo assim uma maior difusão

da partícula de WC. Cui, (2011), observou em seu trabalho a que espessuras do revestimento que ele obteve, tem ligação direta como a potência do laser e o diâmetro do feixe de laser. Ainda na Fig. 8c, percebe-se a formação de uma estrutura dendrítica no início do revestimento, à medida que se afasta da superfície, os refinamentos de grãos não são tão aparentes, isso é devido à perda da potência em função da profundidade do revestimento. Em ensaios realizados por Afza (2015), foi obtido estruturas dendríticas à medida que a velocidade diminuía. Chikarakara (2010) observou em suas pesquisas que um nível mais baixo de irradiância fornece microestruturas mais uniformes, assim como redução de porosidade e microdureza aumentada. A Fig. 9, apresenta a relação morfológica transversal entre as amostras que foram refundidas a laser LR1 e LR2.

Figura 9. Microestrutura das seções transversais dos revestimentos. (a) LR1 - Refusão com Potência de 400kW; (b) LR2 - Refusão com Potência de 600kW.



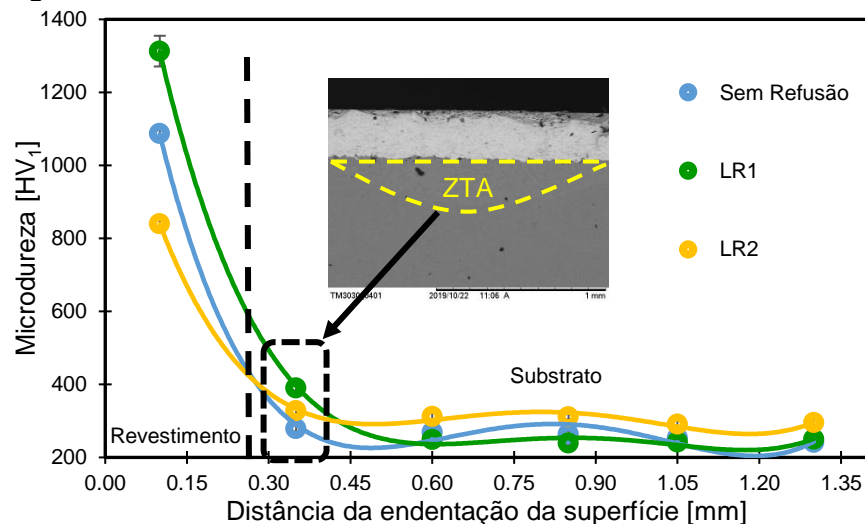
Fonte; do autor (2020)

Analisando a Fig. 9a, pode-se observar que a amostra irradiada com uma potência de 400 W possui uma superfície como menos deformidades, assim como, uma menor interação metalúrgica com o substrato. Uma boa aderência metalúrgica se torna atrativa devido ao fato de aumentar a resistência ao deslocamento e uma melhora das propriedades mecânicas (GEHRKE, 2017). Na Fig. 9b, a amostra refundida com a potência de 600 W, ocorreu uma diminuição na camada do revestimento aspergido e a deformação da superfície criando uma maior irregularidade. A potência de 600 W, gerou uma maior zona termicamente afetada (ZTA) como se observa na Fig. 9b. Por outro lado, houve uma melhor interação metalúrgica entre o revestimento e o substrato. Chikarakara et.al (2010) observou em

seus testes que uma potência maior tende a diminuir a espessura do revestimento devido a uma diluição excessiva. Após análises realizadas, Gehrke (2017) constatou que ao revestimento aspergido receber o tratamento de refusão a laser, é notável a diminuição dos poros, bem como a densificação da camada, apresentando um melhor acabamento da superfície, com uma melhor aderência ao substrato.

Como comentado anteriormente, o coeficiente de atrito e desgastes podem estar relacionados a microdureza do material, por isso a necessidade de obter os valores dessa propriedade mecânica para correlacionar com as características tribológicas. Para determinação desta, foram feitas indentações nas seções transversais do revestimento e substrato. A Fig. 10 expõe as microdureza média em escala Vickers (HV), aferidas nas 3 amostras.

Figura 10. Perfil médio de microdureza Vickers.



Fonte; do autor (2020)

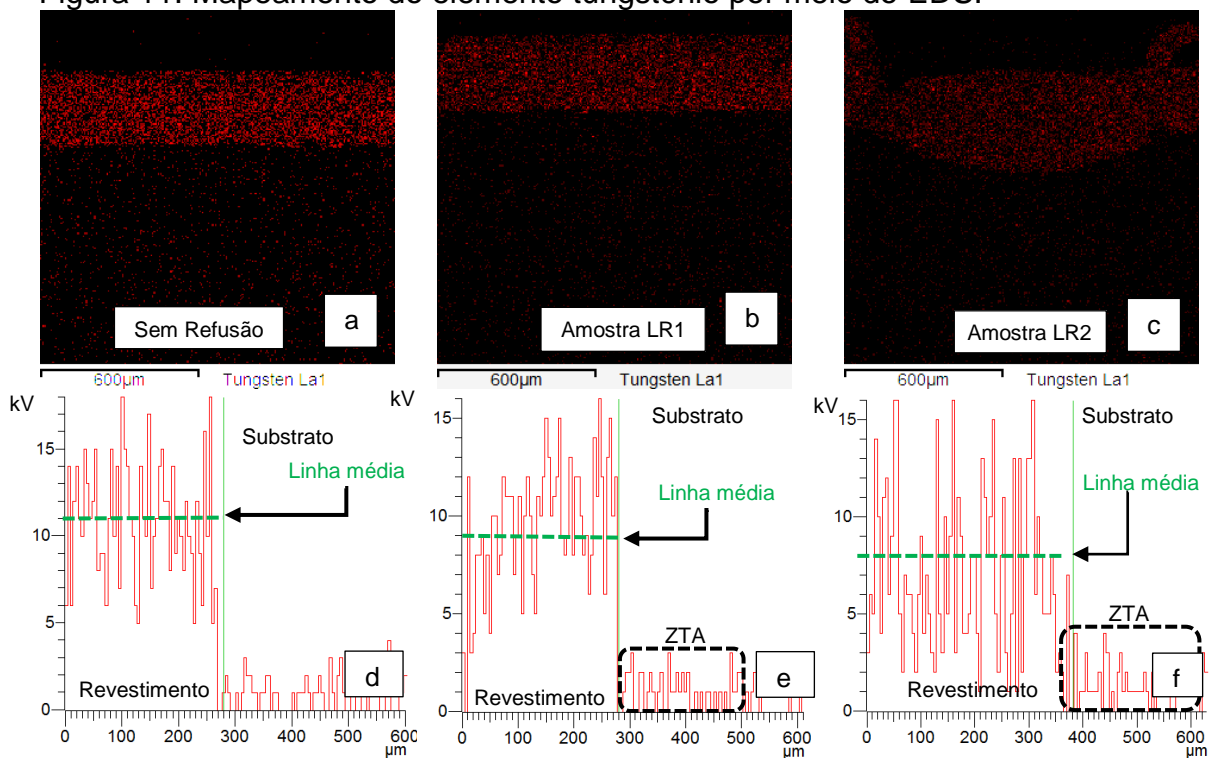
É possível observar que na primeira indentação realizada temos 3 microdurezas diferentes. A amostra LR1 (Fig. 9a) foi irradiada com uma menor potência, tal configuração propiciou um aumento na microdureza média para 1313 HV do revestimento quando comparada com a microdureza média de 1087 HV na amostra sem refusão, que tem sua microestrutura apresentada na Fig. 8a. A amostra LR2, onde uma maior potência foi utilizada, observa-se uma menor microdureza média, em torno de 840 HV. Isto se deveria à grande diluição ocasionada pela alta potência, fazendo com que elementos do substrato SAE 1045 fossem transferidas para a camada do revestimento WC-CoCr, levando a um decréscimo na microdureza. Porém, no ponto da seguinte indentação, que está localizado dentro da zona

termicamente afetada, já no substrato, fica claro que a amostra LR2 e LR1 obteve uma maior microdureza média de 328 HV e 390 HV respectivamente se comparado com a amostra sem refusão, onde a microdureza média atinge 279 HV. Afzal (2015) constatou em seus testes, que a zona termicamente afetada (ZTA), tem sua estrutura ligeiramente alterada. Nos ensaios realizados por PANZEIRA (2012) as duas primeiras endentações sobre o substrato também apresentaram uma microdureza maior que a microdureza nas amostras sem refusão.

#### 4.1 ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS)

O EDS linha e mapa, possibilitam uma análise da distribuição dos elementos químicos no revestimento e substrato. A Fig. 8 mostra a dispersão de energia do WC e o mapeamento deste elemento contido no revestimento e substrato das três amostras.

Figura 11. Mapeamento do elemento tungstênio por meio do EDS.



Fonte; do autor (2020).

Pode-se perceber que a linha média de energia faz ligação direta com o mapa de energia. Também se entende que densidade de potência e a microdureza estão atreladas a energia do WC contida no revestimento.



Na amostra sem refusão (Fig.11d), a energia do elemento WC está com a maior média, em torno do 11kV, assim como se observa na Fig.11a, que a dispersão do elemento WC no revestimento está mais aparente quando comparado com as demais amostras. Para amostra LR1, ocorreu uma queda da energia média (Fig.11e), logo o mapeamento do elemento (Fig. 11b) mostra uma diminuição energia contida o revestimento. A amostra LR2, foi a qual demonstrou a menor energia média (Fig. 11f), assim como a menor densidade de energia (Fig. 11c) contida na camada de revestimento refundida.

Tendo em vista que a amostra LR1 e LR2, foram submetidas a refusão a laser, pode-se entender que a diluição da matriz CrCo e a maior difusão do WC, causam uma redução na energia média do elemento. A baixa densidade de potência ocasiona um decréscimo na energia média do WC, porém se obtém um aumento na microdureza. A alta densidade de potência, faz com que a energia média decline em grande proporção, e a queda da microdureza é observada.

## 4.2 ANÁLISE DA RUGOSIDADE DAS SUPERFÍCIES

Conhecer o perfil da superfície do material, tem um papel importante na sua aplicação e, contribui para o aumento da vida útil ou podendo levar o equipamento a falha. Os perfis das superfícies das amostras foram avaliados e seu parâmetros mais relevantes a este trabalho, estão dispostos na Tab. 10.

Tabela 10. Parâmetros de Rugosidade da Superfície.

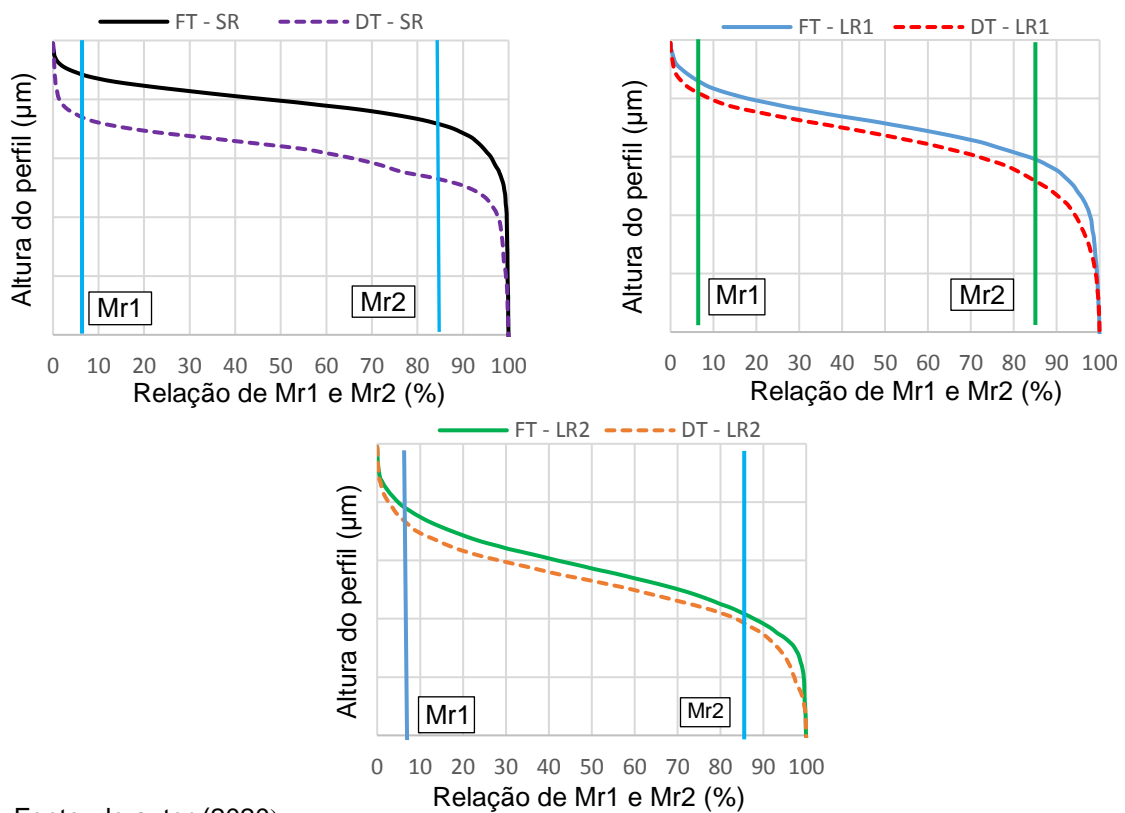
Parâmetros	Fora da trilha						Dentro da trilha					
	FT -LR1		FT -RL2		FT -SR		DT-LR1		DT-RL2		DT-SR	
	Valor	Des.	Valor	Des.	Valor	Des.	Valor	Des.	Valor	Des.	Valor	Des.
Ra (µm)	0.09	0.04	0.11	0.006	0.09	0.00	0.08	0.01	0.12	0.06	0.10	0.05
Rq (µm)	0.12	0.06	0.14	0.007	0.13	0.00	0.11	0.01	0.16	0.08	0.14	0.06
Rz (µm)	0.98	0.47	1.04	0.030	1.46	0.10	0.88	0.06	1.02	0.52	1.47	0.22
Rk (µm)	0.25	0.08	0.35	0.018	0.25	0.02	0.23	0.00	0.34	0.19	0.26	0.12
Rpk (µm)	0.09	0.06	0.14	0.008	0.09	0.01	0.08	0.01	0.16	0.08	0.14	0.03
Rvk (µm)	0.21	0.13	0.17	0.022	0.25	0.02	0.20	0.01	0.23	0.12	0.26	0.10
Mr1 (%)	7.57	1.81	8.73	0.374	7.29	0.54	7.08	0.50	9.24	0.58	7.86	0.05
Mr2 (%)	84.85	1.43	87.81	0.494	84.09	1.79	83.45	1.34	86.43	1.73	86.44	0.96
Rmr(%)	77.87	2.05	79.08	0.77	77.08	2.19	76.37	1.84	78.00	2.09	78,55	0.99

Fonte; Do autor, (2020)

Após o preparo das amostras, é possível observar que todas elas possuem uma superfície com um Rmr abaixo de 70% como sugere a Trelleborg.

A curva de Abbott Firestone é um método importante de caracterização de superfícies, especialmente quando se trabalha com superfícies onde é necessário introduzir parâmetros específicos. Utilizando os dados da Tab.10, foi construído um gráfico com curvas médias características, baseado na teoria Abbott Firestone's.

Figura 12. Comparação das Curvas média Abbott Firestone para as três amostras dentro e fora da trilha de desgaste.



Fonte; do autor (2020).

A curva SR na Fig. 12, mostra uma porcentagem de vales bem superior a demais, após ser submetido ao desgaste ocorre a diminuição dos vales (Rvk) e obtém-se a elevação dos picos (Rpk). A amostra SR demonstrou maior diferença de Rpk e Rvk dentro e fora da trilha de desgaste. Isso pode estar relacionado a maior porosidade contida no revestimento e baixa densidade morfológica.

As curvas das amostras LR1 e LR2, não tiveram uma discrepância grande de Rpk e Rvk. Tendo em vista que estas foram submetidas a refusão laser, onde, foi obtido a diminuição da porosidade e a diluição da matriz CrCo. A potência

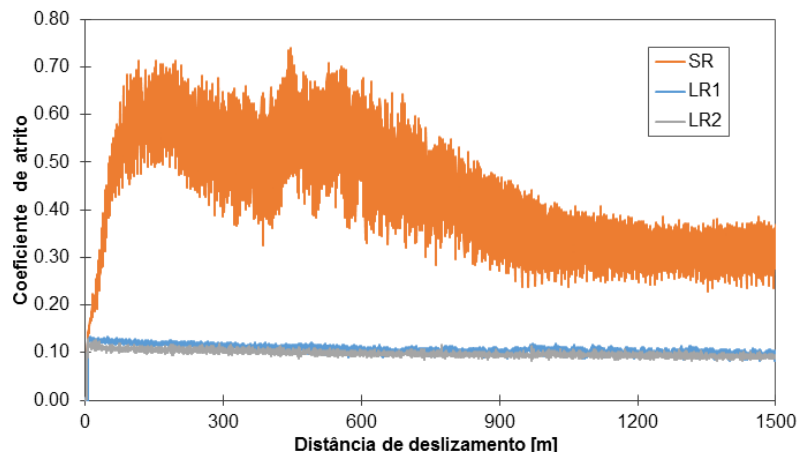
da amostra LR2 foi superior a LR1, porém obteve-se uma taxa de planeza ( $R_{mr}$ ) maior para amostra LR1. Mostrando que uma potência elevada não é necessária para obter resultados satisfatórios para aplicações de componentes que necessitam de vedações e deslizamento.

A pesar da amostra LR2 ter uma dureza menor que a SR a taxa de porcentagem da diferença de  $R_{pk}$  e  $R_{vk}$  foi menor. Tal fato pode estar relacionado a maior densidade de potência usada na amostra LR2. Panziera (2020), relata em seus estudos que a refusão a laser é capaz de eliminar poros, microfissuras, defeitos e regiões não moldadas existentes no revestimento gerado pelo processo de HVOF.

### 4.3 ATRITO E ALTERAÇÕES NAS SUPERFÍCIES

A medição do coeficiente de atrito, traz informações importantes sobre a característica do material, o que possibilita um dimensionamento mais adequado para cada aplicação. Durante os testes foi monitorado a evolução do atrito em função da distância percorrida. A Fig. 13, apresenta a oscilação do atrito para as 3 amostras.

Figura 13. Comportamento do coeficiente de atrito nos ensaios pinos sobre disco



Fonte; do autor (2020)

Por meio da Fig. 13, é possível ver claramente que a amostra SR teve um maior coeficiente de atrito e uma maior instabilidade no início do ensaio. Esta oscilação inicial também é relatada por Castro et al, (2018) em seus experimentos. O mesmo relata que esta instabilidade é explicado pela contribuição da deformação plástica no mecanismo de desgaste desse revestimento. Este fenômeno inicial é

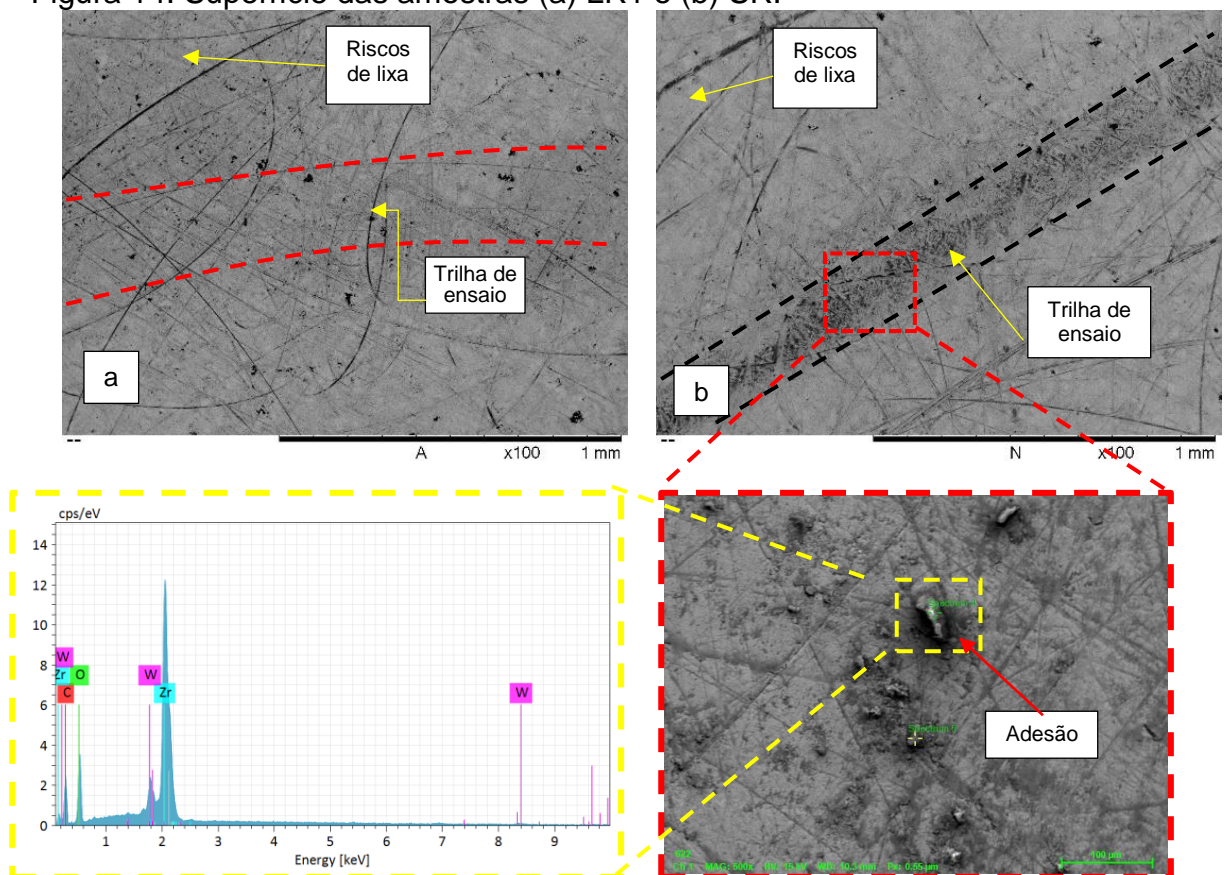


relatado na literatura como Runing-in, Arango (2010), comenta que no primeiro momento ocorre o amaciamento ou acomodação entre a superfícies.

Observa-se que após os 1000 m, o atrito na amostra SR se estabiliza, é possível que a partir deste ponto as asperezas mais sobressalentes, tenham entrado em deformação plástica e elástica. A formação de óxidos na superfície, também contribuem para a estabilidade do coeficiente de atrito. Porem a oscilação do coeficiente continua alta, o que justifica o aumento da porcentagem de picos após o ensaio de desgaste, visto na Fig. 12, uma vez que está amostra não foi submetida a refusão a laser. Está alta oscilação é indesejável para componentes de vedação e deslizantes.

Nos ensaios de desgaste, as amostras com as maiores durezas (SR e LR1) não apresentaram taxas de desgastes relevantes, e nem deformações, riscamento, adesão ou sucos superficiais aparentes. Estas caraterísticas são possíveis visualizar na Fig. 14, as superfícies captada pelo MEV amentada em 100x das duas amostras.

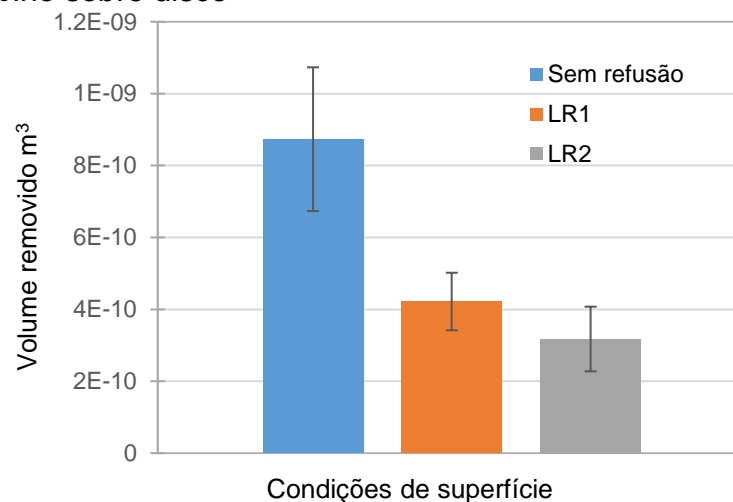
Figura 14. Superfície das amostras (a) LR1 e (b) SR.



Fonte; do autor (2020)

Na Fig. 14b se observa perfeitamente a trilha produzida pelo deslizamento da esfera após o ensaio de deslizamento. Já a Fig. 14a está mais difícil de identificar. A marca mais aparente na Fig. 14b, está relacionada a porosidade contida no particulado aspergido por HVOF, assim como a baixa densidade do revestimento WC-CrCo. A adesão da esfera de zircônia no disco da amostra SR também ocorreu, isso pode se confirmado no gráfico de dispersão de energia, onde se observa o aparecimento do elemento Zr. Esta adesão ocasionou um desgaste maior na esfera usada para o ensaio de pino sobre disco. Foi usado as equações apresentadas no capítulo 2, para calcular o volume removido das esferas. A Fig. 15 apresenta o desgaste dos volumes removidos.

Figura 15. Volume removido das esferas no ensaio pino sobre disco

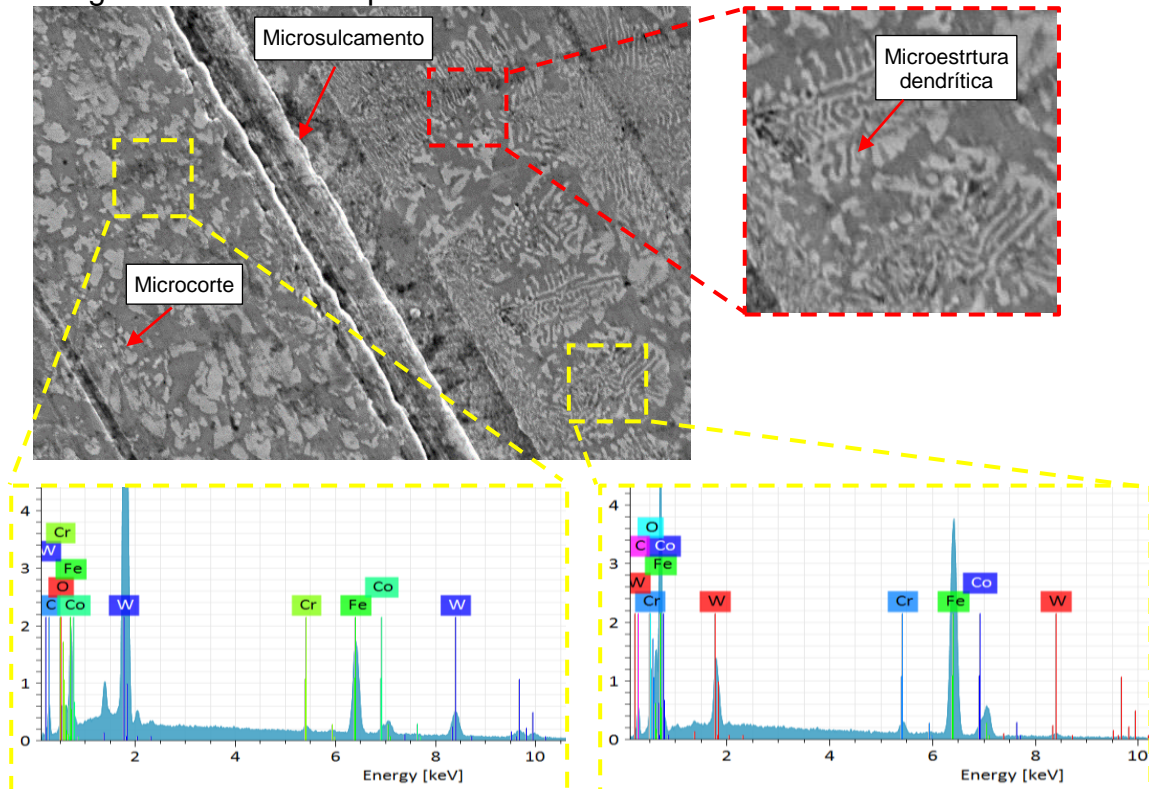


Fonte; do autor (2020).

É possível observa que as esferas das amostras LR1 e LR2, tiveram o menor volume removido. Sabe-se que a amostra LR1 tem uma dureza (1.313 HV) próxima da esfera (1.500 HV), esta proximidade de durezas, possibilitaram um pequeno desgaste na esfera. Grande diferença entre as durezas da amostra LR2 (840 HV) e a esfera, fez com que a mesma trabalhasse como uma ferramenta de corte, causando maiores deformidades da superfície e baixo desgaste na esfera.

A potência menor empregada na amostra LR1 fez com que a mesma tivesse um comportamento tribológico excelente quando comparado com a amostra LR2 e SR. A Fig. 16, expõem a imagem da superfície da amostra RL2 obtida no MEV.

Figura 16. EDS da superfície da amostra LR2.



Fonte; do autor (2020).

A maior potência usada para a amostra LR2, acarretou uma maior diluição e conseqüente uma perda da taxa de WC na superfície e a transferência dos elementos do substrato SAE 1045 para o revestimento. Tal fato, levou a um maior deterioramento da superfície e uma maior taxa de desgaste. A aparecimento do elemento Fe na superfície do revestimento pode ser observado no EDS da Fig.16.

Visto que a diferença de microdureza da esfera é muito superior à da amostra LR2, a esfera trabalhou com uma ferramenta de corte. Pode se observar o aparecimento de microsulcamentos e microcortes no revestimento. Estes se deram devido a presença de asperezas aderidas a esfera e a pequenas partículas que acabam se soltando da mesma durante e da amostra no ensaio, estas permanecem no interior das pistas, visto que a geometria côncava da pista dificulta a expulsão das partículas. Estas partículas são arrastar e/ou comprimir ao longo da pista, resultando na remoção, criando riscos e trincar ao longo da trilha (WENG et al., 2016).

## 5 CONCLUSÃO

Verificou-se no presente estudo que o composto particulado WC-CoCr, quando aspergido por HVOF, fornece um revestimento denso e com baixa porosidade, além disso, as partículas de WC provêm ao revestimento com boa dureza. Por outro lado, foi visto que interação metalúrgica entre o revestimento e o substrato não é tão satisfatória de vida a baixa fusão entre a liga WC-CrCo e a superfície aspergida.

A refusão a laser, quando ministrada em uma potência adequada, possibilita uma melhora significativa na dureza do revestimento e a diminuição das porosidades. Em densidades de potências elevadas e baixa velocidade, ocorre uma diluição excessiva da camada, causando a deformação da superfície e a diminuição da espessura do revestimento depositado e conseqüentemente tem-se uma queda na microdureza. A alta densidade de potência não se faz necessário para obter uma superfície com boa resistência ao desgaste, excelente microdureza, assim como, para obter um comprimento de difusão que atinja o revestimento em sua total espessura.

A alta diluição que a amostra LR2 é exposta, fez com que uma porcentagem da partícula de WC se transferisse para o substrato. Porém, foi observado que uma densidade de potência maior, melhora a interação metalúrgica entre revestimento e substrato. Em densidade de potência mais elevada o substrato também é afetado termicamente, fazendo que se tenha aumento da microdureza na zona termicamente afetada. Como era de se esperar a amostra com menor dureza, teve uma taxa deformidade superficial maior quando comparada com as demais.

Os parâmetros de rugosidade encontrados, são satisfatórios para a aplicação em componente que requerem vedações. Para aplicação na PH, há a necessidade de experimentos com uso da PH, visto que a mesma opera em rotopercução. A Aspersão térmica HVOF e a refusão a laser possui grandes requisitos para uma aplicabilidade na indústria carbonífera. Considerando que o processo pode vir a evitar substituição de peças mecânicas e conseqüentemente o descarte e custo para as empresas.

## AGRADECIMENTO

Primeiramente a Deus, a família pelo incentivo e a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho. A UFSC - Universidade Federal

de Santa Catarina por ter realizado o processamento de LASER nos revestimentos depositados por HVOF, em especial ao grupo do Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP por ter cedido o espaço e equipamentos para essa pesquisa e ao professor Richard de Medeiros Castro, pela orientação neste estudo.

## REFERENCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6405; **Rugosidade da superfície**, 1988.

AFZAL, M; KHAN, A. Nusair; MAHMUD, T, Ben; KHAN, T,I; AJMAL, M. **Effect of laser melting on plasma sprayed WC-12%Co coating**. Surface and Coatings Technology. 266 (2015) 22-30.

ARANGO, Cristian Camilo Viáfara. **Transição no regime de desgaste por deslizamento dos aços: Uma abordagem termodinâmica**. Tese apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo- SP. 2010. 250 p.

ASTM G99–04, **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**. West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM E384 – 05a. **Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. West Conshohocken, PA, 2017.

BOLELLI, G., LUSVARGHI, I., BARLETTA, M. **HVOF-sprayed WC-CoCr coatings on Al alloy: Effect of the coating thickness on the tribological properties**. Wear 267 (2009) 944-953.

BHUSHAN, Bharat. **Introducton to Trobology**. 2 ed. Editora Wiley. New York, 2013

CHEN, H., Xu, C., ZHOU, Q., HUTCHINGS, I. M., SHIPWAY, P. H., & LIU, J. (2005). **Micro-scale abrasive wear behaviour of HVOF sprayed and laser-remelted conventional and nanostructured WC–Co coatings**. Wear, 258(1-4), 333-338.

CHIKARAKARA, E., AQIDA, S., BRABAZON, D., NAHER, S., PICAS, J. A., PUNSET, M., & FORN, A. (2010). **Surface modification of HVOF thermal sprayed WC–CoCr coatings by laser treatment**. International Journal of Material Forming, 3(1), 801-804.

CUI, C., Ye, F., & SONG, G. (2012). **Laser surface remelting of Fe-based alloy coatings deposited by HVOF**. Surface and Coatings Technology, 206(8-9), 2388-2395.

CASTRO, DE MEDEIROS, R., Curi, E. I. M., Inácio, L. F. F., & da Silva Rocha, A. **A Comparison of Microstructural, Mechanical and Tribological Properties of WC-10Co4Cr - HVOF Coating and Hard Chrome to Use in Hydraulic Cylinders**. American Journal of Materials Science 2018, 8(1): 15-26.



DAS, B., NATH, A., & BANDYOPADHYAY, P. P. (2019). **Scratch resistance and damage mechanism of laser remelted thermally sprayed ceramic coating.** *Surface and Coatings Technology*, 364, 157-169.

DIN 4287 – NBR ISO 4287. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.** ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2002, 18p.

GHADAMI, F., & AGHDAM, A. S. R. (2019). **Improvement of high velocity oxy-fuel spray coatings by thermal post-treatments.** A critical review. *Thin Solid Films*, 678, 42–52.

GEHRKE Gabriel Angelo. **Revestimento de roscas helicoidais agrícolas a base de CrC depositado via HVOF posteriormente irradiadas com laser de Nd YAG e de Co2.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, Porto Alegre – RS. 2017 65p.

GERMANI, Dacry José. **A mineração no Brasil. Ver. 2. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Ciência, Tecnologia e Inovação.** Secretaria Técnica do Fundo Setorial Mineral. Rio de Janeiro, 2002. 60 p.

Lee, J. Joo. Y. Yoon, J. **Effect of Laser Heat-treatment on WC-CoFe Coated Surface by HVOF.** Department of Materials Science and Engineering, Changwon National University, Changwon, Gyeongnam 641-773, Republic of Korea. 2018. 7p

LIMA, C. C., TREVISAN, R. **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicação.** São Paulo – Artliber Editora, 2002.

LUDEMA, K.C. **Friction, wear and lubrication. Textbook in tribology.** Editora CRC Press. Michigan, 1996. 263p.

MAJUMDAR, J. D.; MANNA, I. **Laser materials processing.** *International Material Reviews*. 2013, 49p. Disponível em; <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000003>

MARTI, Eric; PICAS, Josep A; PUNSET, Miquel,M; BAILE, FORN, Antoni. **Properties of WC-CoCr Based Coatings Deposited by Different HVOF Thermal Spray Processes.** Artigo - Magazine Plasma Process and Polymere. 2009. 6p.

PANZIERA, R. C. Oliveira, A.C.C. Pereira, M. Ratszone, F. **Study of the effects of the laser remelting process on the microstructure and properties of the WC–10Co–4Cr coating sprayed by HVOF.** The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering – Alegrete – RS. 2020. 8p

PANZIERA, Renato Camponogara. **Aplicação do revestimento de wc depositado por aspersão térmica pelo método hvof para diminuir a abrasão do grão de arroz em máquinas agrícolas.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa – Alegrete -RS. 2016. 76p.

PAREDES, Romón S. Cortés. **Aspersão Térmica.** Universidade Federal, Paraná, Departamento de Eng. Mecânica Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagem especiais. Curitiba, 2012. 102 p.

PAWLOWSKI, Leach. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings**. 2ed. Editora Wiley. West Sussex, England. 2008, 647 p.

PEREZ, Jessica Marlina Rodriguez. **Refusão superficial por laser de ligas de Ti-Nb sinterizadas**. 2015. 89f. Dissertação de Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação – Universidade Estadual de Campinas – SP. 2015.

REBAI, Hosni. **Tribology and machine elements**. Mechanical Engineering and Production Technology. Design of mechanics. Riihimäki, 2014. 63 p.

RIBEIRO, José Teodorico de Melo; Ferreira, Gilda Carneiro. **Mineração Subterrânea de Carvão X Comunidade no seu Entorno: um exemplo de Santa Catarina**. Eng. de Minas/DGA/IGCE/UNESP. Rem: Rev. Esc. Minas vol.60 no.3 Ouro Preto July, 2007.

RONZANI, Antonio Guilherme. **Resistência à cavitação do revestimento de carbetto de tungstênio refundido via laser de co2 aplicado em aço aisi 1020**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora da Universidade Federal do Pampa – RS. 2017.

SALCEDO, Milton Coba; CORAL, Irene Buj; OCHOA, Guillermo Valencia. **Characterization of Surface Topography with Abbott Firestone Curve**. Contemporary Engineering Sciences, Vol. 11, 2018, no. 68, 3397 – 3407.

STACHOWIAK, G. W., BATCHELOR, A. W., **Engineering Tribology**. Ed. Butterworth-Heinemann, 3rd edition, Oxford, UK, 2013, 744p.

STEEN, W. M.; MAZUMDER, J. **Laser Material Processing**, 4ed, Spring, London, 2010

STOLARKI, T. A. **Tribology in machine design**. 1ed. Editora Butterworth-Heinemann. Oxford – UK. 1990. 311p.

TELEGINSKI, Viviane. **Deposito de revestimento com laser de CO2 para proteção térmica de palhetas de turbinas aeronáuticas e industriais**. 2016. 85f. Tese de Doutorado em Física e Matemática Aplicada – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos.

TRUHAN, John; MENON, Ravi; LECLARIE, Frank; WALLIN, Jack; QU, Jun; BLAU, Peter. **The Friction waer of Various Hard-Face Cladding For Deeep-Hole Driling**. Wear 263(2007)234-239.

WENG, Z. et al. **Wear resistance of diode laser-clad Ni/WC composite coatings at different temperatures**. Surface and Coatings Technology, v. 304, p. 283-292, jul.2016.

VASCO, Joel. BORTOLATO, Paulo. **Laser micromachining for mould manufacturing: I. The influence of operating parameters**. Mechanical Engineering Department, School of Technology and Management, Polytechnic Institute of Leiria, Leiria, Portugal. 2014, 9p.