

AVALIAÇÃO TRIBO-MECÂNICA DA LIGA FeCrNiMo COM ADIÇÃO DE WC APLICADA POR L-DED

Flavio Ghedin Neto¹

Richard de Medeiros Castro²

Renato Camponogara Panziera³

Resumo: Para melhorar o desempenho e eficiência dos rotores utilizados nas minerações no bombeamento do rejeito da polpa, é recomendável a utilização de técnicas de revestimentos que suportam o ambiente agressivo em que os sistemas de bombeamento estão inseridos. Atualmente o revestimento utilizado nos rotores e sistemas de bombeamento, consiste em uma pasta de resina e SiC, porém é um revestimento que demanda muita manutenção, gera desbalanceamento e perda de geometria durante seu uso, diminuindo a eficiência dos componentes. Por essa razão, a engenharia de superfície vem propondo técnicas de deposição de revestimento que visam aumentar a resistência ao desgaste e reduzir o coeficiente de atrito, melhorando suas propriedades tribológicas, pois acarreta economias de energia, manutenções e matéria prima. Neste sentido, o presente trabalho analisa o revestimento produzido com a liga FeCrNiMo e a influência das porcentagens de carbonetos depositados por *Laser metal deposition* na matriz metálica, a fim de obter uma melhor parametrização, com amostras submetidas aos ensaios de microdureza, desgaste abrasivo roda de borracha seguindo o procedimento da norma ASTM G65, complementando com análise de microscopia eletrônica de varredura, perfilometria e líquido penetrante. O teste de abrasão apresentou que uma certa adição de carbonetos influencia em cerca de 10x a diminuição do desgaste, porém há uma margem em que as propriedades de benefício e malefício entram em conflito, pois a maior adição acarreta a maior porosidade e fragilidade, causando deslocamentos e perdas do revestimento.

Palavras-chave: *Laser metal deposition*. FeCrNiMo. WC. Parametrização. Tribologia. Rotor de bomba. Carvão mineral.

1. INTRODUÇÃO

O processo de beneficiamento do carvão mineral trata de obtê-lo com maior pureza, reduzindo os teores de cinza e enxofre, dado que o enxofre influencia na geração de gases nocivos e a redução das cinzas aumenta o seu poder calorífico

¹ Graduando em Engenharia Mecânica, 2023. E-mail: flavio.ghedin801@gmail.com

² Prof. Dr. Richard de Medeiros Castro. E-mail: richard.castro@satc.edu.br

³ Mr. Renato Camponogara Panziera. E-mail: renato.panziera@gmail.com



[MODIANO, et al 1982; HUMMES, et al 2007]. Como o carvão nacional é caracterizado por um baixo poder calorífico e elevado teor de cinzas, enxofre e matéria inorgânica, é necessário o seu beneficiamento [FEIL, et al 2008; ZACCARON et al., 2015].

No beneficiamento utilizam-se bombas para transportar o líquido para os ciclones, responsável pela separação do fluido e rejeito pelo método gravimétrico. Desta forma, as partículas de maior densidade decantam enquanto o carvão precipita para a parte superior [RONCONI, 2015].

O bombeamento desse líquido gera um elevado desgaste no rotor e canais do sistema, decorrente da alta presença de materiais abrasivos. Com o tempo, isso causa uma baixa eficiência e conseqüentemente um baixo rendimento das bombas [BAUER et al., 2021]. Uma das alternativas para reduzir o desgaste nos rotores e carcaça da bomba é a aplicação de revestimentos com melhores propriedades mecânicas e tribológicas.

Atualmente, os revestimentos utilizados nas superfícies dos rotores na Indústria de extração de carvão Carbonífera Catarinense, possuem características tribológicas que não condizem com sua utilização, pois sofrem deslocamentos localizados. Esse tipo de revestimento empregado nos rotores possui uma camada extremamente espessa, além de ser aplicado manualmente, o que ocasiona também o desbalanceamento do rotor. Essa série de fatores acarreta numa menor eficiência do rotor, gerando um maior consumo de energia para transportar o rejeito.

A aplicação de revestimentos eficientes evita o desgaste precoce do rotor, preservando sua geometria, isso gera uma melhor eficiência e reduz seu consumo de energia. Estima-se que na área da mineração o consumo total de energia seja de 6,2% do consumo total global [HOLMBERG, et al 2017].

Atualmente, um dos processos mais estudados para deposição de revestimentos contra o desgaste é a técnica *Laser Directed Energy Deposition* ou *L-DED*. A técnica de revestimento laser trata-se de um processo metalúrgico, onde há uma fusão entre o substrato e o revestimento, conseqüentemente uma adesão superior aos outros revestimentos. No método de *L-DED*, podem ser utilizadas frações de ligas metálicas combinadas com reforços cerâmicos, onde a liga metálica será o aglomerante para o compósito de matriz metálica, como por exemplo a liga



de ferro com carboneto de tungstênio. Trazendo para o revestimento propriedades de resistência à corrosão e ao desgaste.

Uma das ligas mais amplamente estudadas no processo de revestimento a laser é composta de WC combinado com ligas de cobalto, cromo ou níquel. No entanto, em termos de custo, o cobalto e o níquel são mais caros do que o ferro. Em certos casos, a aplicação desses metais é indispensável, mas em aplicações onde a resistência é fornecida principalmente pelo metal duro, o aglutinante não é tão relevante, permitindo que um metal com menor resistência mecânica e química seja utilizado.

O presente estudo investigou a liga FeCrNiMo com adição de WC em diferentes porcentagens, com o propósito de determinar a composição mais adequada para a aplicação em rotores. Para validar a pesquisa, foram conduzidos diversos ensaios para avaliar as propriedades tribomecânicas da liga. Os ensaios compreenderam medições de microdureza, testes de desgaste abrasivo e análises metalográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BENEFICIAMENTO DO CARVÃO MINERAL

O carvão mineral catarinense é caracterizado pela alta taxa de impurezas, como enxofre e cinzas. Por conta disso, o processo de beneficiamento é necessário. O processo consiste no transporte do líquido para os ciclones por meio de bombas centrífugas. Com isso, o fluido é afetado por meio da separação gravimétrica, separando as partículas mais finas de menor densidade do carvão [RONCONI, et al 2014]. Desta forma, as partículas de maior densidade decantam enquanto o carvão precipita para a parte superior do ciclone já separado do meio mais denso.

O líquido denominado polpa é composto por um alto teor de óxidos de sílica, alumínio, carbono proveniente do carvão, ferro e enxofre, essa combinação cria um líquido com propriedades abrasivas e corrosivas, já que o contato da água com enxofre gera alguns ácidos, como o ácido sulfúrico [COSTA, et al 2013]. Após ser

realizado a separação do meio denso, os rejeitos são bombeados para fora através de outra bomba centrífuga.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 1, observa-se que o rejeito gerado durante o processo de beneficiamento apresenta uma baixa concentração de carvão em comparação à polpa, porém é enriquecido com óxidos. Essa composição química do rejeito resulta em um fluido altamente corrosivo, pois a presença de carbono proveniente do carvão desempenha um papel lubrificante nos rotores. Como resultado, o sistema de bombeamento utilizado para transportar esses rejeitos requer manutenções e reparos frequentes, o que acarreta em altos custos operacionais para as empresas do setor carbonífero. Essa demanda constante de manutenção e a necessidade de lidar com um fluido agressivo representam desafios significativos para as operações de bombeamento nesse contexto.

Tabela 1 – Composição química do rejeito da polpa com base em 7 amostras

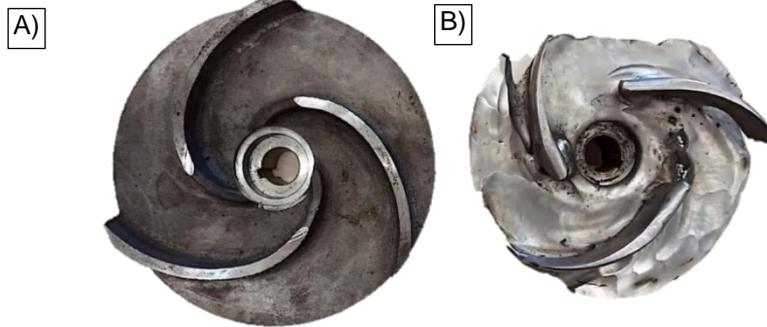
Teor de óxidos (% em massa)										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	MgO	MnO	ZrO ₂	Outros
40,94	16,45	3,14	9,72	2,24	2,72	1,22	0,07	0,02	0,06	23,42
3,12	1,17	1,44	3,56	1,41	0,46	0,17	0,19	0,03	0,03	0,04

Fonte: adaptado de Faraco (2021).

O sistema de bombeamento empregado para o transporte desse líquido sofre agressões severas de desgaste corrosivo, abrasivo e erosivo em determinadas regiões, requerendo a utilização de materiais resistentes a esses meios de desgaste. Na Figura 01, é possível visualizar o desgaste ocorrido durante o processo de bombeamento. Atualmente, a técnica de revestimento manual com uma pasta de resina e metal duro (SiC) é adotada, porém esse método manual resulta em diversas perdas de eficiência no sistema [BAUER, 2021].

Para superar esses desafios, são necessárias abordagens mais avançadas que envolvam o desenvolvimento de revestimentos duráveis e eficientes, ou até mesmo a adoção de materiais de construção alternativos capazes de resistir aos meios de desgaste presentes nesse ambiente corrosivo e abrasivo.

Figura 01 – Rotor A) antes da utilização (sem SiC) e B) rotor após sua utilização



Fonte: do autor (2023)

O revestimento com resina e carboneto de silício gera um aumento da massa do rotor, alterando suas geometrias além de que a resina não suporta o desgaste proveniente do rejeito, isso gera uma deterioração da resina, retirando precocemente os carbonetos aglomerados no revestimento. Tornando um revestimento ineficiente para a situação.

2.1.1 Tribologia em sistemas de bombeamento

A tribologia estuda o desgaste, o atrito e a lubrificação. Os mecanismos de desgastes podem ocorrer de diversas formas, eles podem ser caracterizados pelas deformações causadas na superfície do material durante as interações. O atrito ocorre quando duas superfícies com diferentes velocidades ou sentidos opostos entram em contato durante um movimento, a força contrária ao movimento é chamada de força de atrito. Esse fenômeno dissipa a energia cinética geralmente na forma de calor por meio dos materiais da superfície [BUSHAN, 2003].

Para diminuir o desgaste proveniente do atrito, comumente são empregadas técnicas de lubrificação ou revestimentos com baixo coeficiente de atrito. Segundo Holmberg, (2017), estima-se que 6,2% do consumo global de energia seja utilizado para processos de mineração, cerca de 40% da energia consumida na mineração é utilizada para superar o atrito. Além disso, o atrito e o desgaste são responsáveis por 2,7% das emissões totais de CO² no mundo.

Em sistemas de bombeamento na mineração, os rotores são responsáveis pelo movimento centrífugo, que faz com que forneça energia cinética ao líquido realizando o transporte da polpa [SILVA, 2011]. Devido ao contato do rotor



no líquido, que é extremamente erosivo e corrosivo, é gerado um desgaste no rotor, resultando na perda de geometria e desbalanceamento, gerando uma perda de eficiência do sistema.

Atualmente, no ramo carbonífero, é empregado como base dos equipamentos o aço AISI 316, devido à alta resistência à corrosão. Para reduzir o desgaste abrasivo, são empregadas técnicas de revestimentos manuais, como revestimentos compostos por resina com insertos de carbonetos de silício, porém são revestimentos que sofrem um alto desgaste, conseqüentemente ocasionam o deslocamento do revestimento [BAUER, 2021].

2.2 TRIBÔMETRO RODA DE BORRACHA

O método de ensaio de abrasivo com 3 corpos mais comum é o abrasômetro roda de borracha, regido pela norma ASTM G65. Segundo a norma, o disco rotativo é feito de uma borracha com dureza pré-definida de 60 shores A, que é vulcanizada sob um disco de aço, geralmente SAE 1045. A espessura da borracha e disco deve ser de 12,7 mm, com um diâmetro de 228,6 mm. O parâmetro de velocidade de rotação deve estar entre 190 e 210 RPM, com um fluxo de vazão do abrasivo de 300 a 400 g/min e uma força normal de 130 N [ASTM G65, 2019].

Ao decorrer do ensaio, é realizado pausas para limpeza e pesagem da amostra, para que o coeficiente de desgaste seja obtido através da Eq. 1 [QUINTERO, SANABRIA e FLÓREZ, 2015].

$$Vp = \frac{(mi-mf)}{\delta} * 1000 \quad (1)$$

Onde:

Vp = Volume perdido (mm³)

mi = massa inicial (g)

mf = massa final (g)

δ = Densidade do material (g/mm³)



Como o diâmetro da roda de borracha durante o ensaio se desgasta, é necessário realizar uma correção do volume perdido da amostra. Sendo necessária a medição da roda de borracha antes e após o ensaio, para inserir os dados na Eq. (2).

$$Vp \text{ corrigido} = \frac{\varnothing \text{ da roda antes do ensaio (mm)}}{\varnothing \text{ da roda após o ensaio (mm)}} \times \text{volume perdido (mm}^3\text{)} \quad (2)$$

O coeficiente de desgaste abrasivo pode ser calculado através da equação de Archard Eq. (3) [HUTCHINGS, 1992].

$$K = \frac{Vr}{FN \times L} \quad (3)$$

Onde:

K = Coeficiente de desgaste (mm³/Nm)

Vr = volume removido (mm³)

FN = Força normal total aplicada (N)

L = Distância total percorrida (m)

O coeficiente de desgaste “K”, obtido pela equação de Archard Eq. (3), mensura a severidade do desgaste, já que quanto maior for o valor de “K” maior será a taxa de desgaste do material.

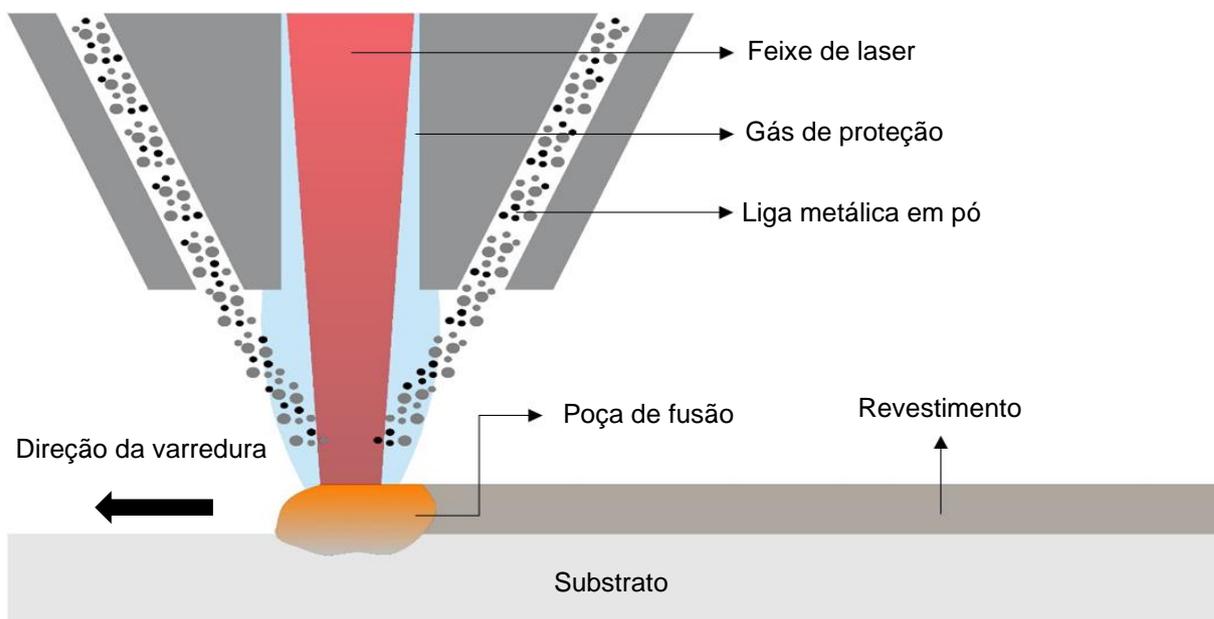
2.3 L-DED

A técnica de *L-DED* consiste na incidência de um feixe focalizado de laser sobre uma superfície, aquecendo e fundindo os materiais do substrato e de adição. O processo de deposição ocorre através de um bocal de alimentação, onde o gás de arraste e a gravidade empurram o material em forma de pó, ao mesmo tempo que o laser aquece o pó e a superfície, fazendo com que material funda ao substrato, como pode ser visualizado na Figura 02.

O revestimento a laser, também conhecido como *laser cladding*, é amplamente utilizado na indústria de extração de carvão para melhorar a resistência e prolongar a vida útil dos componentes sujeitos a desgaste. Ele proporciona proteção contra condições adversas, como abrasão, corrosão e impacto em equipamentos como brocas de perfuração, bits de corte, pás de carregamento, entre outros. A aplicação de revestimentos resistentes ao desgaste por meio da tecnologia laser cria uma camada de proteção com alta dureza e aderência, capaz de suportar as demandas extremas da extração de carvão.

Materiais como carbonetos de tungstênio e carbetos de cromo são comumente utilizados devido às suas propriedades de resistência ao desgaste. Além disso, o revestimento a laser permite reparos e reforços localizados, revitalizando componentes danificados e estendendo sua funcionalidade operacional. Essa abordagem contribui para melhorar a eficiência e reduzir os custos de manutenção ao minimizar a necessidade de substituição frequente dos componentes.

Figura 02 – Esquema do procedimento de revestimento laser.



Fonte: Do autor (2023)

Dentre as formas de tratamento de uma superfície, como aspersão térmica, carbonetação, nitretação, o revestimento laser é a que se mostra mais promissora, devido a suas características, como união metalúrgica, menor porosidade, baixa diluição e baixa interferência da temperatura na peça [SAEEDI, 2021].

2.3.1 PARAMETRIZAÇÃO

A técnica de deposição a laser possui diversos parâmetros que podem ser alterados de ensaio para ensaio. As alterações destas variáveis, por sua vez, acarretam diferentes densidades de energia, conseqüentemente, obtêm-se diferentes características microestruturais, como menor dureza, diluição com o substrato, porosidade, homogeneidade e união metalúrgica [LO; CHENG; MAN, 2003].

Por conta da alta quantidade de variáveis, a parametrização torna-se algo complexo. Uma boa parametrização consiste na revisão bibliográfica, métodos estatísticos analíticos, simulação numérica e testes preliminares para posteriormente a aplicação do revestimento em maior escala.

Os estudos de revestimentos pela técnica de *laser cladding* costumam tratar apenas das principais variáveis, que são: potência (W) e velocidade de varredura (mm/s), ponto focal, distância focal, fluxo de metal de adição, vazão do gás de proteção e gás de arraste [YU et al., 2018]. Os parâmetros que mais geram alteração no revestimento e há maior facilidade na alteração são de potência laser, velocidade de varredura, ponto focal e vazão do pó de adição [FIGUEREDO, 2019]. Os parâmetros de potência (W) e velocidade (mm/s) estão interligados no cálculo da densidade de energia.

2.3.2 Porcentagem de carbonetos nas ligas depositadas

A adição de ligas cerâmicas em matriz metálicas promove o aumento da dureza e a maior resistência ao desgaste. A adição de carbonetos de tungstênio em uma matriz de base ferro, promove um maior aumento da dureza, no entanto, deve-se atentar à porcentagem de WC adicionado, para não saturar a matriz metálica.

Geralmente, a matriz cerâmica possui densidade superior à do metal duro. quando depositada via laser, ocorre a fusão do material e o pó mais denso precipita, fazendo com que a dureza da superfície seja reduzida. A alta adição de compósitos



cerâmicos em uma matriz cerâmica também ocasiona um maior aparecimento de trincas decorrentes do resfriamento e da fragilidade do material. Os cerâmicos possuem um alto ponto de fusão, isso faz com que o material cerâmico não funda com o metal, ocorrendo um deslocamento do revestimento quando utilizado uma grande porcentagem de carbonetos, saturando a matriz metálica [PINTO, 2004].

Segundo Li et al. conforme é adicionado carbonetos, a dureza do revestimento é aumentada. No entanto, acima de 20 % de carbonetos, é encontrada uma dureza superior à dureza de 30% de carbonetos. Isso ocorre por conta da alta saturação de carbonetos, gerando a diluição do substrato com o revestimento, fazendo com que o material mais denso, geralmente o carboneto, precipite para região abaixo da superfície do corpo revestido [LI et al., (2019)]. A mesma situação ocorre em carbonetos de tungstênio, já que o tungstênio é um material extremamente mais denso que a base metálica FeCrNiMo, cerca de 4 vezes mais densa.

2.3.3 FeCrNiMo e WC

Da mesma forma que são obtidos outros carbonetos sintetizados, tais como o carboneto de nióbio, carboneto de cromo, carboneto de silício, o carboneto de tungstênio pode ser sintetizado através do processo sintetização do carboneto em altas temperaturas, onde os dois elementos são misturados a altas temperaturas e após seu resfriamento geralmente são moídos [LIMA, 2013]. Neste estudo foi utilizado o carboneto de tungstênio que após o processo de resfriamento ao invés da moagem ele é atomizado, o que forma microesferas ao invés de um material sem uma forma geométrica.

O carboneto de tungstênio é um material composto por tungstênio e carbono, que possui uma dureza excepcionalmente alta e resistência ao desgaste. Quando usado como revestimento a laser, o carboneto de tungstênio pode prolongar significativamente a vida útil de ferramentas de corte, matrizes e outras peças que estão sujeitas ao desgaste. Além disso, o revestimento de carboneto de tungstênio pode melhorar a eficiência dos processos de fabricação, ao reduzir o tempo de inatividade e os custos de manutenção associados à substituição frequente dessas peças [PINTO, 2004]



O FeCrNiMo consiste em uma liga de ferro, cromo, níquel e molibdênio que é empregada na produção de peças que demandam alta resistência mecânica e à corrosão. Em contrapartida, o carboneto de tungstênio é uma substância de elevada dureza e resistência ao desgaste, frequentemente utilizada como revestimento em ferramentas de corte, matrizes e outras peças submetidas à abrasão [LUZ, 2020; HOGANAS, 2018; PINTO, 2004].

Quando a liga FeCrNiMo é combinada com o carboneto de tungstênio, ocorre uma sinergia entre suas propriedades, resultando em uma união com alta resistência ao desgaste e à corrosão. O FeCrNiMo desempenha o papel de fornecer uma base robusta e resistente para a peça, enquanto o carboneto de tungstênio é aplicado como um reforço no revestimento para aumentar a resistência à abrasão da superfície. Essa combinação oferece uma proteção eficiente contra os efeitos adversos do desgaste e da corrosão [BARTKOWSKI, 2021].

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 PREPARAÇÃO DO CORPO DE PROVA

Os corpos de prova são de aço SAE 1020, com dimensões de 76 x 25,4 x 10 mm, conforme recomenda a norma ASTM G65. As superfícies dos corpos de prova foram previamente limpas por um jato de granalha, após o jateamento, foram colocadas em um limpador ultrassônico com álcool isopropílico durante 6 minutos e retiradas para secagem com um soprador de ar.

3.2 PARAMETRIZAÇÃO DO CORDÃO DO REVESTIMENTO

Para definir os parâmetros de velocidade de varredura (mm/s), potência do laser (kW) no processo de deposição a laser, foi realizada uma pesquisa bibliográfica e, posteriormente, testes preliminares com a utilização da liga FeCrNiMo. Os cordões foram depositados com variação da potência de 800 a 1400 kW, e a velocidade de 5 a 30 mm/s, com sobreposição de cordões de 30%, conforme indicado na Tabela 02 (PANZIERA, 2021).

A sobreposição de cordões deve ser utilizada pois os cordões possuem geometrias circulares, caso não seja feita uma sobreposição do próximo cordão, haverá um segmento da camada revestida que não será preenchida pelo material.

Tabela 02 – Principais parâmetros utilizados para deposição.

Potência (W)	Vel. de varredura (mm/s)	Ponto focal (mm)	Dens. de potência (J/mm ²)
1000	15	12	55,6

Fonte: do autor (2022).

Por meio da análise da seção transversal dos cordões e dos testes de microdureza, foi selecionado o parâmetro de 1000 W e 15 mm/s, tendo em vista que o cordão depositado apresentou as melhores propriedades de microdureza, geometria de cordão e diluição do substrato com o revestimento.

A literatura cita que a proporção ideal que se deve utilizar para a deposição da liga FeCrNiMo + WC é entre 10 a 30% de WC em peso, porém neste trabalho foi utilizado outras proporções de 0, 20 e 30% em volume.

As proporções utilizadas nesse estudo de caso foram de 0, 20 e 30% em volume, com a base metálica composta pela Tabela 03.

Tabela 03 – Proporção de carbonetos utilizada nas ligas depositadas

Composição química da liga FeCrNiMo (% peso)							Porcentagem de WC			
Comparativo	Fe	C	Cr	Mo	Ni	Outros	Amostra	A	B	C
Höganäs	Balanço	0,15	18	0,5	2,5	< 3	Vol. % WC	0,00	20,00	30,00
x123	78,39	0,25	15,95	0,02	1,82	< 3	Massa % WC	0,00	53,89	66,70

Fonte: LUZ (2020) e HOGANAS (2018).

Os pós utilizados para produzir os cordões de FeCrNiMo e WC foram submetidos a um processo de peneiramento, utilizando uma peneira com abertura de 106 µm e uma bancada vibratória. Pois apesar do fornecedor já oferecer os pós em uma determinada gramatura, a interação da umidade pode atrapalhar e unir os grãos, gerando um entupimento do sistema de deposição.

Após a etapa de peneiramento, os pós foram misturados em um misturador do tipo "Y" por 50 minutos, com uma velocidade de rotação de 30 rpm.

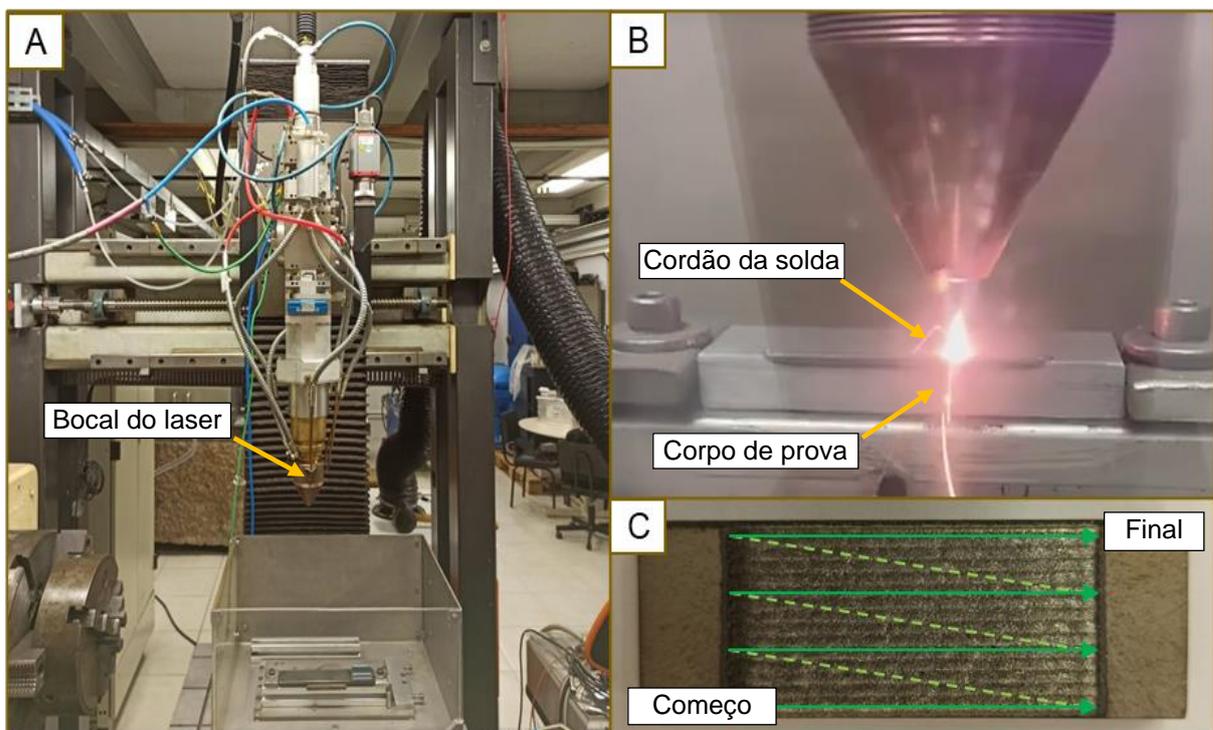
Essa condição de mistura, foi escolhida para garantir uma homogeneização adequada dos pós, evitando aglomerados de maior densidade que poderiam comprometer a distribuição uniforme durante a deposição subsequente, resultando em um revestimento com qualidade inferior.

Para calcular a porcentagem em volume de carboneto de tungstênio, foi utilizado um tubo de ensaio com gramatura. Os pós já peneirados foram inseridos dentro do tubo até atingirem a porcentagem correspondente a cada liga.

3.3 Revestimento e preparação das amostras

Para o processo de deposição a laser, foi utilizado uma fonte de laser IPG Photonics, modelo YLS-10000W, com um bocal modelo COAX-50-S, juntamente a um sistema de CNC da Siemens modelo 840 SL. Por conta da baixa granulometria dos pós e a dispersão das partículas no ar, foi necessário a utilização de um exaustor, conforme a Figura 03.

Figura 03 – A) Equipamento laser utilizado – B) Deposição dos cordões – C) Trajetória de deposição



Fonte: do autor (2023).



Com o propósito de realizar uma análise detalhada do revestimento, foram realizadas duas aplicações de camada em cada amostra, sem realizar pré-aquecimento do substrato. Cada aplicação durou 90 segundos, seguida por uma limpeza completa do sistema de alimentação de pó para prevenir entupimentos e contaminações nas amostras subsequentes. Dessa forma, o tempo total de revestimento de cada amostra foi de aproximadamente 6 minutos.

Após a aplicação do laser, as amostras foram retificadas utilizando uma retifica com rebolo de grão 100, com velocidade de avanço na faixa de 4 m/s a 8 m/s, rotação de 2000 rpm e sobreposição do rebolo de 40%. Em seguida as amostras foram lavadas em um limpador ultrassônico com álcool 99% e envolvidas com vaselina sólida para impedir a oxidação.

3.4 ENSAIO LÍQUIDO PENETRANTE

As trincas são um dos fatores que mais atrapalham no desempenho do revestimento. Muitas vezes elas são um dos fatores que causam o deslocamento e a perda precoce do revestimento, além disso, nesta situação há um líquido extremamente corrosivo, isso pode gerar uma corrosão por pites no material de substrato, por conta disso a avaliação das trincas é um fator importante.

Para tal fim, as amostras foram dispostas lado a lado, e em seguida, um spray penetrante foi aplicado na superfície dos revestimentos, seguido de um tempo de espera de 5 minutos, conforme orientações do manual do produto. Em seguida, o excesso de penetrante foi removido com água e as amostras foram secadas. Após esse processo, as amostras foram novamente dispostas lado a lado, e um revelador foi aplicado na superfície. Foram então tiradas fotografias das amostras em intervalos de tempo de 15, 20 e 30 minutos após a aplicação do revelador.

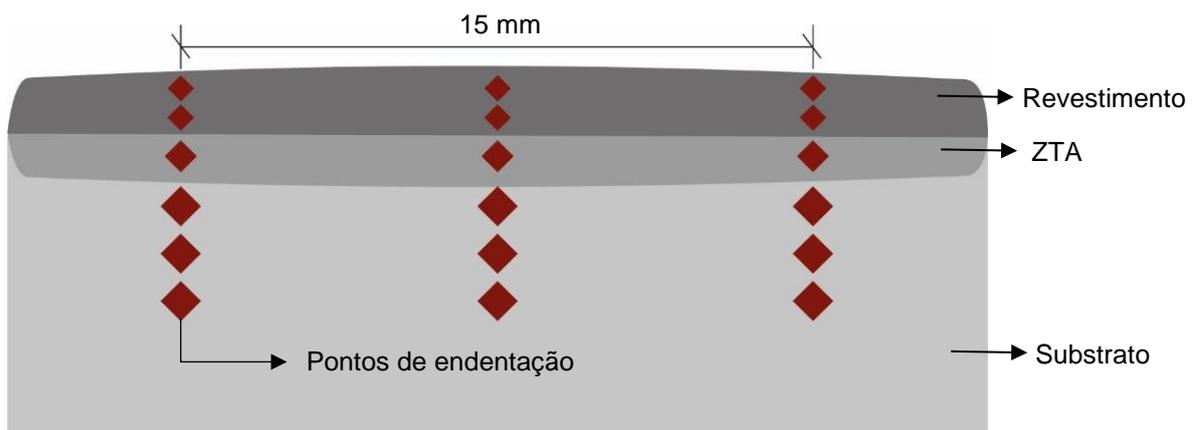
3.5 PERFIL DE MICRODUREZA

No estudo do perfil de microdureza e na análise metalográfica, foram utilizadas as amostras obtidas a partir do ensaio abrasivo. Para avaliar a estrutura e as propriedades dos materiais testados, foi realizado um corte transversal nos

cordões, escolhendo-se a região não afetada pelo contato com a roda de borracha. Essas amostras passaram por um processo de preparação, que incluiu a incorporação em baquelite e o lixamento sequencial utilizando lixas de diferentes granulometrias (80, 120, 220, 400, 600 e 1200). Em seguida, as amostras foram polidas com alumina de 0,3 μm para garantir uma superfície adequada para a realização dos testes metalográficos e a obtenção dos perfis de microdureza. Essas etapas permitem uma análise detalhada das características microestruturais e da dureza do material em estudo.

As endentações do ensaio foram realizadas no revestimento, na zona termicamente afetada e no substrato, conforme representado na Figura 04.

Figura 04 – Representação das endentações realizada nas amostras, as amostras do ensaio ASTM G65 foram seccionadas e utilizadas para a realização.



Fonte: do autor (2023).

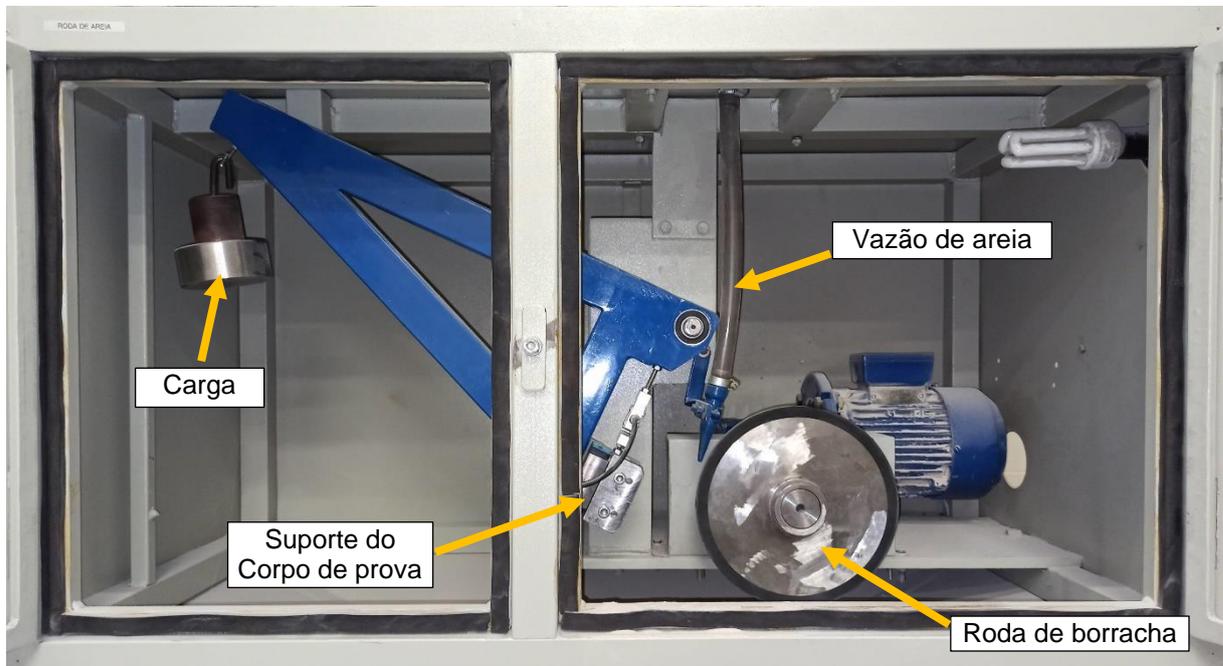
Dessa forma é possível criar um perfil de microdureza apresentando um valor médio de dureza de cada secção e gerar o desvio padrão de cada medição realizada. Para o ensaio foi utilizado uma carga de 9,807 N, com tempo de endentação de 10 s.

3.6 ENSAIO ABRASIVO ASTM G65

Para que não ocorra uma variação no ensaio ASTM 65, o mesmo deve ser realizado em uma superfície com baixa rugosidade, portanto, as amostras foram retificadas para retirar as marcas de cordões e padronizar sua rugosidade. Após o

processo de retificação, as amostras foram submetidas a testes de abrasão, de baixa intensidade no tribômetro roda de borracha visto na Figura 05.

Figura 05 – Tribômetro roda de borracha utilizado nos ensaios.



Fonte: do autor (2023).

O tempo total de ensaio foi de 30 minutos para cada amostra, com pausas de 10 minutos para elaborar a curva de desgaste e encontrar o coeficiente de desgaste (K). Uma vazão de 350 g/min, rotação de 200 rpm e carga constante de 130 N.

Para o ensaio foi utilizado uma areia padronizada pela NBR 7214 [ABNT, 2015], com granulometria de 0,15 mm. Como a umidade da areia poderia ser um fator que haveria possibilidade de influenciar no ensaio, previamente a areia foi colocada no forno durante 1 hora a 100 °C, retirando assim boa parte da umidade.

3.7 PERFILOMETRIA

As perfilometrias foram realizadas utilizando as amostras do ensaio abrasivo, com o objetivo de levantar dados da quantidade de material retirado através da análise de uma seção transversal, especialmente na região de maior contato com a roda, onde ocorre a maior perda de material. Esse ponto de maior desgaste foi



demarcado e considerado como o local de referência para as medições de perfilometria.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MICROESTRUTURA E DUREZA

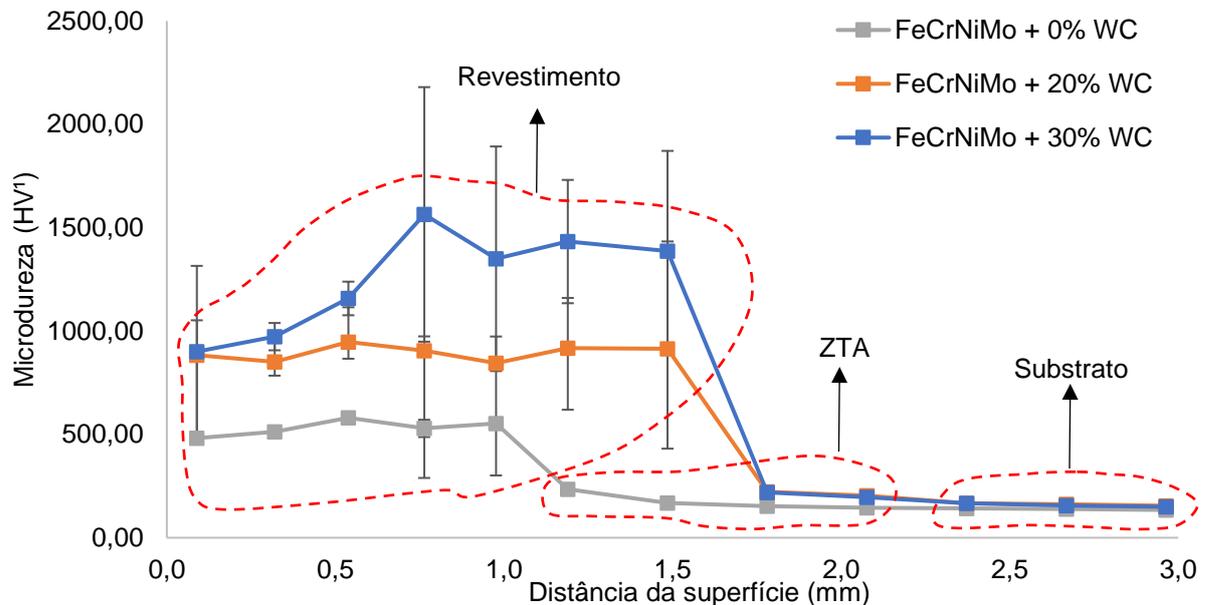
A microdureza é uma propriedade mecânica que, por muitas vezes, está relacionada à resistência ao desgaste abrasivo, portanto para avaliar qual porcentagem de carbonetos é de melhor desempenho para o uso na superfície do rotor, foi realizado um ensaio de microdureza. No entanto, em alguns casos, a microdureza de um revestimento pode ser elevada e o desgaste ser maior, por conta de outros fatores como deslocamento do revestimento, que são decorrentes de fatores como porosidades, trincas e a fragilização da superfície pelo excesso de carbonetos, diminuindo sua ductilidade em algumas regiões.

A inclusão de carbonetos na matriz metálica tem um impacto direto na dureza do material, porém seu comportamento não é previsível. Existe um ponto crítico em que a relação entre os benefícios e desvantagens se equilibra. À medida que a porcentagem de carbonetos aumenta, há um incremento proporcional na dureza do material. No entanto, além desse ponto crítico, a adição excessiva de carbonetos pode resultar em efeitos adversos, como a redução da tenacidade e o surgimento de trincas. Portanto, é de extrema importância encontrar um equilíbrio adequado na adição de materiais cerâmicos a fim de garantir propriedades mecânicas ideais no revestimento. Essa otimização é fundamental para alcançar o desempenho desejado e a durabilidade do material.

Com base nos resultados da análise de microdureza, é possível observar uma região no gráfico da Figura 06 onde ocorre um aumento consistente e uniforme na dureza do material, indicando uma resposta previsível às variações nas condições de teste. O gráfico apresenta a relação entre a distância da superfície e a microdureza, destacando claramente as diferentes regiões, como o substrato, a zona termicamente afetada e o revestimento, por meio de uma linha tracejada em vermelho. Essa visualização auxilia na compreensão da distribuição da dureza ao longo do material e

permite uma análise mais precisa das características mecânicas em diferentes profundidades.

Figura 06 – Perfil de microdureza das amostras A, B e C



Fonte: do autor (2023)

Através do gráfico é possível visualizar que a maior adição de carbonetos acarreta a maior dureza do material, no entanto, quando há uma maior presença de materiais cerâmicos, as propriedades mecânicas vindas do metal perdem-se, trazendo um material frágil e com propensão a trincas [PINTO, 2004]

As amostras com adição de 20 e 30% de WC apresentaram uma dureza similar na medição mais aproximada da superfície, isso deve ao fato de os carbonetos apresentarem uma maior densidade em relação a matriz metálica, portanto quanto maior a porcentagem de carbonetos, maior será a precipitação do material mais denso durante o processo de fusão [Li et al., (2019)].

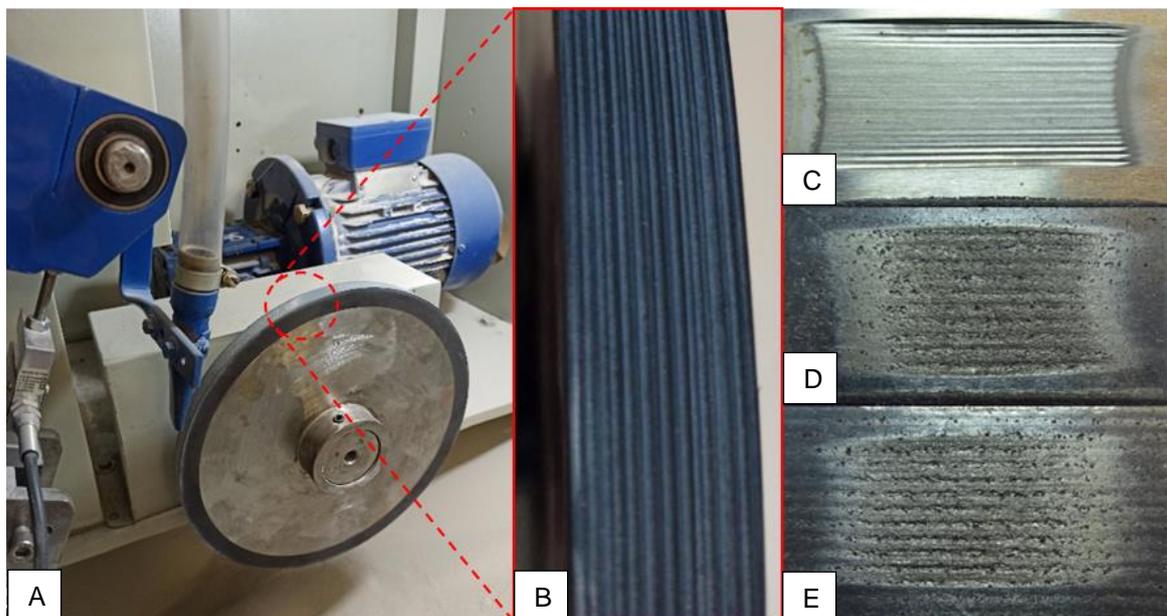
4.2 DESGASTE EROSIVO ABRASIVO

O maior problema observado nos rotores é o desgaste gerado pelo bombeamento do material com alta presença de materiais de alta dureza, o que gera um extremo desgaste abrasivo e erosivo. Para simular isso, foi realizado o ensaio de abrasão roda de borracha.

Por conta da alta dureza das amostras e do trajeto de deposição, a borracha utilizada sofria um desgaste acentuado pelos cordões depositados, conforme se mostra na Figura 07. Isso fez necessário o processo de retificação e vulcanização da borracha do tribometro quando ensaiadas as amostras utilizadas no trabalho.

Na amostra “A”, que não teve adição de carbonetos, o desgaste da roda não foi notável comparado às amostras com adição de 20 e 30% de WC. Isso porque o ensaio desgastava mais rapidamente o metal base FeCrNiMo e deixava somente os carbonetos à mostra, isso fez com que o acúmulo de material realizasse um sulco na borracha, acumulando a borracha na própria amostra. É possível visualizar o desgaste gerado na borracha na Figura 07.

Figura 07 – A) Roda de borracha desgastada, decorrente ao método de deposição – B) Zoom da superfície da roda, evidenciando os vincos gerados – C, B e D superfícies das amostras ensaiadas C) Amostra 0% WC – D) Amostra 20% WC – E) Amostra 30% WC.



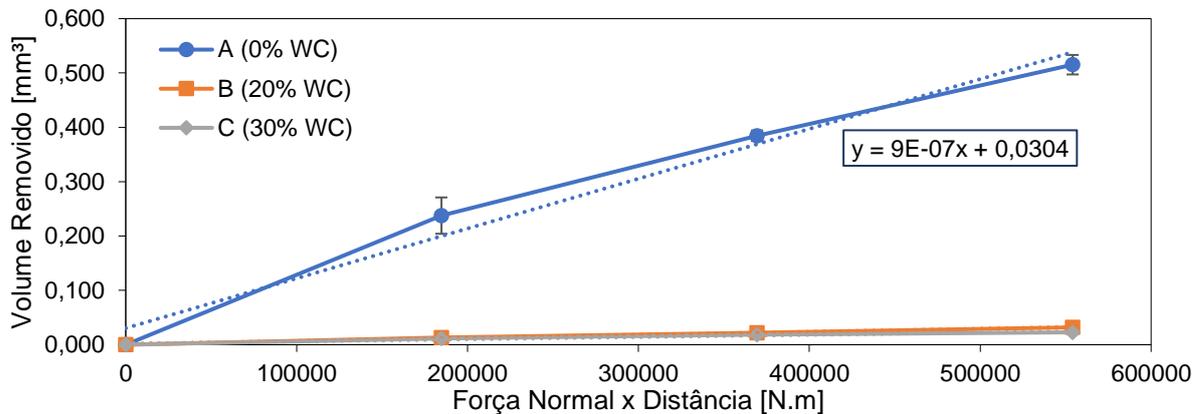
Fonte: do autor (2023)

Este problema pode ser explicado por conta da trajetória de deposição. As duas camadas depositadas foram feitas utilizando o mesmo caminho, ambos os cordões foram realizados um sobre o outro. Isso gerou um acúmulo de material em certas partes e deixando somente os 30% de sobreposição para cobrir essa falha.

Em decorrência deste fator, a borracha juntamente com o abrasivo possibilitou uma maior retirada do material, gerando um desgaste ainda maior por conta do trajeto de deposição.

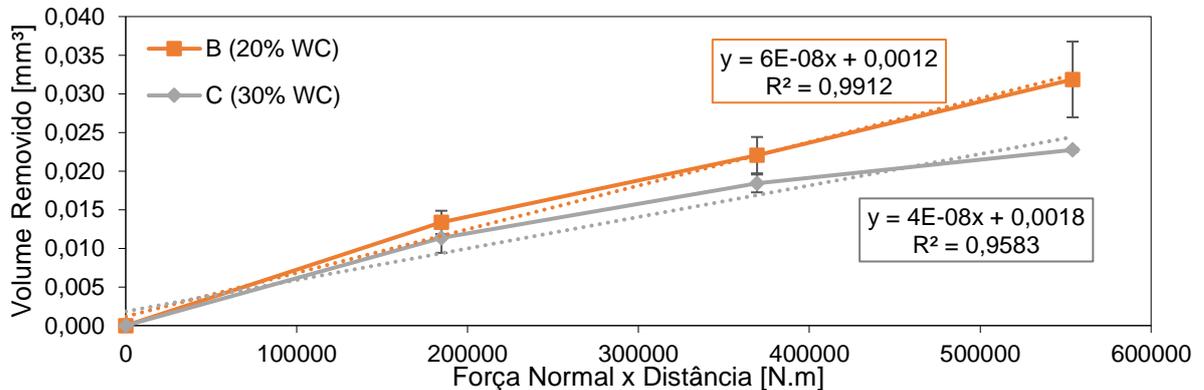
Com os dados adquiridos nesse ensaio, foi possível gerar dados e informações que validaram a utilização dos parâmetros ensaiados, conforme os gráficos da Fig. 08 e 09.

Figura 08 – Gráfico do volume removido no ensaio abrasivo roda de borracha das amostras A, B e C



Fonte: do autor (2023).

Figura 09 – Gráfico do volume removido no ensaio abrasivo roda de borracha das amostras B e C.



Fonte: do autor (2023).

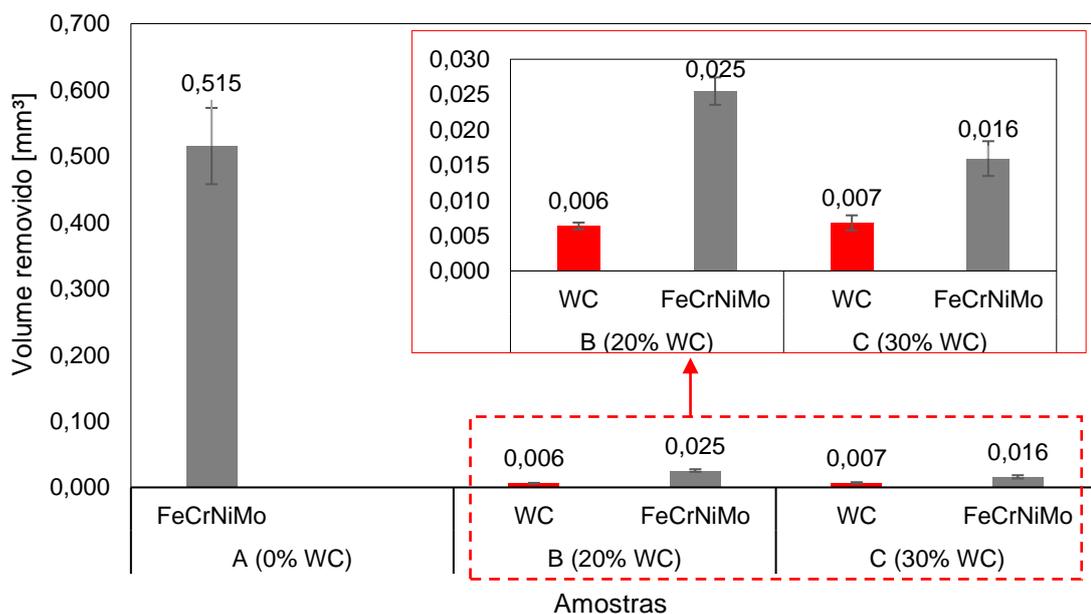
Os gráficos das Fig. 08 e 09 relacionam o tempo de ensaio conforme o coeficiente de desgaste, quanto maior o coeficiente, maior será o desgaste da amostra. O segundo gráfico é uma cópia do primeiro para melhor visualização das amostras B e C, pois o desgaste na amostra sem carbonetos é tão acentuado que os desgastes gerados nas amostras B e C não foram possíveis serem visualizados com muita clareza.

A amostra B se manteve com uma certa linearidade, trazendo uma correlação de R^2 de 0,99. Isso deve-se ao fato da amostra com 20% de carbonetos não possuir um nível alto de precipitação, ao contrário da amostra com 30%, que obteve uma correlação de R^2 de 0,95, pois a saturação de carbonetos em uma matriz metálica de menor densidade leva a precipitação do meio mais denso, que neste caso são as partículas de WC. Portanto a amostra de 30% terá uma maior resistência a abrasão na camada mais interna do revestimento, pois é onde está a grande maioria dos carbonetos.

Ao final do ensaio, esse fator é visualizado de uma melhor forma, pois o desgaste gerado na amostra de maiores carbonetos é menor, isso é gerado pela profundidade penetrada pela roda de borracha, uma vez que a roda já atingiu a camada mais profunda do revestimento, onde a presença de carbonetos é maior por conta da precipitação [LI et al., (2019)].

Foi nítido que a presença de carbonetos diminuiu drasticamente o desgaste. Analisando apenas as amostras de 20 e 30%, obtemos que a amostra de 20% teve um maior desgaste. Porém se for considerado as densidades e porcentagens dos materiais das ligas, observa-se que a amostra de 30% de carbonetos sofreu uma maior perda de carbonetos em relação a de 20%, conforme a Fig. 10.

Figura 10 – Volume perdido de cada uma das amostras, dividido por elemento WC e FeCrNiMo



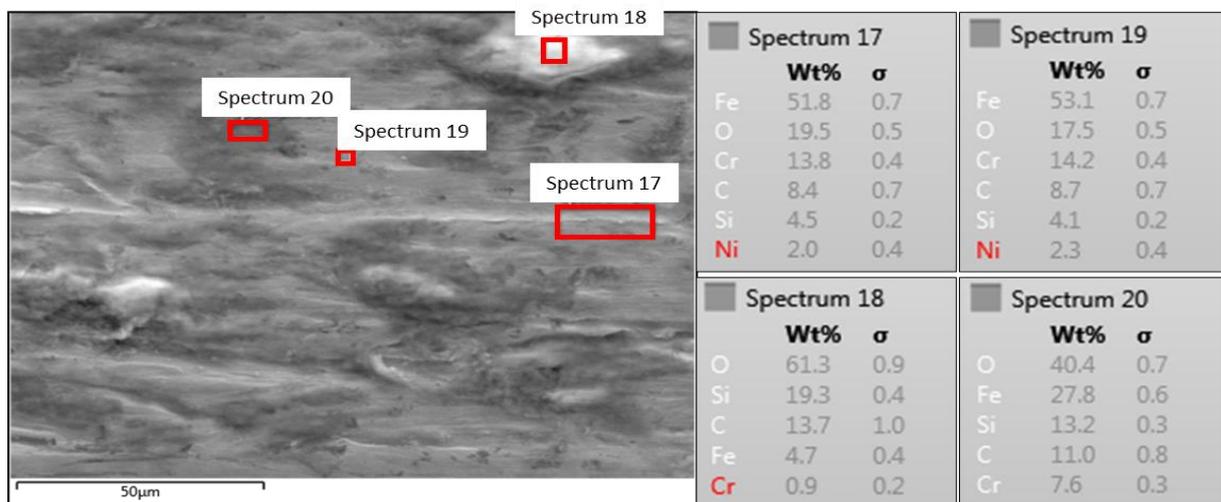
Fonte: do autor (2023).

O gráfico da Fig. 10 relaciona o volume removido em relação a cada elemento até o final do ensaio, ou seja, a amostra de 30% teve um menor desgaste que totalizou 0,023 mm³ e em comparação com a amostra de 20% que sofreu 0,031 mm³ de perda de material. No entanto, a amostra de 30% de WC sofreu uma maior perda de carbonetos, por conta da alta saturação de carbonetos.

4.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O emprego da microscopia eletrônica de varredura (MEV) em conjunto com a espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foi realizado com o propósito de investigar a resistência ao desgaste e a dureza do material. Por meio da Fig. 11, é possível realizar uma análise dos elementos presentes em um ponto específico da amostra A, fornecendo informações detalhadas sobre a composição química e auxiliando na compreensão das propriedades do material.

Figura 11 – Espectroscopia de raios X da amostra de FeCrNiMo sem adição de carbonetos.



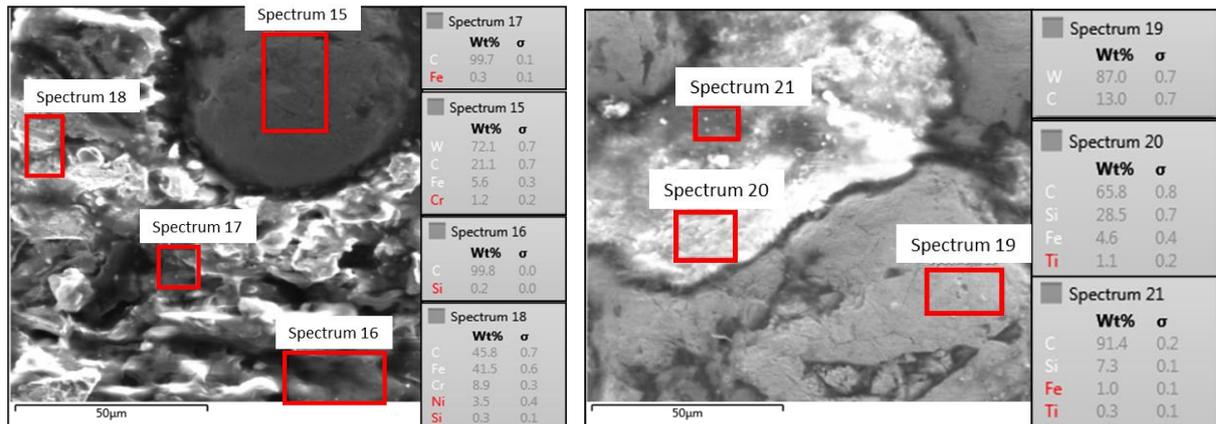
Fonte: do autor (2023).

O ponto 17 destacado na Fig. 11 há a presença da liga FeCrNiMo, mas também 17% em oxigênio, pois houve formação de óxidos na superfície do material. A presença de óxidos na superfície eleva a dureza do material, fazendo com que ele tenha uma maior resistência ao desgaste abrasivo. No entanto, o material sem a adição de carbonetos apresentou elevados desgastes, tornando inviável a utilização nos rotores.

Em todas as análises de EDS foram encontradas uma porcentagem de silício, esse fator deve-se pela contaminação gerada no ensaio abrasivo, onde o silício

presente na areia penetra nas porosidades do material e acaba fazendo uma ligação que dificulta a remoção desta partícula. Por conta deste fator, as amostras podem ter absorvido uma porcentagem da areia, gerando uma variação nas pesagens geradas durante o ensaio de desgaste abrasivo.

Figura 12 – Espectroscopia de raios X das amostras com 20 e 30% de adição WC.



Fonte: do autor (2023).

Nas análises das amostras com 20 e 30% de adição de carbonetos, conforme a Fig. 12, foi possível observar a presença de titânio, porém é um erro de medição já que o elemento Cr pode ser confundido com Ti, pois os espectros são semelhantes em determinadas energias.

A amostra com 30% de adição mostra-se com uma maior presença de silício, já que a porosidade e as inclusões eram de maior presença neste revestimento, fazendo com que a areia ficasse presa nestes micros reservatórios. Isso pode ser analisado como um ganho de massa, pois a areia acumulada nos corpos de prova também foram levadas em consideração.

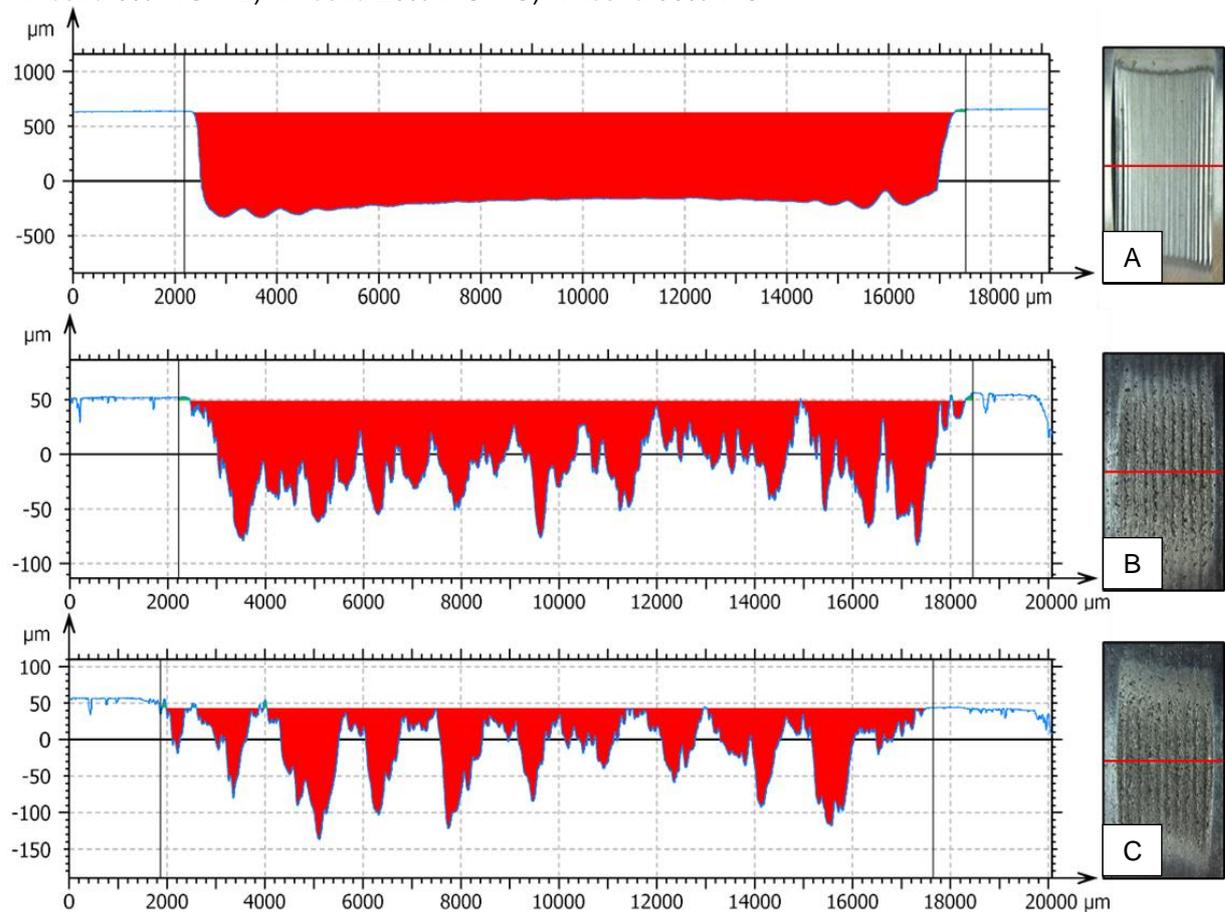
4.4 PERFILOMETRIA

Um dos métodos utilizados para quantificar a perda de volume em amostras consiste na medição do peso durante os ensaios. No entanto, revestimentos com densidades diferentes podem apresentar volumes maiores e massas menores durante os testes. Para validar esse fator, emprega-se a perfilometria, que permite a coleta do perfil desgastado de cada amostra, calculando-se a perda em termos percentuais de mm^2 , para posterior comparação com os resultados obtidos pela pesagem.

Os dados obtidos por meio da perfilometria das amostras submetidas ao ensaio no tribômetro de roda de borracha podem ser observados na Figura 13. É possível notar a presença de picos nas amostras contendo 20% e 30% de carboneto de tungstênio (WC), indicando que em áreas onde não houve remoção de material, houve sobreposição dos cordões depositados e acúmulo maior da liga depositada.

Esses resultados evidenciam a influência da densidade do revestimento na forma como o desgaste ocorre e na distribuição do material desgastado. A utilização da perfilometria como complemento à pesagem permite uma análise mais abrangente da perda de volume e auxilia na compreensão dos mecanismos de desgaste presentes nos revestimentos contendo carboneto de tungstênio.

Figura 13 – Gráficos da perfilometria da área retirada das amostras através do ensaio abrasivo – A) Amostra 0% WC – B) Amostra 20% WC – C) Amostra 30% WC



Fonte: do autor (2023)

Na Fig. 13 é possível visualizar perfilometria sobre os desgastes das amostras. Em todas as amostras houve picos de desgastes acentuados, porém isso não é tão visual na amostra A por conta do tipo de gráfico, já que a amostra A obteve

um maior desgaste e a escala está muito maior. Nas amostras B e C temos um menor desgaste e um sinal mais heterogêneo, os picos de maior desgaste são localizados precocemente, pois são as áreas onde apenas ocorreu deposição por meio da sobreposição e não através do foco total do laser, ou seja, foi depositado 2 camadas, porém no mesmo lugar, isso fez com que houvesse uma área com pouco preenchimento.

Buscando realizar uma prova real dos resultados obtidos por meio da pesagem das amostras durante o ensaio abrasivo, a partir da área visualizada com o software do perfilometro, foi calculada a perda de massa quando comparada à área removida e em massa perdida, conforme a Tabela 04.

Os valores obtidos a partir da análise dos gráficos gerados no perfilometro, apresentaram com grande similaridade aos gerados através das pesagens das amostras. Isso mostra que apesar da diferença de densidade do revestimento de cada uma das amostras, por conta da maior saturação de carbonetos, o desgaste se mantém dentro dos vistos através da balança.

Tabela 04 – Comparação dos resultados de perfilometria e pesagem

Amostra	Profundidade máxima (mm)	Área retirada (mm ²)	Desgaste perfilometria (mm ²)	Massa retirada (g)	Desgaste pesagem (g)
A (0% WC)	0,978	12312,3	86%	1,82	83%
B (20% WC)	0,134	1016,7	7%	0,2	9%
C (30% WC)	0,183	925,3	6%	0,17	8%

Fonte: do autor (2023)

Na Tabela 04, os dados de profundidade máxima, área retirada e desgaste perfilometria foram obtidos através do ensaio de perfilometria, já a massa retirada e desgaste de pesagem foram obtidos através do ensaio de desgaste abrasivo. O intuito da tabela é comparar as informações coletadas de desgaste na pesagem e na perfilometria. Isso serve para demonstrar se o volume retirado procede com base na massa retirada, pois as ligas possuem diferentes densidades, ou seja, um material pode sofrer mais perda de massa, porém perder menos volume, por conta da maior densidade.

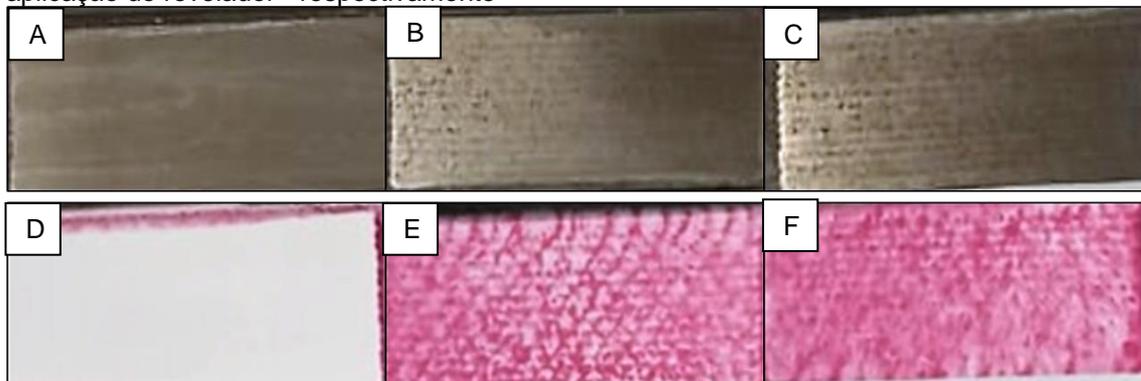
O material em que houve maior variação nas comparações foi a amostra sem adição de carbonetos, pois a comparação foi feita considerando todas as

amostras em conjunto, e a amostra A é a única que não contém o material de maior densidade.

4.5 POROSIDADE E TRINCAS

A presença de porosidade e trincas afeta significativamente a durabilidade do revestimento no substrato. Essas falhas estruturais servem como caminhos preferenciais para o desgaste mais agressivo causado por meios erosivos e corrosivos. Como o desgaste é principalmente causado por líquidos, essas áreas com vazios na superfície revestida são mais suscetíveis a serem afetadas. A detecção desses defeitos é realizada por meio de ensaios de líquido penetrante, como ilustrado na Figura 14. Essa análise permite identificar e avaliar a extensão das trincas e porosidades presentes no revestimento, fornecendo informações cruciais para a melhoria da qualidade e desempenho do revestimento utilizado em aplicações sujeitas a ambientes agressivos.

Figura 14 – Ensaio líquido penetrante realizado nas superfícies das amostras – A) B) C) Amostras com 0, 20 e 30% de WC antes da aplicação do revelador – D) E) F) Amostras após 15 minutos da aplicação do revelador - respectivamente

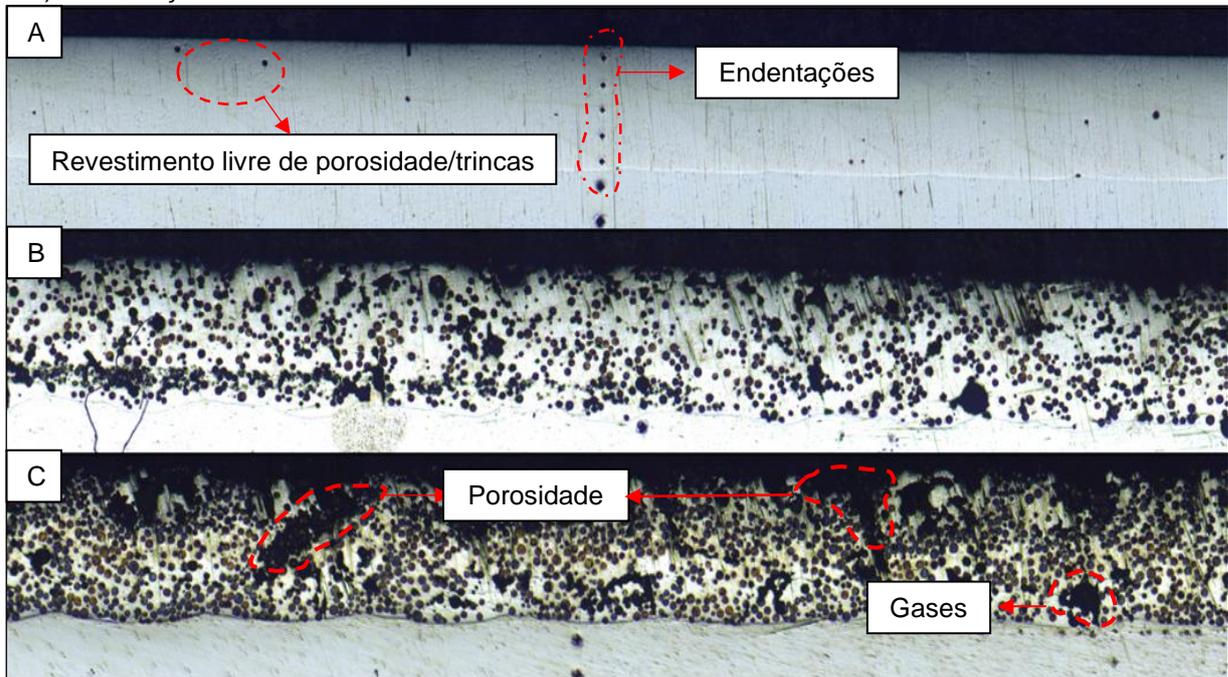


Fonte: do autor (2023)

A amostra A, caracterizada pela ausência de carbonetos, apresenta um revestimento notavelmente homogêneo devido a uma fundição mais precisa e uma separação mais eficiente durante a solidificação. Por outro lado, nas amostras B e C, onde carbonetos foram adicionados, é possível observar uma quantidade considerável de trincas e porosidade, evidenciados de forma mais nítida na microscopia da seção transversal conforme representado na Figura 15. Isso ocorre

devido à interferência dos carbonetos, que comprometem a coalescência das fases e contribuem para a formação de defeitos estruturais.

Figura 15 – Microscopia ótica da secção das amostras – A) 0 % de adição WC – B) 20 % adição WC – C) 30 % adição WC.



Fonte: do autor (2023).

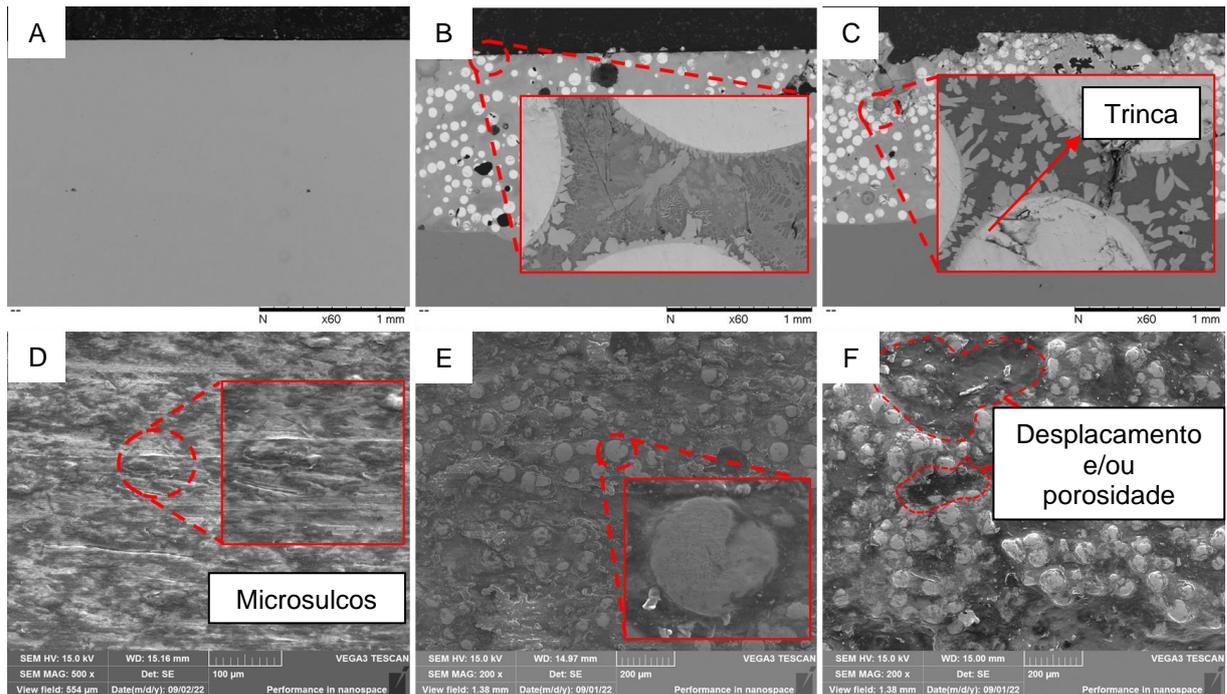
Durante o processo de solidificação nas amostras B e C, houve a ocorrência de aprisionamento de gases, resultando em uma elevada taxa de porosidade. Esse fenômeno é atribuído à adição de carbonetos, uma vez que a presença de partículas cerâmicas dificulta a solubilidade do oxigênio no meio fundido, gerando espaços não preenchidos no material [BIDRON, 2019].

Essas regiões não preenchidas constituem áreas vulneráveis à corrosão, permitindo a penetração de líquidos corrosivos no substrato. Além disso, a presença de trincas e porosidade nas amostras B e C compromete a integridade estrutural do revestimento, reduzindo sua resistência mecânica e aumentando a susceptibilidade a falhas prematuras. Esses defeitos podem servir como pontos de concentração de tensões, levando a uma maior propensão ao desprendimento do revestimento e à deterioração do substrato subjacente [BORGES, 1998].

As inclusões de poros e os efeitos resultantes são amplificados pela oscilação de temperatura durante o processo de deposição e resfriamento, influenciada pela presença dos compostos cerâmicos na matriz metálica. A oscilação

de temperatura e o intervalo de tempo entre as trocas desempenham um papel significativo na deposição a laser [BIDRON, 2019]. A Figura 16 ilustra outros efeitos decorrentes da variação de temperatura dos materiais.

Figura 16 – Microscopia eletrônica de varredura das amostras. A) B) C) Seção transversal das amostras A, B e C respectivamente. D) E) F) superfície das amostras A, B e C respectivamente, após o ensaio de desgaste abrasivo.



Fonte: do autor (2023).

Como já visto anteriormente na microscopia ótica e na figura (15), o revestimento com 0% de adição de carbonetos obteve um revestimento mais homogêneo, livre de porosidade e trincas, no entanto é possível visualizar microsulcos gerados na superfície do revestimento na Fig 16, mostrando uma propensão maior desgaste.

Já na amostra com 20% de adição de WC, obteve-se um revestimento com uma boa homogeneidade e distribuição de carbonetos, porém com algumas pequenas inclusões geradas pelo aprisionamento de gases. A amostra com 30% de WC apresentou um revestimento com grandes inclusões, uma distribuição heterogênea de carbonetos, gerando uma matriz frágil, podendo ocorrer deslocamentos por conta da baixa ancoragem metálica.

Em relação ao resfriamento após a deposição, houve formação de dendritas nas amostras com adição de carbonetos, pois os carbonetos atuaram como

uma barreira de menor temperatura no momento do resfriamento, com um certo gradiente de temperatura, isso ocorreu por conta da alta absorção de calor do metal em relação ao material cerâmico, similar ao processo que acontece nos moldes de fundição, onde as dendritas são formadas a partir da camada do molde, portanto a parte superficial dos materiais fundidos tendem a ter uma maior fragilidade.

Essa fragilidade também é observada no processo de deposição a laser. Na amostra com 20% de WC, as dendritas são mais homogêneas e com pouco espaçamento, o que garante uma maior resistência mecânica, diferente do encontrado na amostra com 30%, que maior espaçamento entre as dendritas, gerando uma maior propensão a trincas e deslocamentos do material por conta da fragilidade. É possível observar a formação de uma trinca na seção transversal da amostra C, indicando uma maior fragilidade desta liga revestida.

5. CONCLUSÃO

- A adição de carbonetos em uma matriz metálica eleva os níveis de dureza e resistência abrasiva, porém também aumenta a fragilidade do revestimento, formação de porosidade e trincas.
- A adição de 30% de WC aumento a dureza em relação a amostra de 20% de adição, porém essa característica não se sobressai em relação a resistência abrasiva. Isso por conta da alta porosidade e falta de liga metálica encontrada na amostra de maior adição de WC, fazendo os carbonetos desprenderem da matriz.
- A amostra com 20% de adição obteve uma taxa de resfriamento mais homogênea, o que impossibilitou dendritas de menor espaçamento e comprimento, trazendo uma maior resistência mecânica para a liga.
- A estratégia de deposição de uma segunda camada de revestimento pode diminuir significativamente o desgaste localizado por abrasão, fazendo com que o revestimento não possua espaços não preenchidos.
- A liga com 20% de adição de carbonetos, através dos ensaios realizados, obteve as melhores características para aplicações nos rotores, pois não houve grandes formações de trincas e porosidades, comparando com a amostra com 30% de adição.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, em especial a minha mãe Janete de Souza, a minha namorada Mariane Pavei Macan, à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação (FAPESC) ao projeto FAPESC N° 2019TR1058 que financiou esta pesquisa, a universidade UniSatc e UFSC, ao Laboratório De Mecânica De Precisão (LMP) e professor Dr. Milton Pereira, ao professor Dr. Elvys Isaias Mercado Curi e meu amigo Vitor Gustavo Alves. Agradeço também ao meu orientador Dr. Richard de Medeiros Castro e co-orientador Mr. Renato Camponogara Panziera.

REFERÊNCIAS

ABNT. (2015). NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento. 2015.

ASTM International. (2019). ASTM G65-19: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus (2019th ed.). West Conshohocken, PA: ASTM International.

BARTKOWSKI, Dariusz; BARTKOWSKA, Aneta; JURČI, Peter. Laser cladding process of Fe/WC metal matrix composite coatings on low carbon steel using Yb: YAG disk laser. *Optics & Laser Technology*, v. 136, p. 106784, 2021.

BAUER, Kevin et al. Análise de desempenho de superfícies revestidas com Cr₃C₂-25NiCr, WC-10Ni e WC-10Co₄Cr depositados por aspersão térmica - HVOF aplicadas em rotores de bombas de polpa. Brasil: Santa Catarina, 2021.

BORGES, Paulo César et al. Resistência à corrosão de aços sinterizados e sinterizados tratados por plasma. 1998.

Bidron, Guillaume & Doghri, Anis & Malot, Thierry & Fournier-dit-Chabert, Florent & Thomas, Maranda & Peyre, Patrice. (2019). Reduction of the hot cracking sensitivity of CM-247LC superalloy processed by laser cladding using induction preheating. *Journal of Materials Processing Technology*. 277. 116461. 10.1016/j.jmatprotec.2019.116461.

BHUSHAN, Bharat; KO, Pak Lim. Introduction to tribology. *Appl. Mech. Rev.*, v. 56, n. 1, p. B6-B7, 2003.

COSTA, Lauro Santos Norbert; SCHNEIDER, Claudio Luiz. O aproveitamento integral dos rejeitos do beneficiamento de carvão mineral do sul do Brasil. 2013.

FARACO, Morgana Nuernberg Sartor et al. Valorização de frações residuais geradas no beneficiamento de carvão mineral da região sul de Santa Catarina. 2022.



- FEIL, Norton Ferreira; NETO, Francisco José Kliemann. Produção conjunta no processo de beneficiamento de carvão mineral: custos conjuntos. Produto & Produção, v. 9, n. 2, 2008.
- FIGUEREDO, Erike Wilker Arruda. Avaliação dos parâmetros de deposição por laser e caracterização microestrutural de revestimentos de aços inoxidáveis em substrato metálico. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.
- Höganäs. Rokit® 401 - Sustainable solution to replace hard chrome plating: Edição 06/2018.
- HOLMBERG, Kenneth et al. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. Tribology International, v. 115, p. 116-139, 2017.
- HUMMES, Rodrigo André et al. Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de rejeitos de beneficiamento de carvão mineral em equipamentos de grandes dimensões. 2007.
- HUTCHINGS, I.M. Tribology - friction and wear of engineering materials. London: Edward Arnold Publishers Ltd., 1992.
- LI, Xiaofeng & Feng, Yinghao & Liu, Bin & Yio, Denghao & Yang, Xiaohui & Zhang, Weidong & Gang, Chen & Liu, Yong & Bai, Peikang. (2019). Influence of NbC particles on microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding. Journal of Alloys and Compounds. 788. 10.1016/j.jallcom.2019.02.223.
- LIMA, Maria José Santos. Síntese e caracterização de TaC e óxido misto de tântalo e cobre nanoestruturados a partir do precursor oxálico de tântalo através de reações gás-sólido e sólido-sólido a baixa temperatura. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- LO, K. H.; CHENG, F. T.; MAN, Hau Chung. Laser transformation hardening of AISI 440C martensitic stainless steel for higher cavitation erosion resistance. Surface and Coatings Technology, v. 173, n. 1, p. 96-104, 2003.
- LUZ, Éddie Magnus. Comportamento tribológico do revestimento FeCrNiMo fabricado por laser metal deposition sob deslizamento lubrificado com óleos hidráulicos biodegradáveis. Faculdade SATC. 2020
- MODIANO, Eduardo Marco; TOURINHO, Octavio AF. A economia do carvão mineral. IPEA, Instituto de Planejamento Econômico y Social, 1982.
- PANZIERA, Renato Camponagara. Parametrization effect in relation to microhardness, microstructure and geometry of rokit 401 alloy deposited via directed energy deposition. International congresso of mechanical engineering (COBEM). 2021.



PINTO, Maria Aparecida. Deposição de revestimentos compósitos metal-cerâmico WC-Co por fusão a laser: avaliação da resistência ao desgaste e a corrosão. 2004.

QUINTERO, Wilder Gutiérrez; SANABRIA, Maria del Pilar Torres; FLÓREZ, John Jairo Olaya. Construcción de un equipo para desgaste abrasivo según norma ASTM G-65. 2015.

RONCONI, José Roberto; SCHNEIDER, Ivo André Homrich. Benefícios ambientais relacionados ao uso de espirais com três produtos no beneficiamento de carvão mineral—um estudo de caso em santa catarina. Simpósio internacional de qualidade ambiental, 2014.

SAEEDI, Rasool et al. Optimization and characterization of laser cladding of NiCr and NiCr–TiC composite coatings on AISI 420 stainless steel. *Ceramics International*, v. 47, n. 3, p. 4097-4110, 2021.

SILVA, Vera Dimar. Bombas centrífugas de polpa. Curso de especialização em engenharia de recursos minerais – CEERMIN. 2011.

Yu, Tianbiao & Yang, Lin & Zhao, Yu & Sun, Jiayu & Li, Baichun. (2018). Experimental research and multi-response multi-parameter optimization of laser cladding Fe313. *Optics & Laser Technology*. 108. 321-332. 10.1016/j.optlastec.2018.06.030.

ZACCARON, Alexandre et al. Estudo da utilização do resíduo proveniente do beneficiamento do carvão mineral como matéria-prima alternativa na fabricação de blocos de vedação. *Revista Cerâmica Industrial*, v. 20, n. 2, p. 0, 2015.