

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

SOLMAR IURK DAS CHAGAS

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM DE REVESTIMENTOS
ASPERGIDOS POR CHAMA DE ALTA VELOCIDADE**

PONTA GROSSA

2022

SOLMAR IURK DAS CHAGAS

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM DE REVESTIMENTOS
ASPERGIDOS POR CHAMA DE ALTA VELOCIDADE**

Evaluation of the Machining Process of High Speed Flame Sprayed Coatings

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz

Coorientador: Prof. Me. Péricles Secco Cacian

PONTA GROSSA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS POR CHAMA DE ALTA VELOCIDADE

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 01 de julho de 2022

Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz

Doutorado

Universida Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa

Roger Navarro Verastegui

Doutorado

Universida Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa

Hipólito Domingo Carvajal Fals Doutorado

Universida Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa

PONTA GROSSA

2022

Dedico este trabalho a Isabela, por me acompanhar, apoiar e incentivar em todos os momentos, a minha família por ter me incentivado ao estudo e aos Professores Anderson e Péricles pela oportunidade deste trabalho e pela ajuda na realização do mesmo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que estão ao meu lado e me apoiaram durante algum momento desta vitória na vida, principalmente a instituição Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa pela disponibilidade e a oportunidade de cursar o curso de Engenharia Mecânica, ao orientador Prof. Dr. Anderson G.M. Pukasiewicz e ao coorientador Prof. Me. Péricles S. Cacian pela paciência, dedicação e oportunidade de realizar este trabalho e por todo o conhecimento que me foi dado durante todo o processo junto.

Agradeço ao Projeto ROTA 2030, com participação das entidades da FUNDEP, UTFPR e UEPG pela oportunidade de estudo e pela realização das análises experimentais que foram possíveis realizadas neste trabalho.

Agradeço também aos colegas de turma e a todos que estudei e conheci na faculdade, que fazem parte desta formação juntamente comigo, aos amigos que estão ao meu lado, a minha família pelo sustento, paciência e incentivo até agora e pela Isabela Schmidt por estar juntamente comigo, pelo apoio, incentivo, ajuda, decisões e por poder contar para qualquer coisa.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a morfologia e a microdureza do revestimento aspergido por chama de alta velocidade (HVOF) de $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{25NiCr}$ após a usinagem do revestimento. Para analisar este processo, foi realizado diferentes processos de usinagem em uma amostra revestida, e realizado ensaios de microdureza, MEV e perfilometria, antes e depois da usinagem para comparação. Nas usinagem em que a ferramenta contém um raio de ponta menores do que 1mm, houve um deslocamento do revestimento, em uma das amostras se verifica que o deslocamento acontece a partir de uma profundidade de corte, ocorrendo devido ao aumento da interação da ferramenta com o revestimento, recomendando que na usinagem a profundidade de corte seja a menor possível. Nas outras amostras, foi analisado que as lamelas arrancadas no processo de usinagem geram grandes vales (R_v) comparados com os picos (R_p), acontecendo que os maiores picos são causados devido a aderência das lamelas arrancas no processo de usinagem, devido a isto há uma grande diferença da rugosidade superficial, sendo que a rugosidade média (R_a) não segue um padrão, variando de acordo com cada processo de usinagem. Além disso os resultados da usinagem da ferramenta revestida foram os melhores. Nos resultados de microdureza, foi obtido valores menores após a usinagem, podendo ter ocorrido devido a microtrincas causadas durante o processo.

Palavras-chave: Revestimento. HVOF. Usinagem.

ABSTRACT

The main objective of this work is to analyze the morphology and microhardness of the high-speed flame sprayed (HVOF) coating of $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{25NiCr}$ after machining the coating. To analyze this process, different machining processes were performed on a coated sample, and microhardness, SEM and profilometry tests were performed before and after machining for comparison. In machining in which the tool has a nose radius smaller than 1 mm, there was a detachment of the coating, in one of the samples it is verified that the detachment happens from a depth of cut, occurring due to the increase of the interaction of the tool with the coating, recommending that the cutting depth be as small as possible when machining. In the other samples, it was analyzed that the lamellae ripped off in the machining process generate large valleys (R_v) compared to the peaks (R_p), happening that the largest peaks are caused due to the adhesion of the lamellae ripped off in the machining process, due to this there is a large difference in surface roughness, and the average roughness (R_a) does not follow a pattern, varying according to each machining process. In addition, the machining results of the coated tool were the best. In the microhardness results, lower values were obtained after machining, which may have occurred due to microcracks caused during the process.

Keywords: Coating. HVOF. Machining. Templates.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Imagens do processo de aspersão térmica por chama de alta velocidade a) Figura esquemática b) Figura real do processo	17
Figura 2- Imagem da ferramenta de corte utilizada no processo de torneamento; a) Imagem ilustrativa de suas partes constituintes; b) Imagem real	20
Figura 3 – Exemplo de algumas operações de retificação (um dos processos de usinagem por abrasão com a utilização de rebolo)	21
Figura 4– Franja emitida na superfície de uma amostra para análise superficial.....	24
Figura 5 – Imagem ilustrativa de um perfil de rugosidade e como os dados são obtidos de forma gráfica.	26
Figura 6 - Imagem ilustrativa da produção e detecção dos feixes de elétrons	27
Figura 7– Imagens retiradas pelo MEV e por microscopia eletrônica de transmissão (TEM)	27
Figura 8– Organograma da metodologia utilizada neste trabalho, utilizando o software XMind (Versão 8, Update 8, software gratuito)	28
Figura 9 – Imagem obtida por MEV do Cr ₃ C ₂ 25NiCr Woka 7200 a) Morfologia b) Microestrutura	29
Figura 10 – Imagens ilustrativas das ferramentas utilizadas a) Ball Nose b) Fresa de Faceamento c) Fresa de Topo d) Ferramenta Toroidal.....	32
Figura 11 - Imagem obtida pelo MEV com aumento de a) 100 vezes b) 200 vezes c) 500 vezes.....	35
Figura 12 – Imagens transversais do revestimento aspergido a) maior espessura do revestimento encontrado b) menor espessura do revestimento encontrado c) estrutura do revestimento.....	37
Figura 13 – Análise das superfícies após processo de usinagem a) Fresa de Faceamento Positivo; b) Fresa de Faceamento Negativo, começando pelo revestimento até o substrato (descendo) no lado inferior e começando pelo substrato até o revestimento (subindo) no lado superior; c) Fresa de Topo, sendo representado pelas flechas o sentido de usinagem.	38
Figura 14 – Análise Topográfica do revestimento usinado por Ball Nose, no sentido subindo, concordante a) Imagem 3D b) Imagem 2D c) Gráfico do perfil topográfico.	43
Figura 15 – Topográfica Superficial 2D do processo de usinagem com ferramenta Ball Nose na região a)Substrato b)Revestimento.....	45
Figura 16 - Área de entrada da ferramenta no processo de usinagem com a ferramenta Ball Nose.....	46
Figura 17 – Área do revestimento usinado com a ferramenta Ball Nose no sentido Concordante com um aumento de a)100vezes b)200 vezes c)300 vezes.	47
Figura 18 – Áreas do revestimento usinado com a ferramenta Ball Nose no sentido Zig Zag a) 500 vezes b) 2000 vezes c) Transição entre revestimento e substrato usinados.....	49
Figura 19 – Resultados de Microdureza em Vickers de acordo com cada etapa dos processos com seu desvio padrão.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do revestimento $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{25NiCr}$	19
Tabela 2- Composição química do $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{25NiCr}$ Woka 7200.....	30
Tabela 3 – Parâmetros do processo de aspersão HVOF.....	30
Tabela 4 - Tipos de processos realizados.....	31
Tabela 5 - Tabela com dados superficiais das amostras usinadas no sentido da usinagem a) dados do revestimento próximo ao topo da aspersão b) dados do revestimento próximo ao substrato c) dados do substrato.....	40
Tabela 6 - Tabela com dados superficiais das amostras usinadas no sentido perpendicular a usinagem a) dados do revestimento próximo ao topo da aspersão b) dados do revestimento próximo ao substrato c) dados do substrato.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
GPS	Especificações geométricas do produto
HVOF	Aspersão por chama de alta velocidade
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NADCA	North American Die Casting Association
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

AlN	Nitreto de alumínio
B	Boro
C	Carbono
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
cm	Centímetros
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cr ₃ C ₂ 25NiCr	Carboneto de cromo com 25 por cento de níquel cromo
Cu	Cobre
dm	Decímetro
Fe	Ferro
g	Gramas
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
g/min	Grama por minuto
HB	Dureza Brinell
HRC	Dureza Hockwell C
HV	Dureza Vickers
K	Kelvin
Kg	Quilogramas
l	Litro
l/min	Litro por minuto
in	Polegadas
m	Metros
min	Minutos
mm	Milímetros
mm/s	Milímetro por segundo
mm ²	Milímetro quadrado
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MPa	Mega Pascal
m/min	Metro por minuto
m/s	Metro por segundo
N	Newton
Ni	Níquel
NiCr	Níquel Cromo
NiCrBSi	Níquel Cromo Boro Silício
n°	Número
P	Fósforo

rpm	Rotação por minuto
S	Enxofre
s	Segundos
Si	Silício
TiAlN	Nitreto de alumínio titânio
V	Vanádio
W	Tungstênio
w	Watts
x	Vezes
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
µm	Micrômetro
°	Graus
°C	Graus Celsius
%	Por cento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral.....	16
1.1.2	Objetivo específico.....	16
1.2	Justificativa	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Aspersão por chama de alta velocidade (HVOF)	17
2.1.1	Materiais utilizados na deposição por aspersão térmica de alta velocidade	18
2.1.1.1	Revestimento Cr ₃ C ₂ 25NiCr	19
2.2	Usinagem	19
2.2.1	Geometria definida	19
2.2.2	Geometria não definida	21
2.2.3	Usinagem e acabamento de revestimentos aspergidos	21
2.2.3.1	Desgaste da ferramenta na usinagem e acabamento de revestimentos aspergidos.....	22
2.3	Perfilometria Óptica	23
2.3.1	Análise superficial.....	25
2.4	Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)	26
3	METODOLOGIA	28
3.1	Aspersão térmica	28
3.1.1	Seleção de ligas	28
3.1.1.1	Liga Cr ₃ C ₂ 25NiCr.....	29
3.1.2	Parâmetros	30
3.2	Usinagem	30
3.3	Ensaio de caracterização dos revestimentos e da usinagem	33
3.3.1	Preparação dos corpos de prova.....	33
3.3.2	Ensaio de análise de superfície	34
3.3.2.1	Microscopia eletrônica de varredura.....	34
3.3.2.2	Avaliação da morfologia superficial por perfilometria ótica	34
3.3.2.3	Avaliação mecânica a partir da microdureza	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1	Aspersão térmica	35
4.2	Processos de usinagem	38

4.2.1	Análise da superfície usinada	38
4.2.2	Topografia superficial	40
4.2.3	Análise da superfície usinada pelo método de Microscopia Eletronica de Varredura	46
4.2.4	Microdureza	50
5	CONCLUSÃO	51
6	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS.....	53
	ANEXO A – Publicação no The 12th Tooling Coferencie & Exhibition, Tooling 2022, 25-27 de Abril de 2022, Orebro/Sweden, pag 442 – 449.	56

1 INTRODUÇÃO

A aspensão por chama de alta velocidade (HVOF) é utilizada em várias indústrias, como aeroespacial, naval, automobilística. Sendo utilizado para melhorar sua resistência a erosão, resistência a oxidação, aumento de dureza, entre outros. O processo de aspensão por chama de alta velocidade funciona de maneira que se injeta um material na forma de pó em uma pistola de jateamento, onde ocorre uma combustão dentro de uma câmara, e a chama dessa combustão, quando entra em contato com o pó do material, deixa ele em um estado semi fundido, assim fazendo a deposição do revestimento sobre um substrato, criando a camada de revestimento a partir da solidificação das gotículas depositadas (TAKIMI, 2004).

O processo de aspensão, gera uma elevada rugosidade, devido ao processo não conter um controle dimensional, ocasionada pela aleatoriedade das deposições das gotículas do revestimento sobre o material, o que atrapalha a utilização em alguns casos, como por exemplo para aplicação do revestimento em moldes para métodos de injeção de alumínio, polímeros, etc; no qual se necessita um bom acabamento superficial do produto. A partir disso é necessária uma preparação deste revestimento com uma usinagem superficial, para melhorar acabamento superficial, diminuindo a sua rugosidade superficial até valores desejados (SRINATH et al., 2020; VERDON; KARIMI; MARTIN, 1997).

A usinagem, pode acabar alterando o revestimento aspergido, tornando necessário fazer uma análise para verificar o processo de usinagem em revestimentos por HVOF.

Devido à mudança da microestrutura superficial do revestimento HVOF pela usinagem, não se sabe se o revestimento atinge o seu objetivo, ou seja, se apresenta uma rugosidade desejada para a realização de sua aplicação, logo, neste trabalho, avaliaremos o processo de usinagem sobre a aspensão térmica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Tem-se como objetivo neste trabalho avaliar o processo de usinagem do revestimento $\text{Cr}_3\text{C}_225\text{NiCr}$ depositados por HVOF, avaliando-se a morfologia superficial dos mesmos antes e após a usinagem.

1.1.2 Objetivo específico

Avaliar a morfologia do revestimento $\text{Cr}_3\text{C}_225\text{NiCr}$ aspergidos sobre o aço AISI 1045 após a deposição por aspersão HVOF.

Avaliar a microdureza do revestimento $\text{Cr}_3\text{C}_225\text{NiCr}$ aspergido sobre o aço AISI 1045 antes e após a usinagem.

Comparar o perfil de acabamento e topografia do revestimento $\text{Cr}_3\text{C}_225\text{NiCr}$ aspergido após a realização da usinagem.

1.2 Justificativa

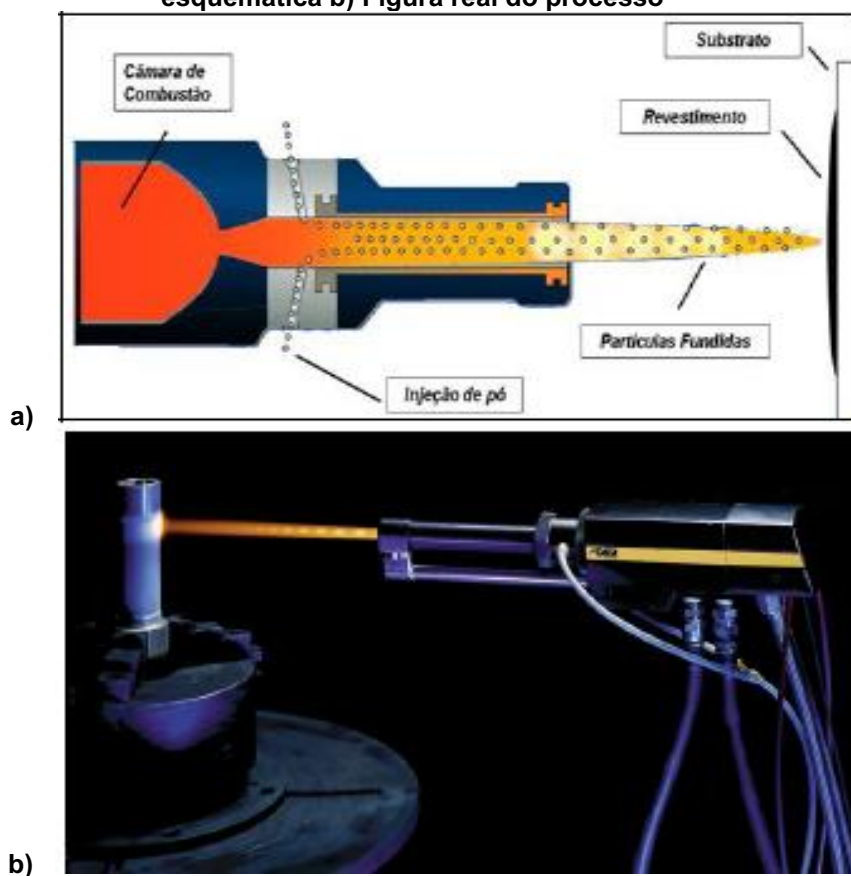
Como o processo de aspersão HVOF promove a formação de uma superfície rugosa, torna-se muitas vezes necessário um processo de acabamento no componente. O processo de usinagem sobre o revestimento aspergido pode ser utilizado para produzir uma boa qualidade superficial, com o intuito de produzir peças com um controle dimensional melhor, aumentando a vida útil de peças produzidas e moldes utilizados em processos fabris.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspersão por chama de alta velocidade (HVOF)

O processo de aspersão térmico é um processo de deposição para revestimentos, onde o material a ser depositado é inserido em uma pistola na forma de pó, vareta ou fio, que é depositado no substrato quando atinge o estado semifundido ou fundido. A fonte de calor pode ser plasma, combustão ou arco elétrico, de tal maneira que as partículas chegam a superfície com alto estado energético, então esfriam formando a camada de revestimento, tendo aplicação em áreas como naval, aeroespacial, petrolífera. Na Figura 1 é mostrado como é o funcionamento ilustrativo (Figura 1a) e o funcionamento real da aspersão (Figura 1b) (TAKIMI, 2004).

Figura 1 – Imagens do processo de aspersão térmica por chama de alta velocidade a) Figura esquemática b) Figura real do processo



Fonte: Obtenção de superligas NiCrALY nanoestruturadas por moagem de alta energia e sua aplicação por aspersão térmica hipersônica (HVOF), Takimi (2004)

Os revestimentos aspergidos termicamente se baseiam em ligações lamelares intercalados com poros, sendo formado pelo impacto, deformação, espalhamento e solidificação das gotículas. Os métodos convencionais, como aspersão por plasma, tem alta descarbonetação durante o processo de revestimento, o que causa diminuição da dureza e da resistência ao desgaste do material (LI; CHRISTOFIDES, 2005; VERDON; KARIMI; MARTIN, 1997).

A descarbonetação é ocasionada devido à reação da fase líquida das partículas durante a projeção do revestimento ao reagir com o oxigênio durante o processo de aspersão, ou seja, durante a saída do bocal da aspersão até a formação da superfície. Com isso no processo HVOF, a descarbonetação é menor devido a altas velocidades de deposição, com parâmetros podendo chegar a uma velocidade de chama de até 2000 m/s, com uma velocidade de partículas entre 400 m/s e 800 m/s, com temperaturas entre 1600 °C e 2200 °C, tendo menor tempo para reação do oxigênio com o revestimento (PICAS et al., 2011; SRINATH et al., 2020; VERDON; KARIMI; MARTIN, 1997).

As mudanças estruturais são fortemente influenciadas por fatores que dependem do processo de deposição, tais como temperatura, velocidade, grau de fusão e teor oxidante. Esses parâmetros são alterados de acordo com o fluxo de oxigênio e combustível, e também a distância do bocal até a superfície a ser revestida, assim como depende da granulometrias do pó (LI; CHRISTOFIDES, 2005).

O processo de HVOF, além de ser um dos processos mais bem desenvolvidos até o momento, contém vantagens em comparação com os outros métodos de aspersão, como, por exemplo, capacidade de deposição de metais, cermet, cerâmicas e estruturais nanométricas cristalinas. Apresenta elevada resistência ao desgaste de, baixo custo, comparado com outros métodos, baixa porosidade, elevada dureza superficial, alta força de ligação entre as lamelas e baixas descarbonetação (BERTUOL, 2020; TAKIMI, 2004).

2.1.1 Materiais utilizados na deposição por aspersão térmica de alta velocidade

A variabilidade de materiais que podem ser usados no processo HVOF é bem elevada, podendo fazer revestimento com cerâmicas, matérias-primas de pequenas dimensões, como carbonetos nanométricos, sendo os materiais mais comuns

utilizados são metais e cermets. A utilização desses materiais varia de acordo com a necessidade, normalmente para se evitar corrosão, erosão e abrasão (OKSA et al., 2011).

2.1.1.1 Revestimento Cr₃C₂25NiCr

O revestimento Cr₃C₂25NiCr, depositado por HVOF é uma combinação com 75% de carboneto de cromo, cerâmico com boa resistência ao desgaste, com o metal NiCr que fornece resistência à oxidação e resistência a corrosão sob altas temperaturas, sendo utilizado em altas temperaturas, de até 870 °C. Pode ser usado devido à necessidade de resistência ao desgaste ou corrosão. Os revestimentos desse material é denso com resistência de ligação e são mais homogêneos comparado com outros processos de aspersão como spray por plasma ou pulverizado por chama de pó de combustão, sendo geralmente utilizados em componentes de turbinas, cilindros hidráulicos, motor de navios, e etc; (Oerlikon , 2019; VASHISHTHA et al., 2018; XIE et al., 2017).

As propriedades do material podem variar de acordo com a Tabela 2.

Tabela 1 - Características do revestimento Cr₃C₂25NiCr

Características	Dados
Microdureza (HV0.3)	850 – 1200
Porosidade	< 1%
Temperatura máxima de trabalho	870°C
Eficiência de deposição	30 – 55 %
Processo recomendado	HVOF

Fonte: Material Product Data Sheet Chromium Carbide – Nickel Chromium Powder Blend, Oerlikon (2019).

2.2 Usinagem

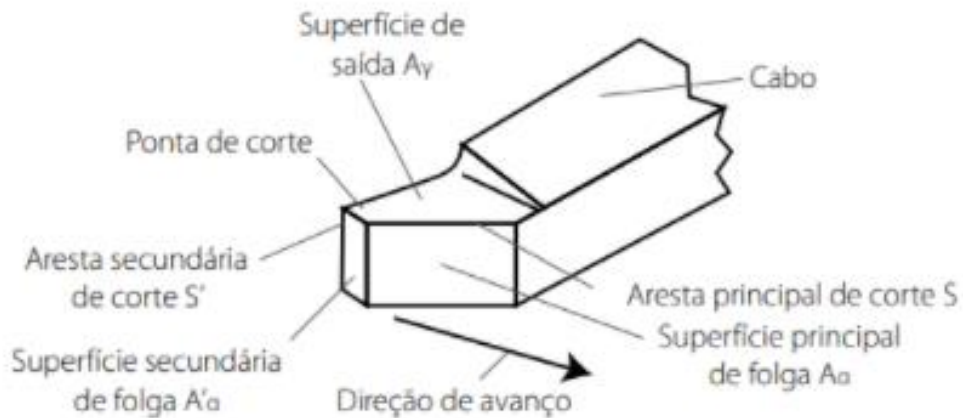
2.2.1 Geometria definida

A usinagem com ferramentas de geometria de corte definida é classificada com operações no qual se consegue fazer a medição da geometria da ferramenta

(BATISTA, 2018), as operações que a englobam são o torneamento, furações, fresamento, mandrilamento, brochamento, etc; utilizadas para grande remoção de material das peças (MACHADO, 2015).

Um exemplo de ferramental muito comum na usinagem de geometria definida, é ferramental de torneamento. Este apresenta três ângulos característicos (ângulo de saída, ângulo de posição e ângulo de folga). Como mostra a Figura 2, sendo uma imagem ilustrativa da ferramenta (Figura 2a) e uma imagem real (Figura 2b) (BATISTA, 2018).

Figura 2- Imagem da ferramenta de corte utilizada no processo de torneamento; a) Imagem ilustrativa de suas partes constituintes; b) Imagem real



b)



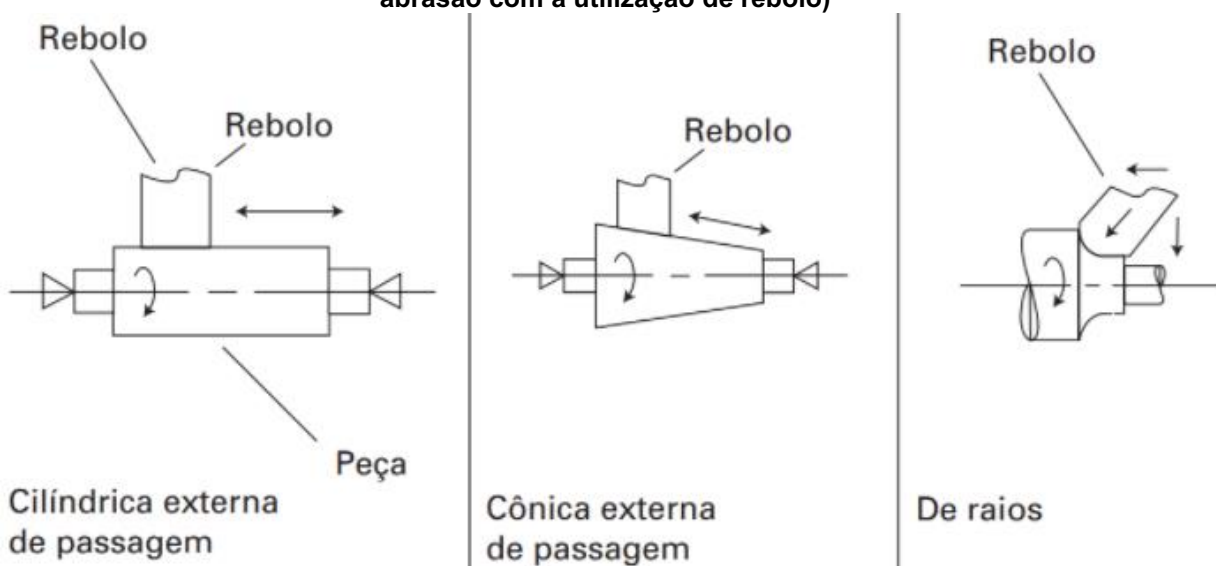
Fonte: Usinagem, Batista (2018)

2.2.2 Geometria não definida

A usinagem com geometria não definida, ou também chamado de usinagem por abrasão, realiza operações na qual a geometria da ferramenta não consegue ser definida, devido à realização da remoção do material ser por grãos de tamanhos distintos, alguns exemplos são o lixamento, retificação, lapidação e brunimento. Algumas características deste processo é que se consegue obter tolerâncias maiores do que no processo de geometria definida, mas tem alto consumo de energia para baixa taxa de remoção (BATISTA, 2018; MACHADO, 2015).

O rebolo é a principal ferramenta de corte utilizado neste processo, variando suas especificações de acordo com material abrasivo, tamanho de grãos, material ligante, porosidade e sua dureza. Na Figura 3 temos alguns exemplos do funcionamento da usinagem abrasiva com a utilização do rebolo e suas operações (MACHADO, 2015).

Figura 3 – Exemplo de algumas operações de retificação (um dos processos de usinagem por abrasão com a utilização de rebolo)



Fonte: Teoria da usinagem dos materiais, 3rd edição, Machado (2015)

2.2.3 Usinagem e acabamento de revestimentos aspergidos

O revestimento aspergido necessita muitas vezes de um processo superior de usinagem para o controle dimensional e de acabamento das peças revestidas. A

usinagem por geometria definida oferece vantagens, tais como: redução do tempo de usinagem e flexibilidade geométrica. Porém pode apresentar limitações quanto a aderência ao substrato e alto desgaste das ferramentas de corte mesmo em baixas velocidades devido à elevada dureza do revestimento aspergido, mas a usinagem por abrasão é mais utilizada, como o brunimento (DE LACALLE et al., 2001; LIBORIUS et al., 2021).

O brunimento é um método de acabamento superficial utilizado na aspensão, que reduz o tempo e custo comparado com outros métodos, porém ainda tem baixo desempenho de usinagem devido ao alto desgaste da ferramenta, que é ocasionada devido à alta temperatura, adesão, partículas duras, choque térmico e vibração (DING; SASAHARA, 2012).

2.2.3.1 Desgaste da ferramenta na usinagem e acabamento de revestimentos aspergidos

No caso da alta temperatura, que ocorre devido à elevada rugosidade do revestimento aspergido, gerando alto atrito com a ferramenta. O aumento de temperatura reduz a dureza da ferramenta de corte, logo diminui sua resistência ao desgaste. O fluido de corte pode ocasionar a formação de trincas de origem térmica na ferramenta em caso de uso em que se tem intervalos de aplicação do fluido durante o processo de usinagem, o que pode levar a quebra da ferramenta (BATISTA, 2018; MACHADO, 2015).

O desgaste ferramental causado por adesão ocorre pelo fato que o processo de aspensão por HVOF baseia em ligações lamelares intercaladas com poros, no qual as lamelas geradas pela aspensão. No processo de usinagem são arrancadas da superfície e arrastadas pelo fluxo de material, arrastando essas lamelas junto com a ferramenta, gerando um fluxo irregular de desgaste no material e gerando um aumento do desgaste da ferramenta (LI; CHRISTOFIDES, 2005; MACHADO, 2015; VERDON; KARIMI; MARTIN, 1997).

No desgaste por abrasão, desgaste quando o material removido contém partículas duras, pode acabar ocorrendo deformações plásticas e fraturas frágeis na ferramenta devido ao arrastamento destas partículas (MACHADO, 2015).

Alguns estudos sobre o comportamento do desgaste da ferramenta, mostra que é obtido uma menor taxa de desgaste em usinagem a seco comparado com a

utilização de lubrificantes refrigerantes e também menor taxa para velocidades de corte menores. As ferramentas que apresentam melhor desempenho em relação ao desgaste é as ferramentas com ponta de alto teor de nitreto de boro (CLAUSS et al., 2020; LIBORIUS et al., 2021)

A rugosidade tem relação com alguns parâmetros, sendo a velocidade de corte, quanto maior for, resulta em uma menor rugosidade, para velocidades menores de 300 m/s, para velocidades maiores que isso, a rugosidade aumenta devido ao aumento da interação com as fases duras do revestimento e aumenta a temperatura, aumentando o desgaste da ferramenta (CLAUSS et al., 2020).

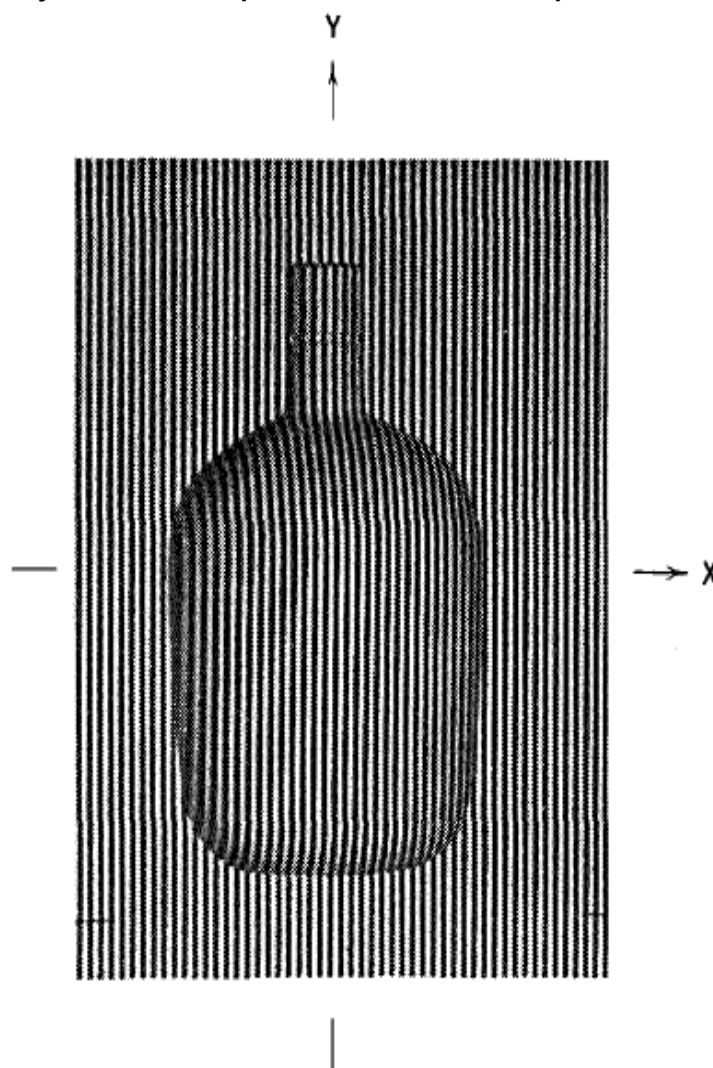
2.3 Perfilometria Óptica

Para a medição das variáveis da superfície (R_a , R_t , R_z , etc.), geralmente é usado a perfilometria mecânicas, mas os métodos ópticos contêm vantagens, como falta de contato e o uso para linhas de produção devido a velocidade acelerada da realização dos métodos (FUCHSOVÁ; LOFAJ; VLADIMÍR, 2011).

A perfilometria ótica 3D é usada para engenharia mecânica, visão de máquina, controle de robôs inteligentes, indústria, monitoramento, biomedicina, costura entre outras áreas de análise, sendo utilizado pelos motivos de análise de campo completo de alta precisão (SALVI et al., 2010; SU; CHEN, 2001).

Na superfície da amostra é projetada uma grade, ou franja como mostrado na Figura 4, que passa a informação de profundidade da amostra, sendo codificada em algum padrão registrado por um sensor de aquisição de imagem. Existe a aplicação de filtragem 2D para o fornecimento de diferentes alturas, com isso consegue haver uma diferença entre uma depressão e uma elevação, fazendo correções da análise pela incidência da luz não uniforme e fazer a interpolação nas regiões entre as linhas de contorno, para melhoramento da análise (SU; CHEN, 2001; TAKEDA; MUTOH, 1983).

Figura 4– Franja emitida na superfície de uma amostra para análise superficial



Fonte: Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes, Takeda (1983)

Essas tecnologias de varredura de pavimentação existente na perfilometria contêm várias categorias de tecnologia, como triangulação a laser, alcance de radar, alcance de sensor a laser e reconstrução 3D baseada em luz estruturada, no caso da perfilometria baseada na franja, a retirada de informações para objetos pequenos (diâmetro menor que 0,1 m) se consegue bons resultados (CHU et al., 2021).

Para obter bons resultados de amostras, quando possível fazer uma configuração, recomenda-se configurar o valor de comprimento de amostragem, para processos de usinagem, entre 2,5 a 8 vezes maior que as distâncias entre os sulcos realizados pelo processo para obter um melhor processamento de triangulação, interpolação de dados, obtendo melhores resultados no processo de análise (Batista, 2006).

2.3.1 Análise superficial

As superfícies podem ser classificadas segundo as alterações superficiais como acabamento e camadas subsuperficiais, sendo que na usinagem, o acabamento pode ser alterado conforme a rugosidade, ondulações e falhas, necessário grande parte das vezes uma exigência de acabamento. As ondulações são irregularidades superficiais maiores que as irregularidades da rugosidade, as falhas são interrupções na superfície inesperadas ou indesejáveis (MACHADO, 2015).

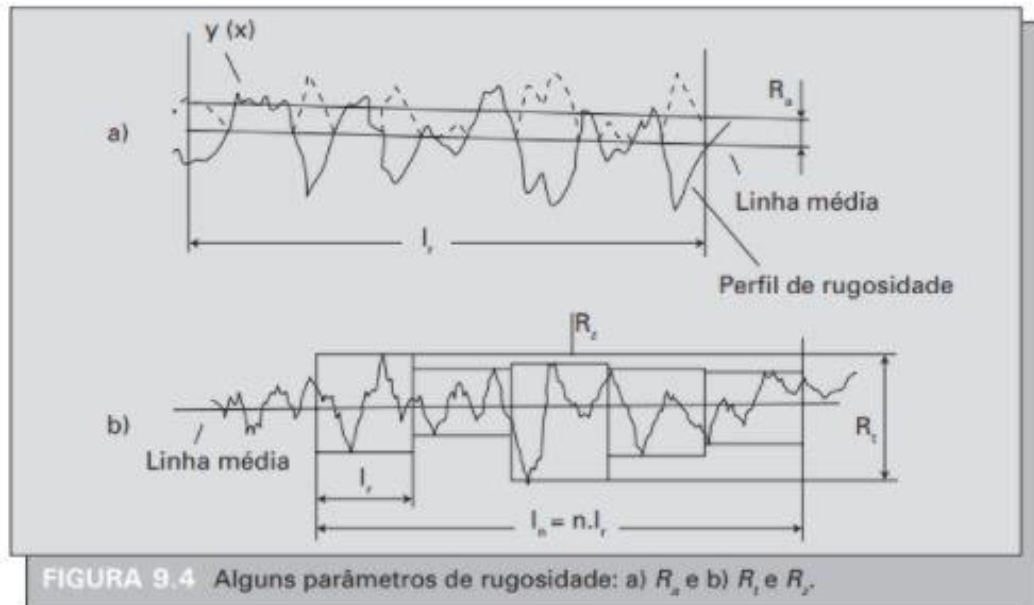
A rugosidade são basicamente irregularidades finas e/ou erros microgeométricos devido ao processo de corte, utilizada para controle de um processo, podendo ser medida a partir de vários parâmetros a partir de um comprimento de amostragem no eixo utilizado para identificar a rugosidade (MACHADO, 2015).

Algumas medidas para o controle da rugosidade são:

- R_a , sendo o desvio aritmético médio, em que é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem (MACHADO, 2015);
- R_t , sendo a altura total do perfil, em que é a soma da maior altura de pico do perfil (R_p) e da maior profundidade de vale do perfil (R_v) no comprimento de avaliação (MACHADO, 2015);
- R_z , sendo a altura máxima do perfil, sendo a soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem (MACHADO, 2015).

Na Figura 5, mostra de forma gráfica como os parâmetros de rugosidade são calculados.

Figura 5 – Imagem ilustrativa de um perfil de rugosidade e como os dados são obtidos de forma gráfica.

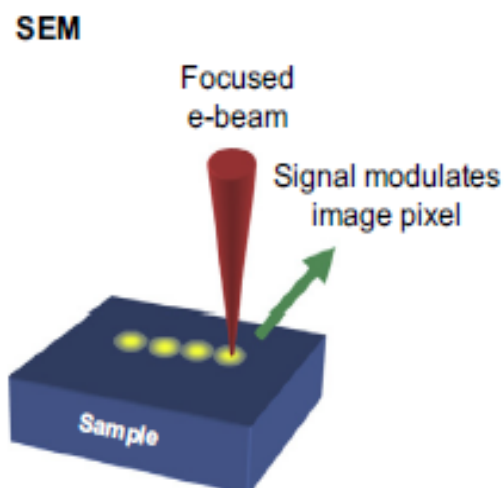


Fonte: Teoria da usinagem dos materiais, 3rd edição, Machado (2015)

2.4 Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV)

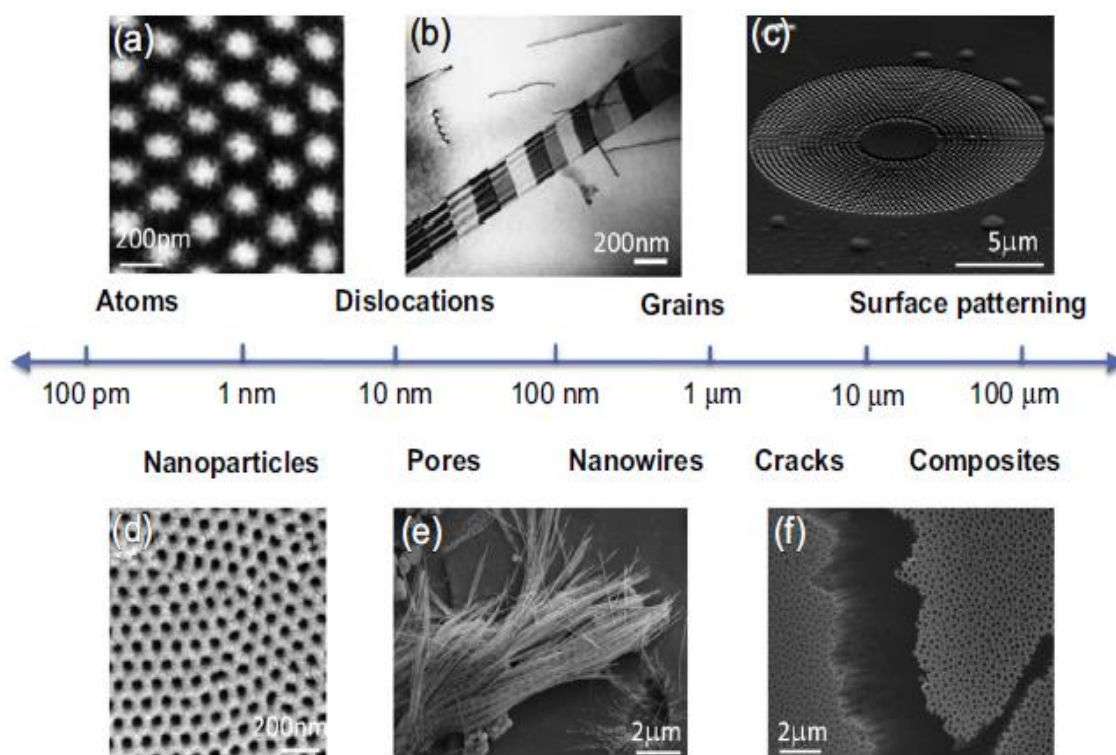
A microscopia eletrônica permite a análise de desenvolvimento na área de materiais, otimização, falha e educação. O MEV é um microscópio que gera feixes de elétrons, como microscópios de luz de reflexão, que é focado e varrido em toda a amostra, como mostra a Figura 6, após isso, os sinais são coletados por detectores que de acordo com a intensidade do sinal, ele molda o píxel da imagem de tal maneira que estes sinais aglomerados formam uma imagem, tudo isso em uma câmera de vácuo, sendo utilizado principalmente para analisar superfície dos materiais, em escalas de nano, micro ou macro níveis, algumas imagens retiradas pela metodologia da microscopia eletrônica são mostradas na Figura 7, mostrando também a variabilidade de imagens que se consegue obter (INKSON, 2016).

Figura 6 - Imagem ilustrativa da produção e detecção dos feixes de elétrons



Fonte: Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization, Inkson (2016)

Figura 7– Imagens retiradas pelo MEV e por microscopia eletrônica de transmissão (TEM)



Fonte: Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization, Inkson (2016)

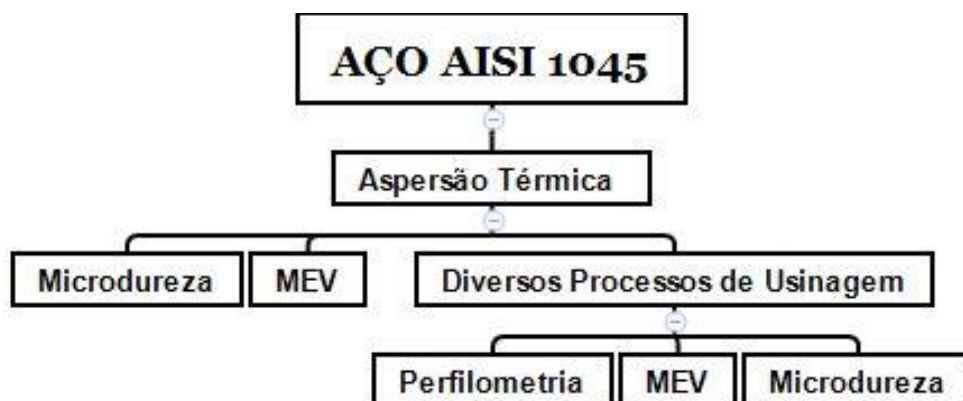
O MEV é utilizado para análise de materiais orgânicos e inorgânicos com alta eficiência, podendo ter uma ampliação de imagem chegando até 1.000.000x em modelos de alta precisão (AZAD; AVIN, 2019).

Com o MEV é possível ter informações como a estruturação dos poros e a mineralogia do material (LI; WANG; KONG, 2021)

3 METODOLOGIA

A metodologia realizada neste trabalho é mostrada na Figura 8, no qual primeiramente as amostras de aço AISI 1045 sofreram a aspersão térmica de $\text{Cr}_3\text{C}_225\text{NiCr}$, depois são preparadas e são realizados os ensaios de MEV e de microdureza, então ocorre os processos de usinagem nas amostras aspergidas, posteriormente ocorrendo os ensaios de MEV, Perfilometria e microdureza.

Figura 8– Organograma da metodologia utilizada neste trabalho, utilizando o software XMind (Versão 8, Update 8, software gratuito)



Fonte: Autoria própria

3.1 Aspersão térmica

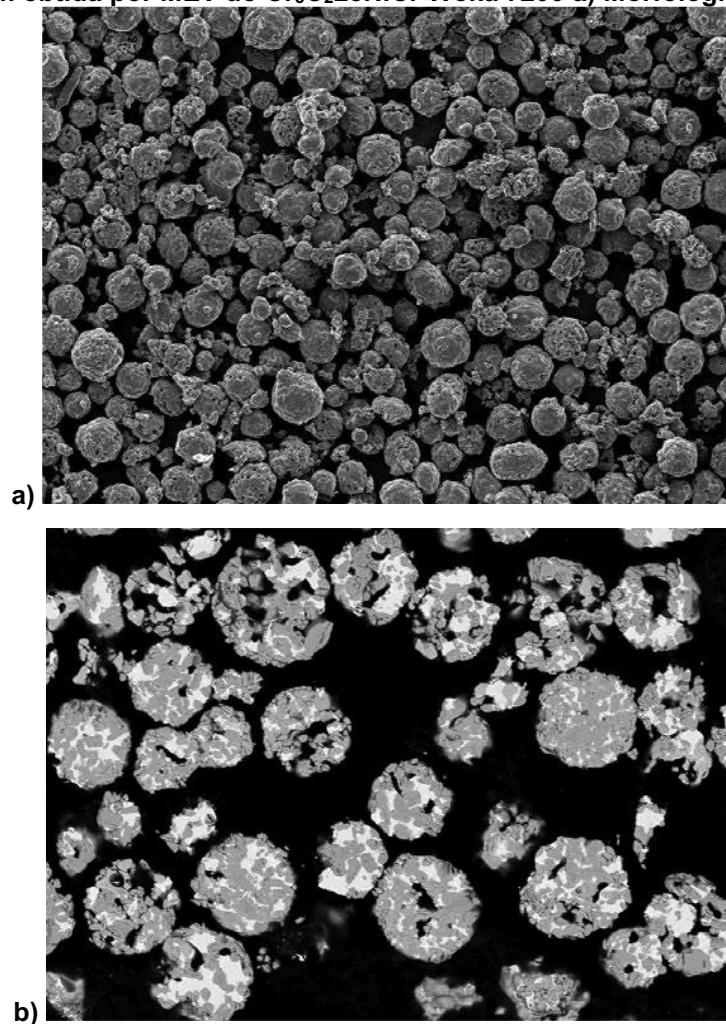
3.1.1 Seleção de ligas

A aspersão térmica será realizada no aço AISI 1045, sendo utilizado a liga de $\text{Cr}_3\text{C}_225\text{NiCr}$.

3.1.1.1 Liga Cr₃C₂25NiCr

O pó de Cr₃C₂25NiCr WOKA7200 usado neste trabalho é o da Oerlikon METCO, de morfologia esferoidal de densidade entre 2,3 g/cm³ e 3.1 g/cm³, o principal propósito desse material seria para corrosão e resistência ao desgaste utilizado para processos de HVOF. Na Figura 9, mostra-se sua morfologia e sua microestrutura (Oerlikon, 2019).

Figura 9 – Imagem obtida por MEV do Cr₃C₂25NiCr Woka 7200 a) Morfologia b) Microestrutura



Fonte: Material Product Data Sheet Chromium Carbide – Nickel Chromium Powder Blend, Oerlikon (2019).

Na Tabela 2 contêm a sua composição química.

Tabela 2- Composição química do Cr₃C₂25NiCr Woka 7200

Produto	Cr	C	Ni	Fe
Woka 7200	Restante	9 – 10,2	17,5 – 22,5	< 0,5

Fonte: Material Product Data Sheet Chromium Carbide – Nickel Chromium Powder Blend, Oerlikon (2019).

3.1.2 Parâmetros

Após a definição das ligas que serão aspergidas sobre o aço AISI 1045, prepara-se o aço para o processo de aspersão, com dimensões de aproximadamente 49 mm x 50 mm x 84 mm e em parceria com a empresa Revestell Metalização, localizada em Pinhais no Paraná, será utilizado o sistema Diamond Jet Gas Fuel HVOF – DJ2700 da METCO. Na Tabela 4, se de tem os parâmetros utilizados no processo.

Tabela 3 – Parâmetros do processo de aspersão HVOF.

Parâmetros	Valor
Pressão de Oxigênio (MPa)	0,97
Fluxo de Oxigênio (l/min)	253
Razão combustível/oxigênio	0,21
Velocidade de deposição (mm/s)	1260
Taxa de alimentação (g/min)	40
Distância de aspersão (mm)	250

Fonte: Evaluation of cavitation/corrosion synergy of the Cr₃C₂-25NiCr coating deposited by HVOF process, Mayer, A.R. (2020)

3.2 Usinagem

A usinagem nos corpos de prova acontecerá após o processo de aspersão, sendo vários processos, mostrado na Tabela 4 logo abaixo, sendo que todos os processos de usinagem foram realizados com velocidade de corte de 100m/min, avanço de 0,1 mm/rotação e uma inclinação entre 1 a 2 graus, obtendo uma

profundidade de corte de no máximo 1 mm (usinagem do topo do revestimento até o substrato, aumento a profundidade de corte de acordo com o avanço).

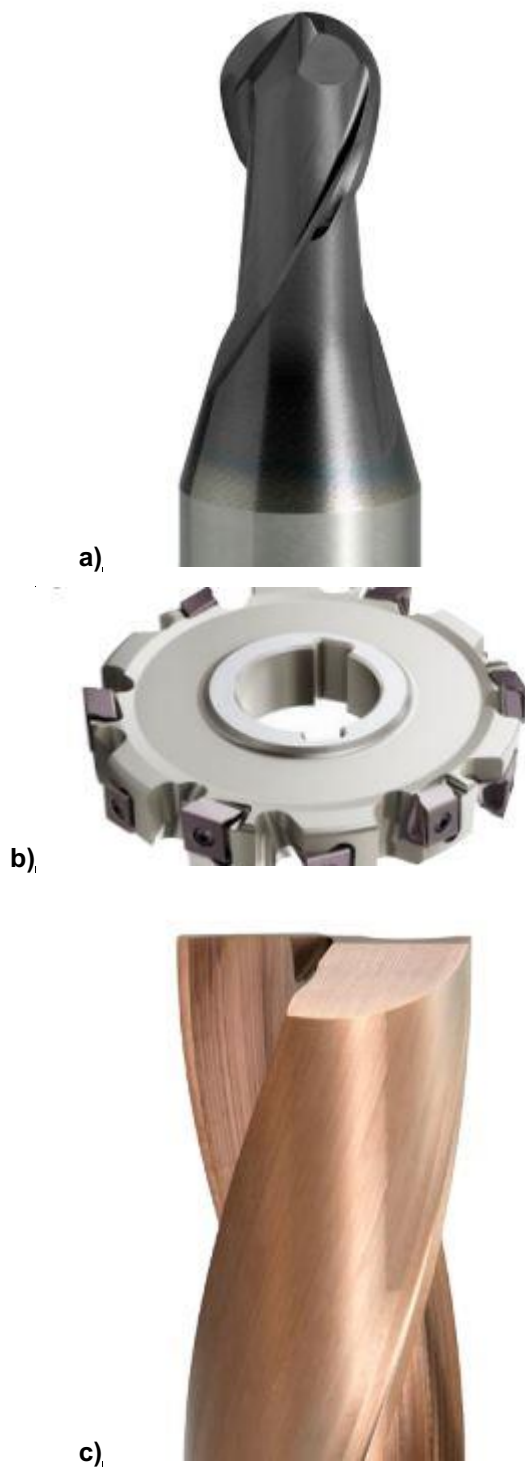
Tabela 4 - Tipos de processos realizados.

Processo de Usinagem	Sentido
Ball Nose com diâmetro de 12mm de metal duro com 2 dentes	1. Começando pelo revestimento até o substrato (descendo) - Concordante, discordante e zig zag. 2. Começando pelo substrato até o revestimento (subindo) - Concordante, discordante e zig zag.
Fresa de Faceamento Positivo com diâmetro de 100mm de metal duro com 3 dentes de raio 0,8mm	1. Começando pelo revestimento até o substrato (descendo) 2. Começando pelo substrato até o revestimento (subindo)
Fresa de Faceamento Negativo com diâmetro de 100 mm de metal duro com 3 dentes de raio 0,8mm	1. Começando pelo revestimento até o substrato (descendo) 2. Começando pelo substrato até o revestimento (subindo)
Fresa de Topo com diâmetro de 10mm de metal duro com 2 dentes sem raio	1. Começando pelo revestimento até o substrato (descendo)
Ferramenta Toroidal de Cabeça Montada com diâmetro de 12 mm de metal duro revestido de TiAlN com 4 dentes	1. Começando pelo revestimento até o substrato (descendo)

Fonte: Autoria própria.

Em seguida, na Figura 10, mostra-se imagens ilustrativas de como são as ferramentas.

Figura 10 – Imagens ilustrativas das ferramentas utilizadas a) Ball Nose b) Fresa de Facemanto c) Fresa de Topo d) Ferramenta Toroidal.





d)

Fonte: Ferramentas de corte, Mitsubishi Materials (2020-2021).

3.3 Ensaio de caracterização dos revestimentos e da usinagem

3.3.1 Preparação dos corpos de prova

Após a aspersão térmica, será cortado duas amostras pequenas de tamanho 10mm x 5mm x 10mm para a análise da aspersão térmica, sendo realizado os cortes com a cortadeira de precisão Buehler ISOMET 4000, com disco abrasivo especial para corte de revestimentos.

Após o corte a amostra vai para um ensaios de MEV, para se obter resultados da superfície aspergida, posteriormente foi realizado um embutimento a quente utilizando baquelite, na embutidora Buehler SimpliMet XPS1, sendo que a amostra está para ser analisada na transversal, para então realizar a preparação da superfície da amostra .

Em seguida foi realizado o lixamento da seção transversal na Politriz Automática Buehler Vector com força aplicada de 15N, as lixas utilizadas no processo foram utilizadas com as granulometrias, na seguinte sequência, 220, 400, 600 e 1200. Rotação de 300 rpm e duração de 15 minutos, e depois polimento de 3 µm em 400 rpm e duração de 2 minutos.

3.3.2 Ensaios de análise de superfície

3.3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura

Após o preparo das amostras, coloca-se a mesma em uma câmara de vácuo, para captação das imagens pelo MEV. As imagens retiradas são de ampliação em 100x, 200x, 500x e 1000x de vários pontos distintos, de acordo com a necessidade, sendo realizado pelo sistema de microscópio eletrônico de varredura TESCAN VEGA-3LM, equipado com detector EDX x-act da Oxford Instruments.

3.3.2.2 Avaliação da morfologia superficial por perfilometria ótica

Para fazer o ensaio de perfilometria utiliza-se o sistema Talysurf CCI MP, que faz uma imagem topográfica superficial das amostras, no qual a partir de várias varreduras localizadas, se consegue junta-las a partir da interpolação do sistema, obtendo varreduras de tamanhos variados de acordo com o desejado. As varreduras foram feitas de tamanhos de 3 mm x 3 mm, para análise localizadas, e de 3 mm x 20 mm para análise do perfil completo da usinagem das amostras.

Os dados obtidos a partir da análise topografia utiliza as normas ISO 4287 (Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade) para obter os valores de rugosidade R_a , R_t , R_p , R_v e R_z .

3.3.2.3 Avaliação mecânica a partir da microdureza

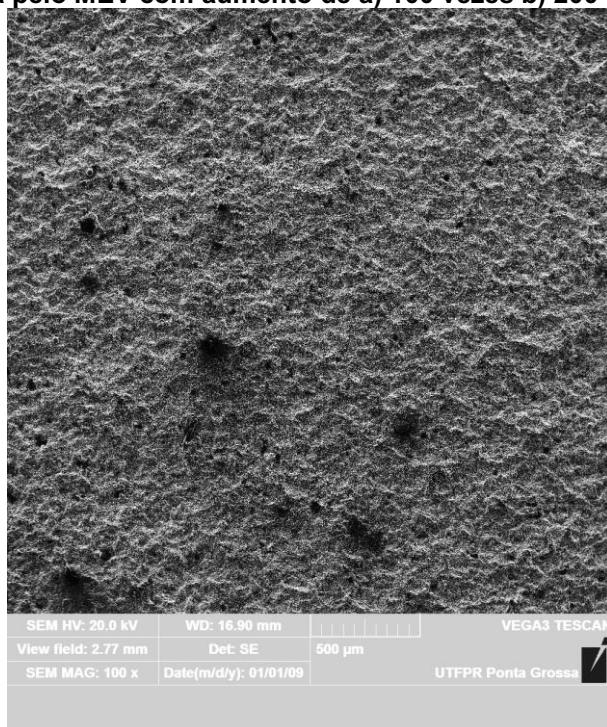
A microdureza é realizada pelo durômetro de microescala Shimadzu HMV-G20 Series, localizado no Laboratório de Preparação Metalográfica da UTFPR, Campus Ponta Grossa, no qual faz a penetração nas amostras com uma endentação em forma piramidal de diamante com ângulos de 136° entre as faces opostas e em escala micrométrica, que deixa um formato de penetração de um losango, no qual de forma manual, pelo microscópio, se mede as diagonais, assim calculando a dureza em Vickers, de acordo com a norma ASTM E384 (2017) – Método de teste padrão para microindentação de dureza de materiais, para dureza Vickers.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

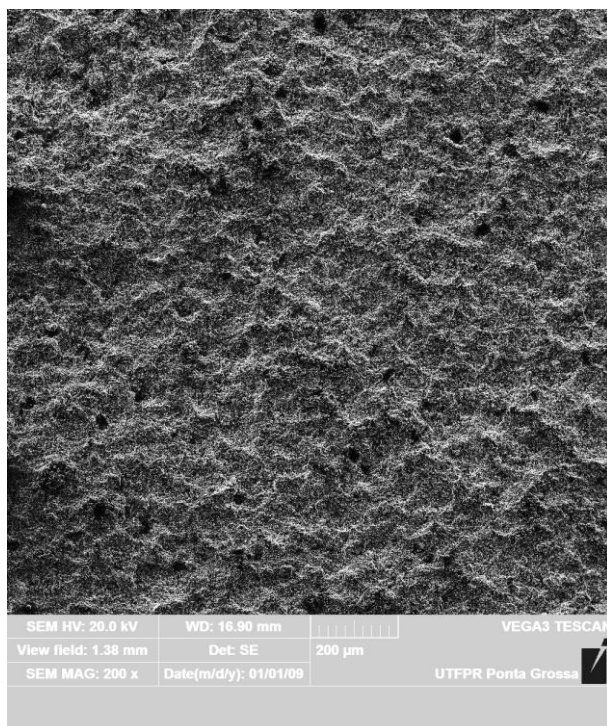
4.1 Aspersão térmica

Realiza-se o ensaio de MEV nas amostras aspergidas, para ver o aspecto inicial das amostras. Como mostrado na Figura 11, logo abaixo, verificamos a aleatoriedade de deposição ocorrida de acordo com o método de aspersão térmica, formando uma alta diferença visual entre os picos e vales, e de forma clara a deposição das gotículas formando as lamelas.

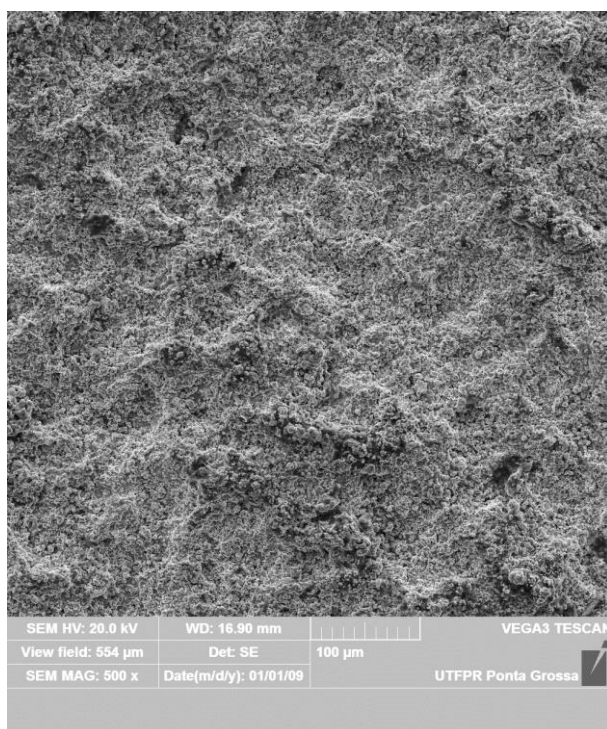
Figura 11 - Imagem obtida pelo MEV com aumento de a) 100 vezes b) 200 vezes c) 500 vezes.



a)



b)



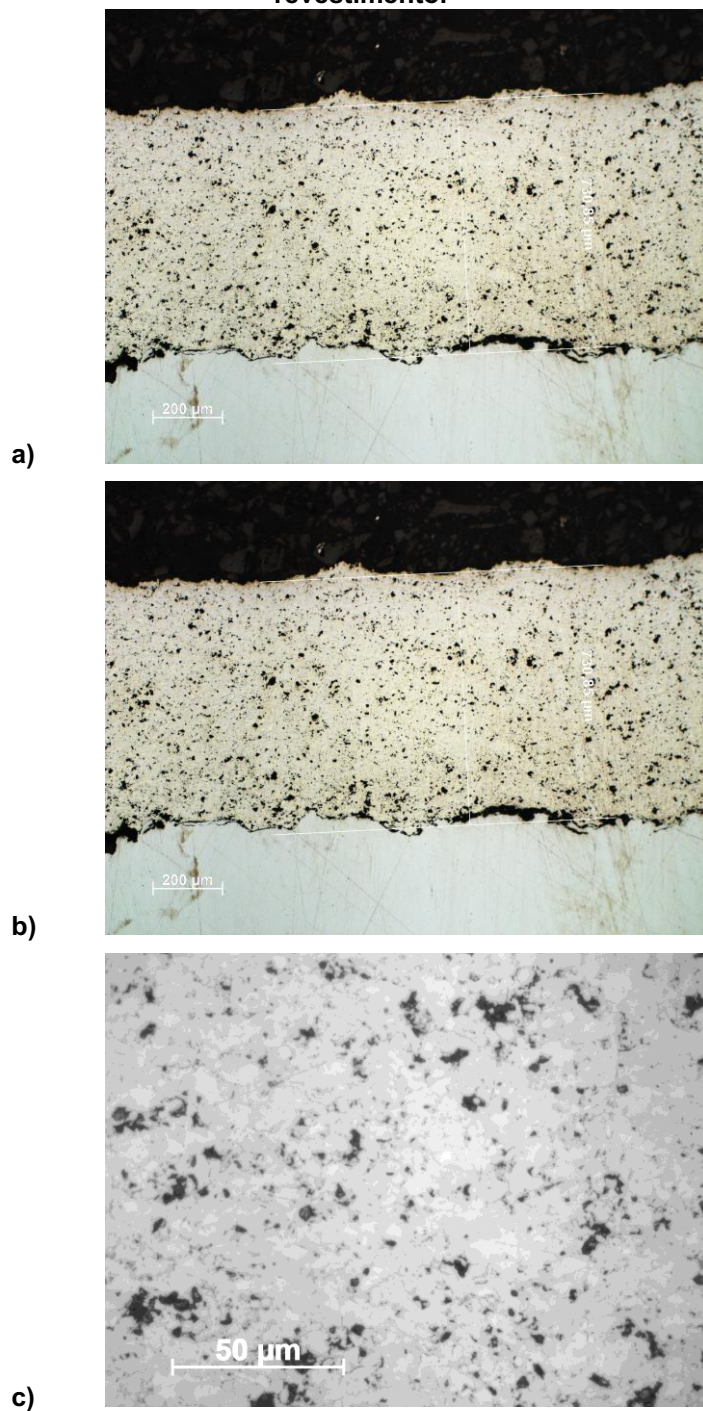
c)

Fonte: Autoria própria.

Obtem-se nos ensaios de microdureza sobre o revestimento aspergido, um resultado de 470HV com desvio padrão de 52.

Também realizou-se imagens transversais do revestimento de acordo com as Figuras 12, definindo a espessura do revestimento e também a estrutura do revestimento na seção transversal.

Figura 12 – Imagens transversais do revestimento aspergido a) maior espessura do revestimento encontrado b) meno espessura do revestimento encontrado c) estrutura do revestimento.



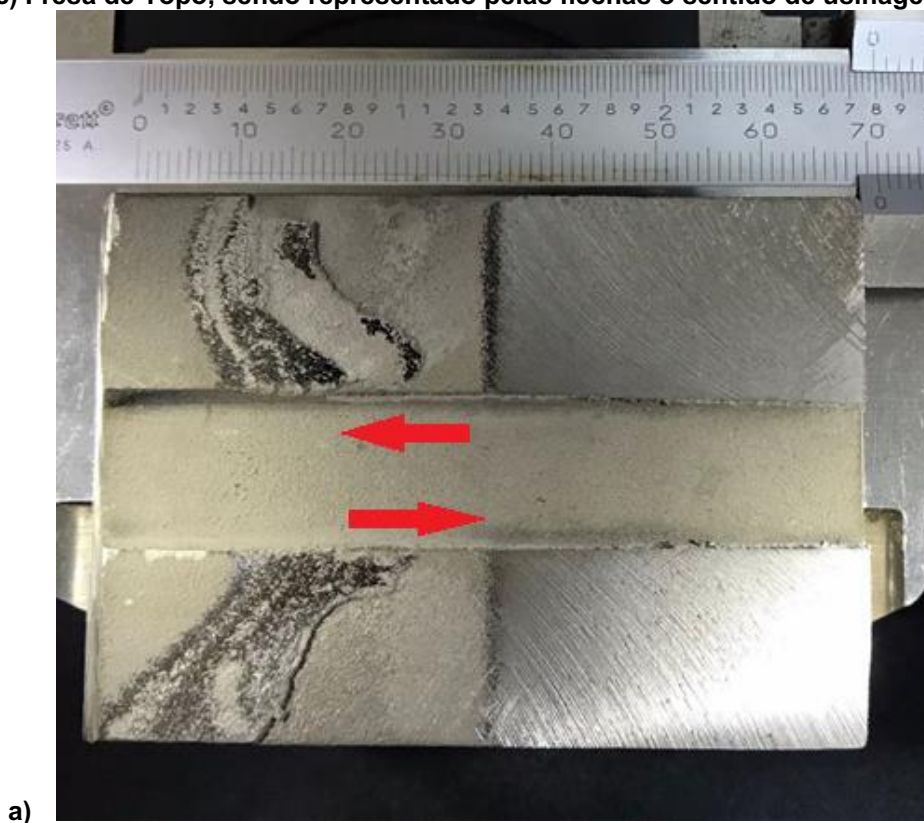
Fonte: Autoria própria.

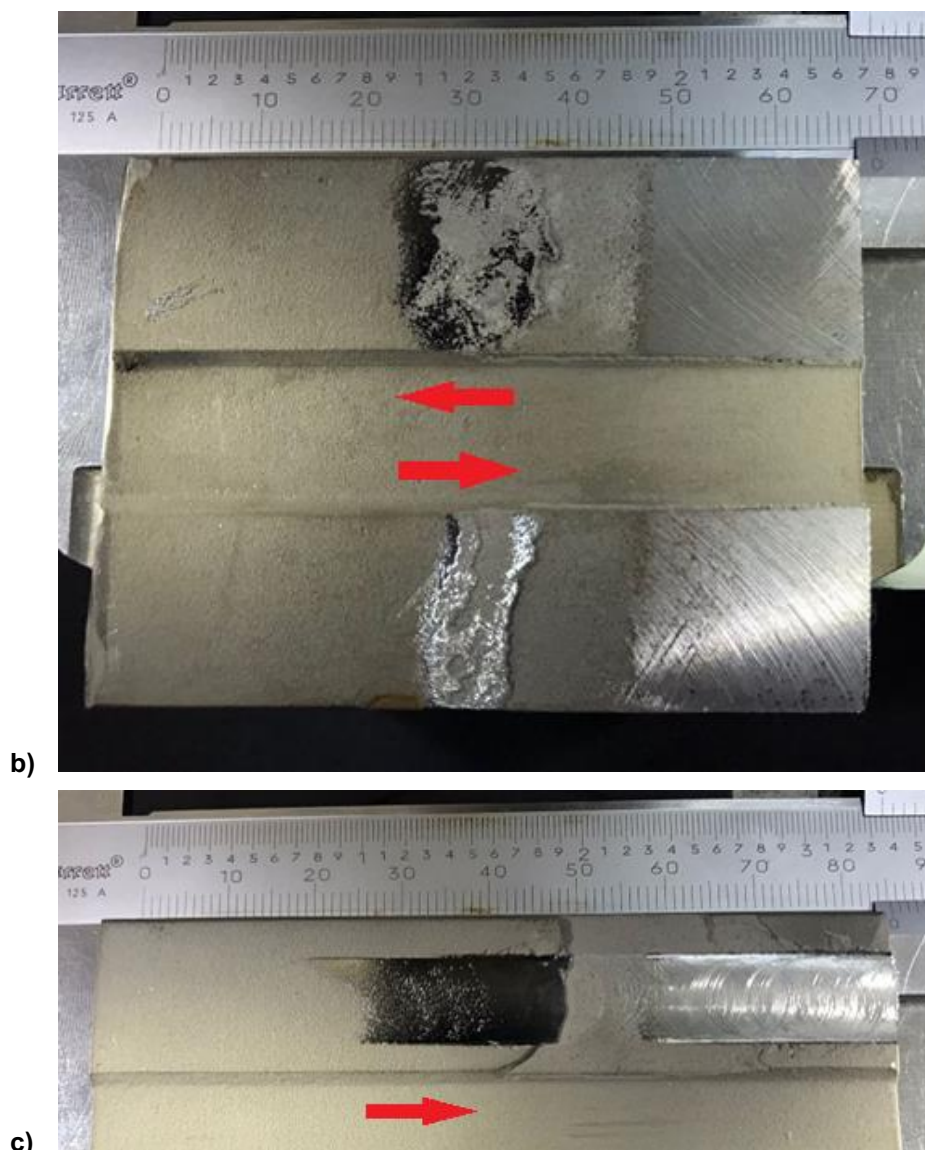
4.2 Processos de usinagem

4.2.1 Análise da superfície usinada

Após os processos de usinagem com as ferramentas de Fresa de Faceamento Positivo, Fresa de Faceamento Negativo e Fresa de Topo, verifica-se um deslocamento do revestimento aspergido, como mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Análise das superfícies após processo de usinagem a) Fresa de Faceamento Positivo; b) Fresa de Faceamento Negativo, começando pelo revestimento até o substrato (descendo) no lado inferior e começando pelo substrato até o revestimento (subindo) no lado superior; c) Fresa de Topo, sendo representado pelas flechas o sentido de usinagem.





Fonte: Autoria própria.

Esses processos tem em comum, no processo de usinagem, um raio da ferramenta pequenos, no qual devido a isto, em uma determinada profundidade de corte, ocorre uma força suficiente para gerar trinca no revestimento e também uma força maior que a de adesão do revestimento sobre o substrato, ocorrendo o deslocamento do material.

Observa-se que após a usinagem com a ferramenta de Fresa de Faceamento Positivo/Negativo, no começo do processo, com uma profundidade de corte pequenos, ouve o deslocamento.

Observa-se que após a usinagem com a ferramenta de Fresa de Topo, teve que ter uma profundidade de corte maior para ocorrer o deslocamento, ocorrendo o processo de usinagem de maneira desejavel para pequenas profundidades de corte.

4.2.2 Topografia superficial

Analisando os processos que não tiveram deslocamento da aspensão térmica no processo de usinagem, conseguimos fazer uma topografia superficial dessas amostras de forma localizada, para identificação de suas rugosidades (Ra, Rt, Rz, Rp e Rv). As rugosidade foram obtidas tanto no sentido da usinagem, nas Tabelas 5, e perpendicular a usinagem, nas Tabelas 6. Nas Tabelas 5 e 6, temos dois dados retiradas da aspensão térmica, devido a usinagem ser com ângulo, sendo uma mais próxima ao revestimento aspergido (uma profundidade de corte menor) e outra mais próxima ao substrato (uma profundidade de corte maior). Alguns dados do substrato não chegou a ser obtido devido que a usinagem não chegou nessa região.

Tabela 5 - Tabela com dados superficiais das amostras usinadas no sentido da usinagem a) dados do revestimento próximo ao topo da aspensão b) dados do revestimento próximo ao substrato c) dados do substrato.

Processo de Usinagem	Sentido1	Sentido 2	Aspensão Superior				
			Ra	Rt	Rp	Rv	Rz
Ball Nose		Zig Zag	1,98	26,45	8,695	13,1	21,75
	Revestimento Substrato (descendo)	Concordante	3,22	35	14,4	16,4	30,5
		Discordante	1,51	24,6	7,99	11,3	19,3
	Substrato - Revestimento (subindo)	Concordante	2,43	31,7	11,5	14,7	26,3
		Discordante	1,45	19,4	5,24	10,5	15,7
	Ferramenta Toroidal	Revestimento Substrato (descendo)		-	-	-	-

a)

Processo de Usinagem	Sentido1	Sentido 2	Aspensão Inferior				
			Ra	Rt	Rp	Rv	Rz
Ball Nose		Zig Zag	1,575	21,65	7,31	10,56	17,85
	Revestimento Substrato (descendo)	Concordante	2,49	32,4	11,6	15	26,6
		Discordante	1,8	25,1	8,73	12,5	21,2
	Substrato - Revestimento (subindo)	Concordante	2,44	30,7	11	13,9	24,9
		Discordante	2,16	22,5	7,32	12,1	19,4
	Ferramenta Toroidal	Revestimento Substrato (descendo)		1,13	8,38	2,1	4,57

b)

Processo de Usinagem	Sentido1	Sentido 2	Substrato				
			Ra	Rt	Rp	Rv	Rz
Ball Nose		Zig Zag	1,16	19,2	8,2	7,88	16,1
	Revestimento Substrato (descendo)	Concordante	-	-	-	-	-
		Discordante	-	-	-	-	-
	Substrato - Revestimento (subindo)	Concordante	1,3	20,4	8,94	8	16,9
Discordante		-	-	-	-	-	
Ferramenta Toroidal	Revestimento Substrato (descendo)		1,98	12,6	4,53	5,83	10,4

c)

Fonte: Autoria própria.

Analisando primeiramente as Tabelas 5. Verifica-se que, no âmbito geral, pelo Ra, a ferramenta toroidal tem a melhor qualidade superficial, devido ao revestimento da ferramenta, que causa um menor desgaste ferramental, tendo menor defeitos durante o processo de usinagem. Na comparação somente da Ball Nose vemos que para baixos valores de profundidade de corte, o sentido Discodante tem um melhor acabamento superficial, e para profundidades de corte maiores, a ZigZag tem um acabamento melhor devido ao tipo de processo. Além disso, comparando os revestimentos com seus respectivos substratos usinados, vemos que na ferramenta Ball Nose, o substrato tem sempre um acabamento pior comparado com o revestimento, acontecendo o oposto com o a Ferramenta Toroidal.

Além disso, verificando o Rv com Rp, repara-se que no revestimento usinado, o Rp sempre está menor do que o Rv, mostrando que os vales predominam no processo de usinagem. Isso pode ocorrer devido ao tipo de estrutura lamelar formada pela aspensão térmica e pela formação de carbonetos, que podem ser removidos inteiros pelo processo de usinagem, ocasionando grande quantidade de vales.

Tabela 6 - Tabela com dados superficiais das amostras usinadas no sentido perpendicular a usinagem a) dados do revestimento próximo ao topo da aspersão b) dados do revestimento próximo ao substrato c) dados do substrato.

			Aspersão Superior				
Processo de Usinagem	Sentido1	Sentido 2	Ra	Rt	Rp	Rv	Rz
Ball Nose		Zig Zag	1,81	24,6	10,135	14,1	24,25
	Revestimento - Substrato (descendo)	Concordante	2,08	28,9	12,7	16,2	28,9
		Discordante	1,25	17,6	7,96	8,86	16,8
	Substrato - Revestimento (subindo)	Concordante	3,14	31,6	12,7	17,7	30,4
		Discordante	1,04	12,6	5,12	7,18	12,3
Ferramenta Toroidal	Revestimento - Substrato (descendo)		-	-	-	-	-

a)

			Aspersão Inferior				
Processo de Usinagem	Sentido1	Sentido 2	Ra	Rt	Rp	Rv	Rz
Ball Nose		Zig Zag	1,265	18,1	7,585	10,18	17,75
	Revestimento - Substrato (descendo)	Concordante	3,06	30,7	13,1	17,6	30,7
		Discordante	1,26	20,7	8,68	11,6	20,3
	Substrato - Revestimento (subindo)	Concordante	1,45	22,6	9,58	10,8	20,4
		Discordante	1,4	19,1	7,06	11,5	18,5
Ferramenta Toroidal	Revestimento - Substrato (descendo)		0,902	6,78	1,59	5,04	6,63

b)

			Substrato				
Processo de Usinagem	Sentido1	Sentido 2	Ra	Rt	Rp	Rv	Rz
Ball Nose		Zig Zag	1,47	17,3	8,94	8,09	17
	Revestimento - Substrato (descendo)	Concordante	-	-	-	-	-
		Discordante	-	-	-	-	-
	Substrato - Revestimento (subindo)	Concordante	1,53	20,2	10,1	9,52	19,6
		Discordante	-	-	-	-	-
Ferramenta Toroidal	Revestimento - Substrato (descendo)		1,23	6,85	2,84	3,79	6,63

c)

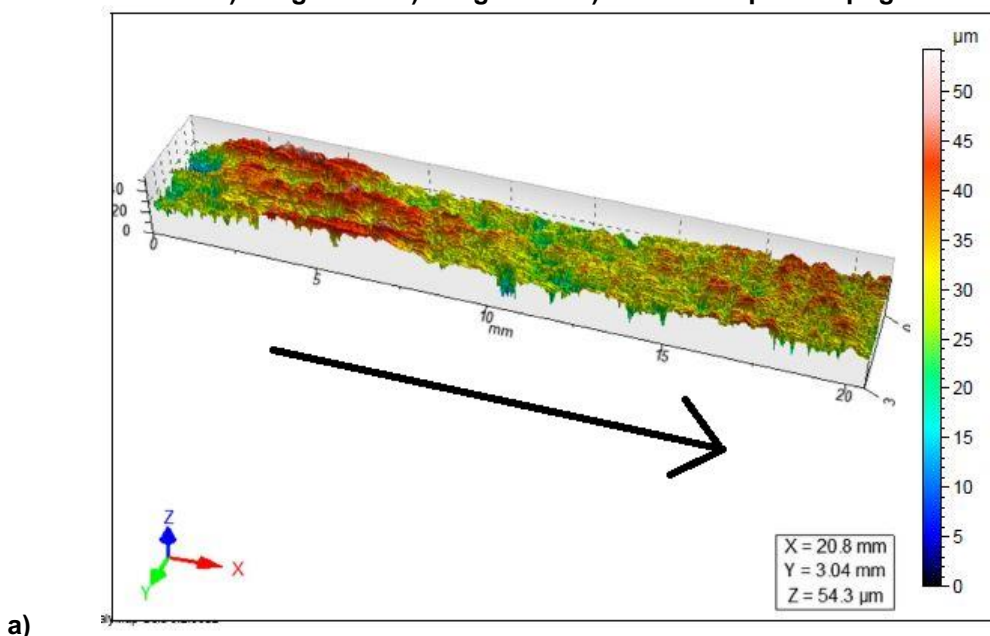
Fonte: Autoria própria.

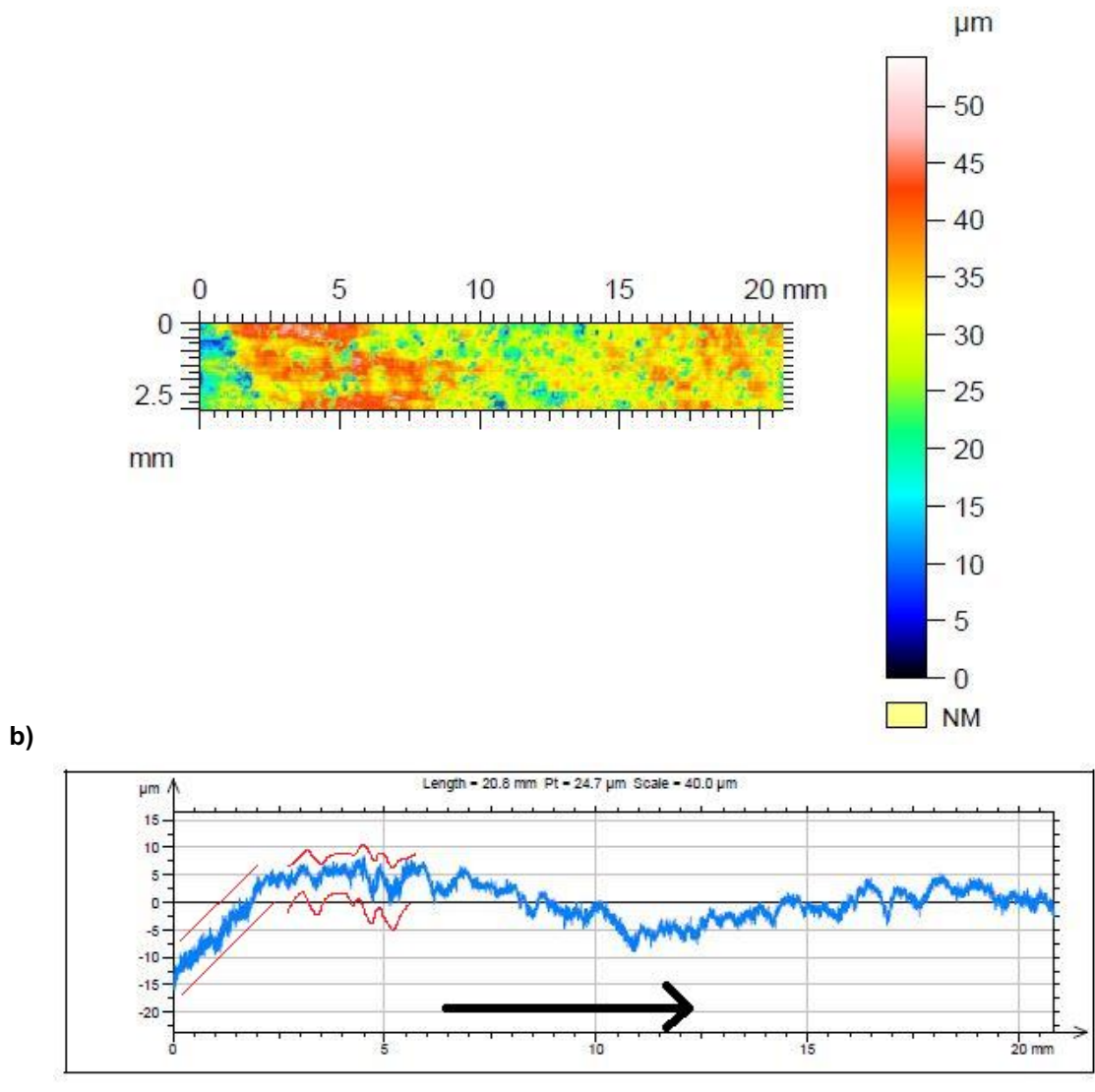
Nas Tabelas 6, verifica-se pelo Ra que há uma diferença no seu comportamento quando se compara o revestimento com o substrato, no caso da Ball

Nose, nos dados retirados na parte mais próxima ao topo do revestimento (Aspersão Superior). O valor de Ra tem um valor aproximado ao do substrato, e quando está mais perto ao substrato (Aspersão Inferior), o Ra está maior do que o substrato, mostrando um comportamento diferente, do que analisando nas Tabelas 5, no caso da Ferramenta Toroidal, e nas comparações de Rp e Rv, o comportamento segue com a mesma tendência das Tabelas 5.

Analisa-se as maiores diferenças de Ra, tempos a amostra Ball Nose, no sentido subindo, concordante, na Figura 14, conseguimos observar a topografia da usinagem, 2D, 3D e o perfil de forma gráfica.

Figura 14 – Análise Topográfica do revestimento usinado por Ball Nose, no sentido subindo, concordante a) Imagem 3D b) Imagem 2D c) Gráfico do perfil topográfico.





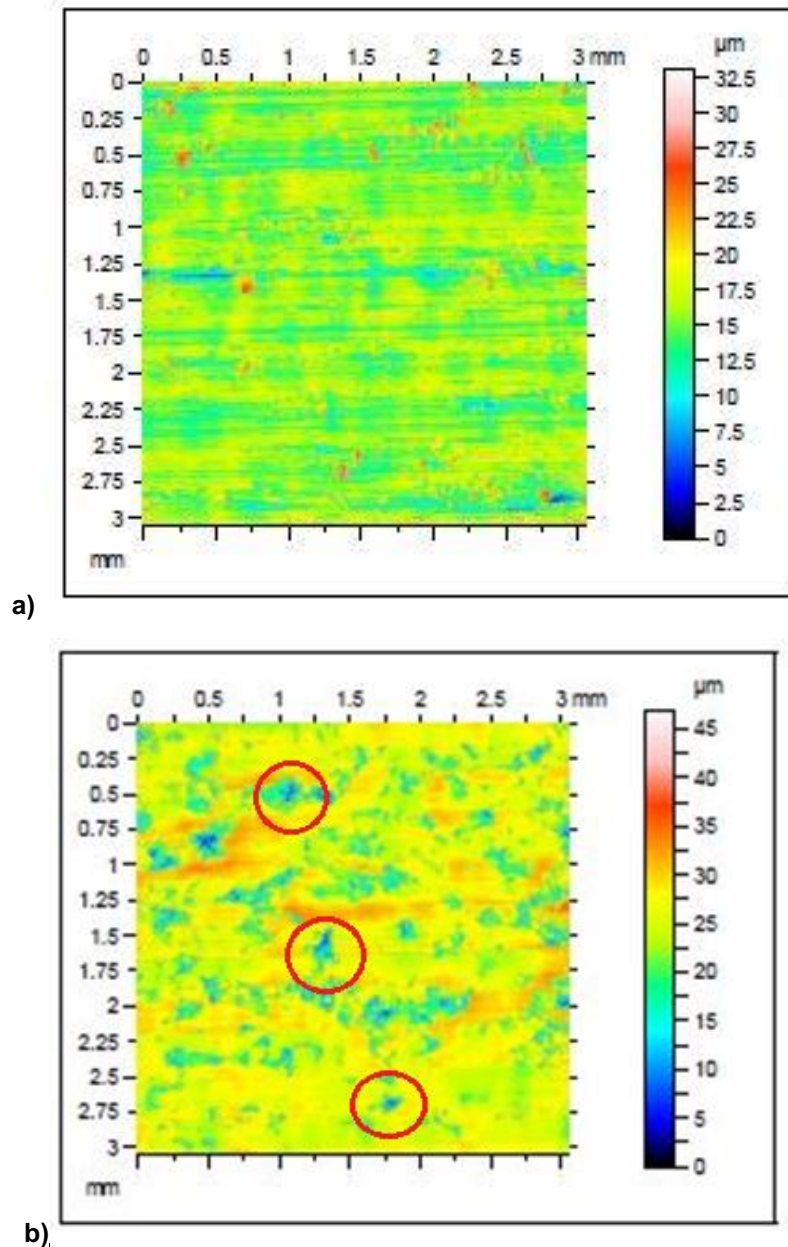
Fonte: Autoria própria.

Analisando juntamente o gráfico com a Imagem 3D, Imagem 2D, percebe-se que o comportamento da usinagem no substrato tem um comportamento linear, ou seja, entre 0 até 4mm aproximadamente, analisando nas Imagens 2D e 3D. A parte mais azul a esquerda, com um perfil mais regular, como mostrado nas tabelas, sem muitas variações entre os valores de R_v e R_p , mas quando analisamos a parte do revestimento, temos um comportamento não linear do acabamento, com grandes diferenças entre os picos e vales, além de aparentar regiões de acúmulo de material.

Fazendo outra análise, a maior diferença de entre o R_p e R_v é de $5,00 \mu\text{m}$ da Ball Nose, subindo, concordante, sentido perpendicular a usinagem, sendo da parte com menor profundidade de corte (Aspersão Superior) das amostras que foi obtido os resultados do substrato. Assim analisamos a topografia superficial realizada nessa

amostra, tanto no substrato quanto no revestimento na Figura 15, uma imagem 2D da topografia.

Figura 15 – Topográfica Superficial 2D do processo de usinagem com ferramenta Ball Nose na região a)Substrato b)Revestimento



Fonte: Autoria própria.

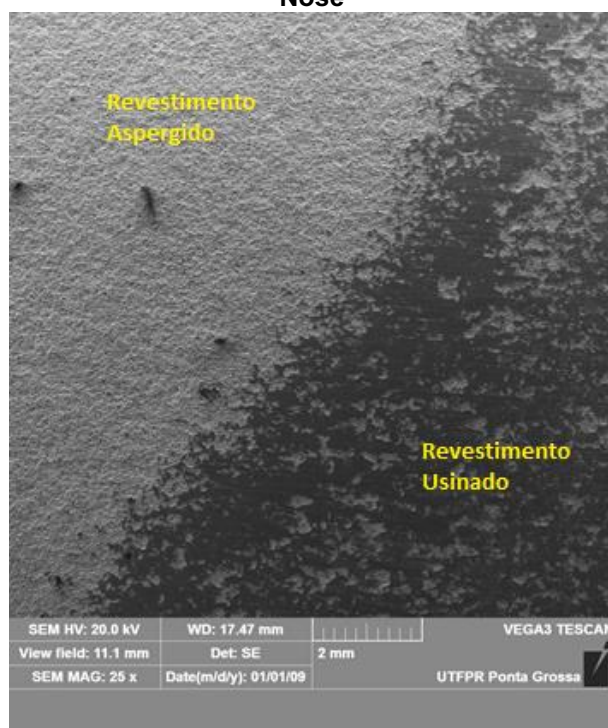
Na Figura 15, consegue-se verificar que a quantidade de vales localizados na amostra revestida usinada é maior do que comparado ao substrato usinado, sendo mostrado de maneira visual, conseguindo observar esse mesmo fenômeno na Figura 14. Onde se tem uma superfície mais uniforme no substrato, comparado com a superfície do revestimento, mostrando que a usinagem no revestimento gera grande

quantidade de vales, devido ao processo da aspersion térmica, devido a estrutura lamelar e formação de grãos duros.

4.2.3 Análise da superfície usinada pelo método de Microscopia Eletronica de Varredura

Primeiramente para mostrar a diferença superficial entre o processo de aspersion e o revestimento usinado, temos na Figura 16 uma imagem de transição, onde se inicia a usinagem com a Ball Nose sentido concordante.

Figura 16 - Area de entrada da ferramenta no processo de usinagem com a ferramenta Ball Nose

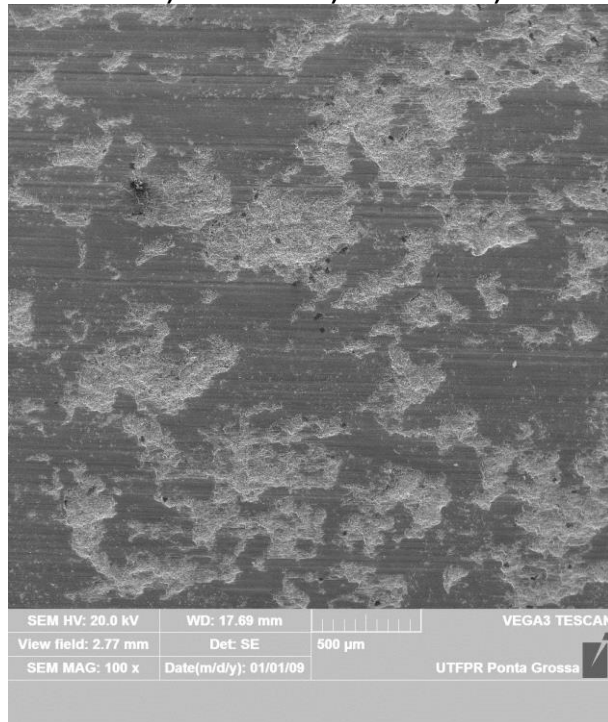


Fonte: Autoria própria.

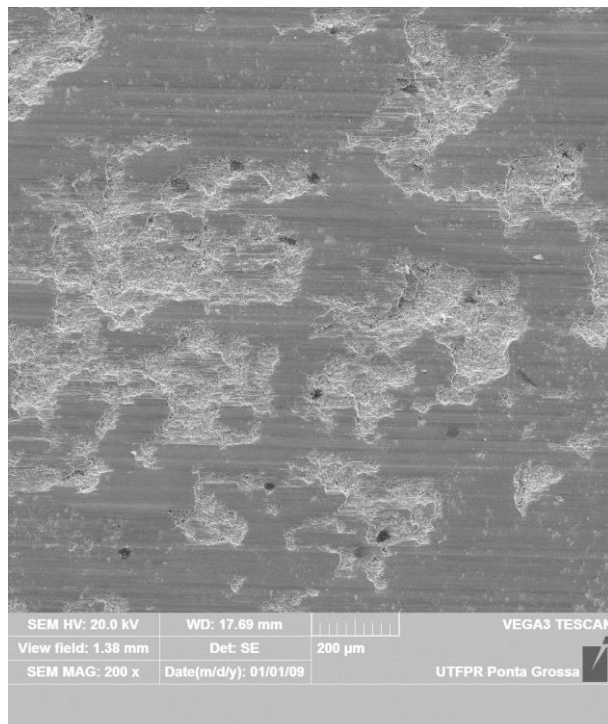
Nessa imagem conseguimos ver uma maior padronização no revestimento usinado, comparado com o revestimento aspergido.

Focando somente na usinagem do revestimento, verificamos que há um acordo com a perfilometria, onde se obtém vales mais profundos e em maior quantidade comparado com os picos, mostrado na Figura 17.

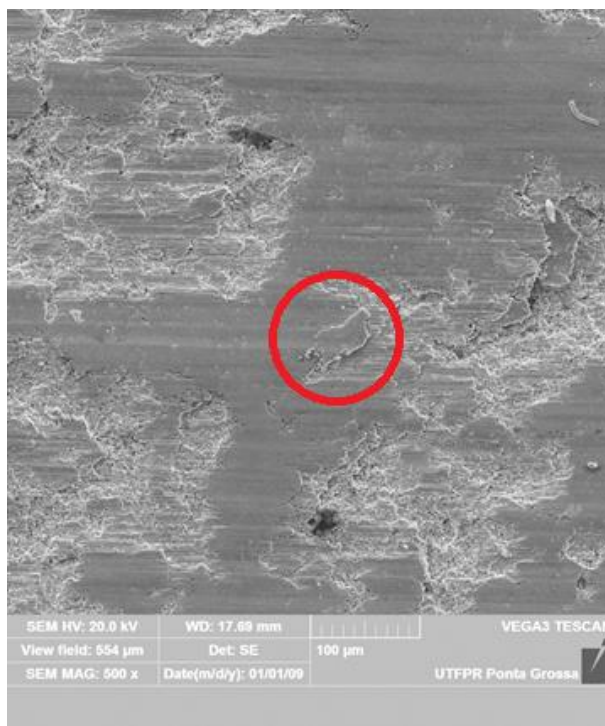
Figura 17 – Área do revestimento usinado com a ferramenta Ball Nose no sentido Concordante com um aumento de a) 100 vezes b) 200 vezes c) 300 vezes.



a)



b)



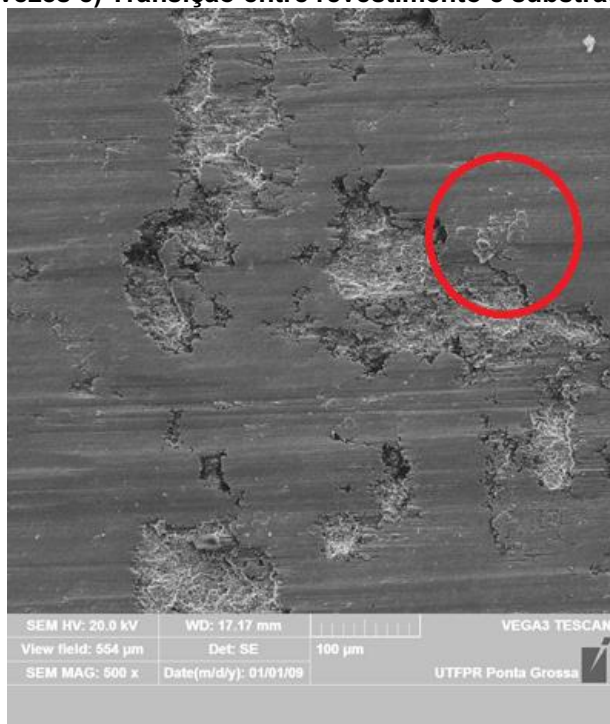
c)

Fonte: Autoria própria.

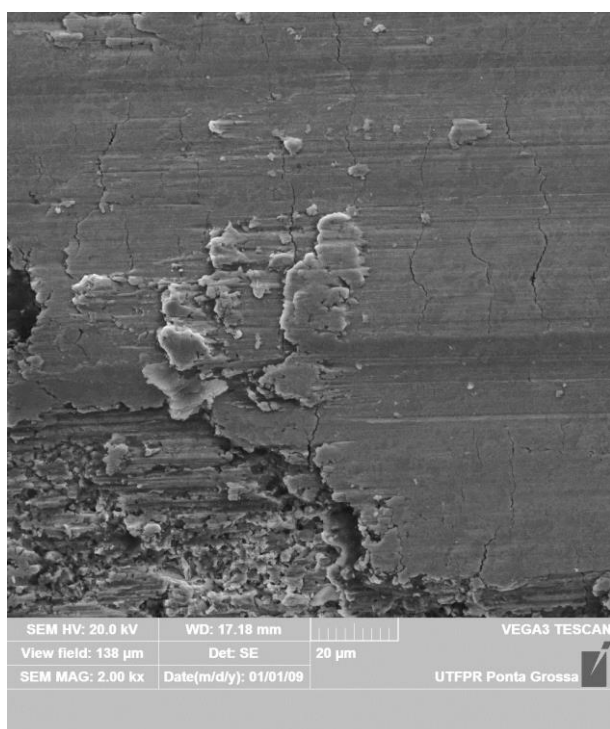
Nessas imagens do MEV da Figura 17, verifica-se a grande quantidade de vales contidos na superfície, na Figura 17c, consegue visualizar melhor esses vales, verifica-se um arracamento lamelar no processo de usinagem e em alguns pontos uma deposição de material junto com um arrastamento, o que junto com a perfilometria demonstra a pequena quantidade de picos sendo demonstrados pelas lamelas arrancadas, que posteriormente no fluxo da usinagem, são depositadas/aderidas na superfície.

Na Figura 18, temos algumas imagens que mostram mais sobre essa deposição durante a usinagem das lamelas que são arrancadas no processo.

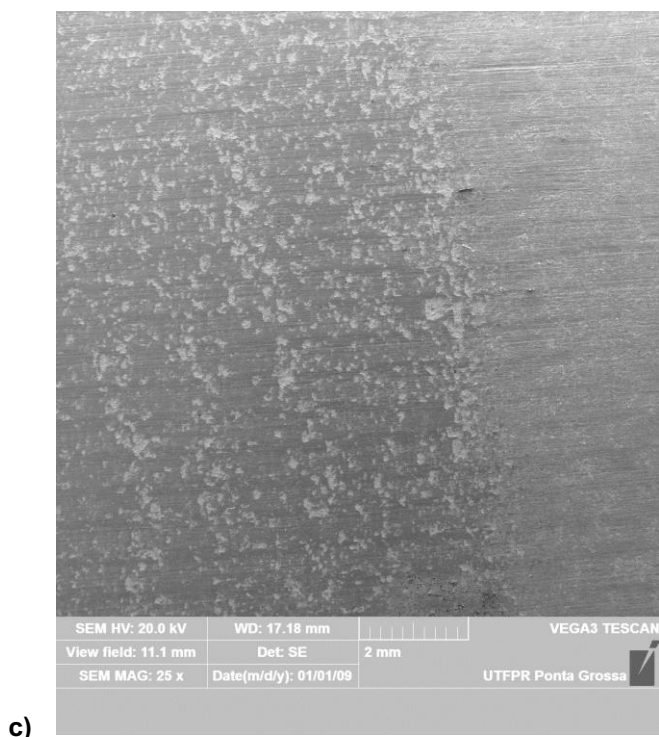
Figura 18 – Áreas do revestimento usinado com a ferramenta Ball Nose no sentido Zig Zag a) 500 vezes b) 2000 vezes c) Transição entre revestimento e substrato usinados



a)



b)



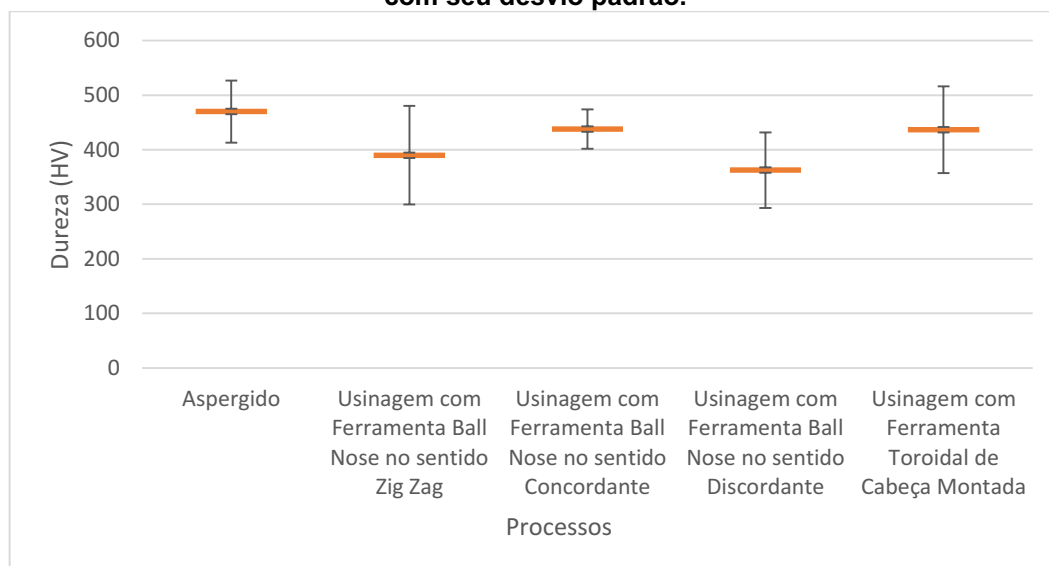
Fonte: Autoria própria.

Observando a Figura 18a e a Figura 18b, consegue-se localizar uma aderência do revestimento usinado na superfície com um tamanho maior comparado com as outras aderências, mostrando um amassamento devido ao processo de usinagem, no qual é a forma com que a lamela acaba se aderindo novamente a superfície. Na Figura 18c conseguimos visualizar a transição da superfície entre o revestimento usinado e o substrato usinado, percebendo que no limite de transição há um grande acúmulo de material, voltando novamente ao perfilmetro, onde mostrava um acúmulo de material nessa transição.

4.2.4 Microdureza

Observa-se na Figura 19 os resultados obtidos nos ensaios de microdureza nos diversos processos de usinagem em que não se teve um deslocamento superficial.

Figura 19 – Resultados de Microdureza em Vickers de acordo com cada etapa dos processos com seu desvio padrão.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Figura 19, que todos os resultados de microdureza das amostras usinadas estão com valores próximos ou para baixo do que a amostra somente com aspersion, isto pode ter ocorrido devido que o processo de usinagem pode ter causado microtrincas durante o processo, mas será necessários mais estudos aprofundados sobre o assunto para uma definição mais clara.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nos diferentes processos de usinagem realizado pelos ensaios de imagem (MEV e o Perfilometro) e microdureza, chegamos as seguintes conclusões.

1. A recomendação na usinagem em aspersion térmica é a não utilização de ferramentas sem raios, nas quais o raio nulo ou pequeno (menor que 1mm) causa grandes tensões no revestimento, gerando trincas e o deslocamento do revestimento.
2. O parâmetro de profundidade de corte na usinagem em revestimentos aspergidos é ser o mais superficial possível, devido que grandes profundidades de corte geram maior tensão no revestimento, podendo obter um deslocamento.

3. Devido a estrutura lamelar do revestimento aspergido, no processo de usinagem, essas lamelas são arrancadas, gerando grandes vales no processo de usinagem, e essas mesmas lamelas arrancadas acabam entrando no fluxo de usinagem, sendo que algumas dessas lamelas acabam aderindo novamente na superfície por um amassamento da ferramenta sobre a superfície, dando uma superfície com grandes quantidades de vales e poucos picos espalhados pela superfície.
4. A rugosidade da usinagem sobre o revestimento aspergido não tem um padrão a ser obtido, variando de acordo com o processo e o sentido de usinagem, sendo que a rugosidade pode ser obtida com melhores resultados com uma menor profundidade de corte, como é o caso da Ball Nose Discordante, ou pode ser obtido bom valores em grandes profundidades de corte caso não haja o deslocamento, como é o caso da Ball Nose no sentido Zig Zag.
5. Comparando as ferramentas Ball Nose Metal Duro e a Toroidal de Cabeça Montada Revestida, a toroidal obteve melhores resultados para a superfície usinada revestida, devido ao revestimento, que tem uma maior resistência ao desgaste, diminuindo o processo erosivo que as lamelas arrancadas no processo de usinagem acabam formando, além de não aumentar a temperatura da peça e facilitar esse desgaste.
6. Nos resultados de microdureza, após todos os processos de usinagem, se tem uma microdureza no revestimento menor quando comparado com o revestimento antes da usinagem, para mais definições do decaimento da microdureza precisa de um estudo mais específico e aprofundado.

De forma geral, se verifica que a aspensão térmica pode ser usinada com ferramentas, sendo elas com um raio de curvatura alto e preferencialmente revestido, em profundidade de cortes pequenos, o suficiente para nivelamento da superfície, assim tendo uma menor taxa de material retirado, tendo uma menor influência das lamelas arrancadas sobre a usinagem, tanto na superfície do revestimento, com lamelas aderidas na superfície, como a interação das lamelas com a ferramenta, como abrasão por exemplo, para se obter melhores resultados da usinagem.

6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões de continuidade deste estudo para futuras pesquisas, tais como estudo do comportamento da usinagem em revestimento por chama de alta velocidade com variação do raio da ferramenta, estudo dos motivos das formações das trincas no processo de usinagem no revestimento aspergido por chama de alta velocidade, influencia da profundidade de corte no processo de usinagem no revestimento por chama de alta velocidade.

REFERÊNCIAS

AZAD, M.; AVIN, A. Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review. **Proceedings of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX**, n. January, p. 1–9, 2019.

BATISTA, M.F. **Estudo da Rugosidade de Superfícies Planas Usinadas por Fresas de Topo Esférico**. São Carlos. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Carlos 2006.

Bertuol, K. **ESTUDO DO EFEITO SINÉRGICO CAVITAÇÃO/EROSÃO EM REVESTIMENTOS DE CARBONETO DE CROMO E TUNGSTÊNIO DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA DE ALTA VELOCIDADE**. Ponta Grossa. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2020.

CHU, C. et al. An optimized fringe generator of 3D pavement profilometry based on laser interference fringe. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 136, n. April, p. 106142, 2021.

CLAUSS, B. et al. Influence of the cutting parameters on the surface properties in turning of a thermally sprayed AlCoCrFeNiTi coating. **Procedia CIRP**, v. 87, p. 19–24, 2020.

DE LACALLE, L. N. L. et al. Turning of thick thermal spray coatings. **Journal of Thermal Spray Technology**, v. 10, n. 2, p. 249–254, 2001.

DING, K.; SASAHARA, H. Study on the machining of iron-based thermal spray coating for sleeveless engine cylinder. **Advanced Materials Research**, v. 472–475, p. 991–996, 2012.

FUCHSOVÁ, G.; LOFAJ, F.; VLADIMÍR, S. The effect of surface roughness on nanoindentation. **Chemicke Listy**, v. 105, n. 17, p. 131–146, 2011.

INKSON, B. J. **Scanning Electron Microscopy (SEM) and Transmission Electron Microscopy (TEM) for Materials Characterization**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2016.

LI, C.; WANG, D.; KONG, L. Application of Machine Learning Techniques in Mineral Classification for Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS) Images. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 200, p. 108178, 2021.

LI, M.; CHRISTOFIDES, P. D. Multi-scale modeling and analysis of an industrial HVOF thermal spray process. **Chemical Engineering Science**, v. 60, n. 13, p. 3649–3669, 2005.

LIBORIUS, H. et al. Influence of the finish-machining by turning and diamond smoothing on the tribological properties of Fe₁₇Cr₂Ni_{0.2}C thermally sprayed coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 405, n. December 2020, p. 126731, 2021.

MACHADO, Álisson R.; COELHO, Reginaldo T.; ABRÃO, Alexandre M. Teoria da usinagem dos materiais. Editora Blucher, 2015. 9788521208440. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521208440/>. Acesso em: 09 mar. 2022.

Mitsubishi Materials. Ferramentas de corte. **Datasheet**. 2020 - 2021. Disponível em: < http://www.mitsubishicarbide.com/application/files/5915/8277/8714/catalog_c009z_full.pdf > . Acesso em 03/07/2022.

OERLIKON, METCO. Material Product Data Sheet Chromium Carbide – 25% Nickel Chromium PowderS. **Datasheet**. 2019. Disponível em: https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:DtKTpmPUjjcJ:https://www.oerlikon.com/ecoma/files/DSM-0287.0_CrC-Ni20Cr_Blend.pdf%3Fdownload%3Dtrue+%&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br. Acesso

em 24/08/2021.

OKSA, M. et al. Optimization and characterization of high velocity oxy-fuel sprayed coatings: Techniques, materials, and applications. **Coatings**, v. 1, n. 1, p. 17–52, 2011.

PICAS, J. A. et al. Effect of oxygen/fuel ratio on the in-flight particle parameters and properties of HVOF WC-CoCr coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 205, n. SUPPL. 2, p. S364–S368, 2011.

SALVI, J. et al. A state of the art in structured light patterns for surface profilometry. **Pattern Recognition**, v. 43, n. 8, p. 2666–2680, 2010.

SRINATH, M. K. et al. Micro-structural, physical and tribological properties of HVOF sprayed (TiC + Cr₂O₃) composite coatings. **Materials Today: Proceedings**, n. xxxx, 2020.

SU, X.; CHEN, W. Fourier transform profilometry: A review. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 35, n. 5, p. 263–284, 2001.

TAKEDA, M.; MUTOH, K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. **Applied Optics**, v. 22, n. 24, p. 3977, 1983.

TAKIMI, A. S. Obtenção de superligas NiCrAlY nanoestruturais por moagem de alta energia e sua aplicação por aspensão térmica hipersônica (Hvof). **Dissertação De Mestrado**, 2004.

VASHISHTHA, N. et al. Microstructural characterization and wear behaviour of High Velocity Oxy-Fuel sprayed Cr₃C₂-25NiCr coating. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 9, p. 17686–17693, 2018.

VERDON, C.; KARIMI, A.; MARTIN, J. L. Microstructural and analytical study of thermally sprayed WC-Co coatings in connection with their wear resistance. **Materials Science and Engineering A**, v. 234–236, p. 731–734, 1997.

XIE, M. et al. Influence of process parameters on high velocity oxy-fuel sprayed Cr₃C₂-25%NiCr coatings. **Coatings**, v. 7, n. 7, 2017.

ANEXO A – Publicação no The 12th Tooling Conference & Exhibition, Tooling 2022, 25-27 de Abril de 2022, Orebro/Sweden, pag 442 – 449.



12th
TOOLing2022
Conference & Exhibition

The 12th Tooling Conference & Exhibition, Tooling 2022

[25 - 27
April 2022]
Örebro/Sweden

[E-BOOK]

TOOL STEEL PRODUCTION, PROCESSING, MACHINING & POLISHING

EFFECT OF THE SLAG COMPOSITION ON THE PROCESS BEHAVIOR, ENERGY CONSUMPTION AND NONMETALLIC INCLUSIONS DURING ELECTRO-SLAG-REMELTING.....	427
<u>Reinhold Schneider</u> , Valentin Wiesinger, Siegfried Gelder, Gerhard Reiter	
ABRASIVE WEAR MECHANISM BASED INTERACTIVE FRICTION MODEL FOR MACHINING	435
<u>Mozammel Mia</u> , Xiao Yang, Huifeng Shi, Denis J. Politis, LiLiang Wang	
ANALYSIS OF THE MACHINING PROCESS IN HVOF COATING FOR MATERIAL SELECTION FOR ALUMINUM DIE CASTING MOLD.....	441
<u>Solmar J. Chagas</u> , Anderson G.M. Pukaszewicz, Péricles S. Cancian, Marcelo V. Carvalho, Milton L. Poli	

TOOLING APPLICATIONS

MARTENSITIC STAINLESS STEELS FOR FOOD CONTACT APPLICATIONS	450
<u>Horst Zunko</u> , Christoph Turk	
INVESTIGATION ON A QUASI-INCREMENTAL TOOL CONCEPT TO MANUFACTURE FUNCTIONAL COMPONENTS WITH SHEET THICKNESS GRADIENT	461
<u>Andreas Fietzel</u> , Michael Lechner, Marion Merklein	
ACTIVE INSERTS, A PLUG-AND-PLAY SOLUTION FOR INCREASING MECHANICAL PROPERTIES AND REDUCING POROSITY IN LPDC-ED PARTS	469
<u>Simon Frank</u> , Lukas Kiessling, Stefan Gneiger, Rudolf Gradinger, Ernst Neunteufl, Federico Garcia-Bragado, Stefan Leuders	
SPECIFICATION OF A DIE DEMONSTRATOR FOR AUTOMOTIVE CLASS A SURFACES.....	477
<u>Natalia Ingrid da Costa D'Ávila</u> , André Dorigueto Canal, André de Lima, Aline da Conceição Mathews,Emília Villani, Alfredo Faria, Denis Paezane, Adilson Matias, Edu Back, Jean Firmino, Saulo Soares, Jose Silva, Silvio Alano	
DIRECT LASER METAL DEPOSITION OF AISI H13 CLADDING ON COPPER-BERYLLIUM ALLOY SUBSTRATE THROUGH A STAINLESS-STEEL BUFFER LAYER STRATEGY	491
<u>Zhao Zhao</u> , Matteo Perini, Paolo Bosetti, Massimo Pelizzari	
VERSATILE TOOL DESIGN FOR A TUMBLING SELF-PIERCING RIVETING PROCESS	499
<u>Simon Wituschek</u> , Michael Lechner	
EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF COLD FORMED MULTI PIN STRUCTURES USING A MULTI-ACTING TOOL DESIGN	507
<u>David Römisch</u> , Marion Merklein	

WEAR RESISTANCE

NEW WEAR AND TEMPERATURE RESISTANT CO-BASED METAL MATRIX COMPOSITES FOR TOOLING APPLICATIONS	516
<u>Philipp Kluge</u> , Horst Hill, Enrico Prati	
INVESTIGATING THE SURFACE DEGRADATION AND WEAR MECHANISMS OF UNCOATED AND PVD-COATED CEMENTED CARBIDE DIES IN STEEL WIRE DRAWING	523
<u>Kumar Babu Suresh</u> , Joakim Larsson, Mikael Olsson	

Analysis of the machining process in HVOF coating for Material selection for Aluminum Die Casting Mold

Solmar I. Chagas, Anderson G.M. Pukaszewicz**, Péricles S. Cancian, Marcelo V. Carvalho, Milton L. Poli*

Federal Technology University

3165 Av. Sete de Setembro, Curitiba, Paraná, BR

* solmar_i@outlook.com **Anderson.pukaszewicz@gmail.com

Abstract – The objective of this work is to verify the machining process behavior of the Cr3C2 25NiCr HVOF coating. Which can be used for the automotive, aerospace industries and naval, improving the surface finish of the thermal spray. The coating is machined with a 12mm diameter carbide ball nose tool, in which the tool is parallel to the surface, with a cutting speed of 100m/min, and a feed of 0.1mm/revolution, where the machining is carried out at an angle, between 1° and 2°, from the top of the coating to the substrate, in the zig zag, concordant and discordant directions. Before and after machining optical profilometry and SEM tests were performed on the samples. Optical profilometry and SEM observed that the surface showed a similar Ra, Rp and Rv, than substrate. A significant difference was observed on the Rv value, where the roughness the average valleys in the coating is much higher than substrate. This occurred because the machining process removes some lamellas from the sprayed coating.

Keywords: HVOF, coating, machining, profilometry, SEM.

1. Introduction

The injection of aluminum in molds is used very commonly in the manufacture of several components of parts, mainly in automotive and aerospace areas [1], [2], with H13 type tool alloys being the most used for making molds, containing these bonds at high temperatures that present brittle, which have problems with their durability [3]. From your resistance tools from your resistance and resistance, a coating to improve your resistance, resistance from a resistance from your resistance, resistance from a resistance from resistance, etc. [4], [5]. Main is the formation of the bond of components to thermal resistance, formation of corrosion between the casting, the contact in contact with aluminum and the contact of aluminum with the corrosion and metals, causing the competition originated from other castings of the intermetallic and an adhesion between the produced part and the mold [3], [6], [7].

Coating layer indicated in this work is by spraying with a high speed flame (HVOF), regardless of whether the material inserted into the gun is in a semi-molten state, with which, as it was in high performance by the gun, at high speed and high temperature, whether they are the surface that is desired to be coated, forming the coating, being based on lamellar bonds interspersed with pores [5], [8], [9]. The material to make the coating was Cr3C2 25NiCr, being normally used to resist wear or corrosion [10], [11].

Machining comes in this process for a dimensional and finishing control of the coated molds [12], [13]. Some problems are obtained when machining in coatings such as perged, due to the high temperature of the coating, such as high temperature, adhesion, abrasion, which end up interfering with the finish of the coating, being indicated in the machining process to make a problem and lower speeds of cutting, as tools that have less wear are the adjusted [5], [9], [13], [14].

So, in this work we will evaluate the surface of the Cr₃C₂ 25NiCr sprayed coating in a morphological way, from images taken by porometry and SEM.

2. Methods

The thermal spray was applied to AISI 1045 steel, with Cr₃C₂ 25NiCr alloy, the powder coating before spraying has a spheroid morphology with a density of 2.7g/cm³, with the main purpose of increasing corrosion and wear resistance, in **Figure 1** it is possible to see its morphology [15].

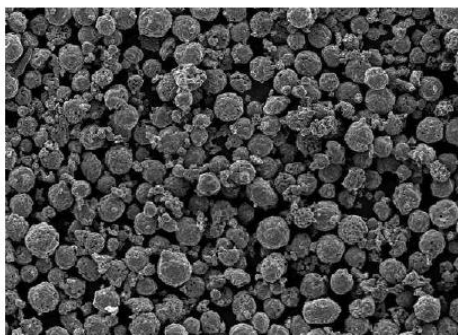


Figure 1. Image obtained by SEM of Cr₃C₂ 25NiCr WOKA 7200 of its morphology.

Spraying was performed on samples measuring 49mm x50mm x84mm, using the METCO Diamond Jet Gas Fuel HVOF – DJ2700 system, where the parameters used are shown in **Table 1**.

Table 1. HVOF spray process parameters.

Parameters	Value
Oxygen Pressure (MPa)	0,97
Oxygen Flow (l/min)	253
fuel/oxygen ratio	0,21
Deposition speed (mm/s)	1260
Feed rate (g/min)	40
Sprinkling distance (mm)	250

The machining processes were carried out on the samples with a cutting speed of 100 m/min, with a feed of 0.1 mm/rotation and an inclination between 1 to 2 degrees, with an inclined machining going from the top of the coating to the sample substrate. , having a maximum cutting depth of 1mm. The tools used are Ball Nose with a diameter of 12 mm of carbide with 2 teeth, being machined in the con-cordant, discordant and zig zag directions. After machining the samples, image tests were performed with profilometry and SEM.

3. Results

Initially, in the thermal spray, the SEM test was carried out to see the initial appearance of the samples, verifying in **Figure 2**, the randomness of the deposition that occurred in the thermal spray due to the deposition process method, forming a high visual difference between the peaks and valleys and checking the deposition of droplets forming the lamellar structure.

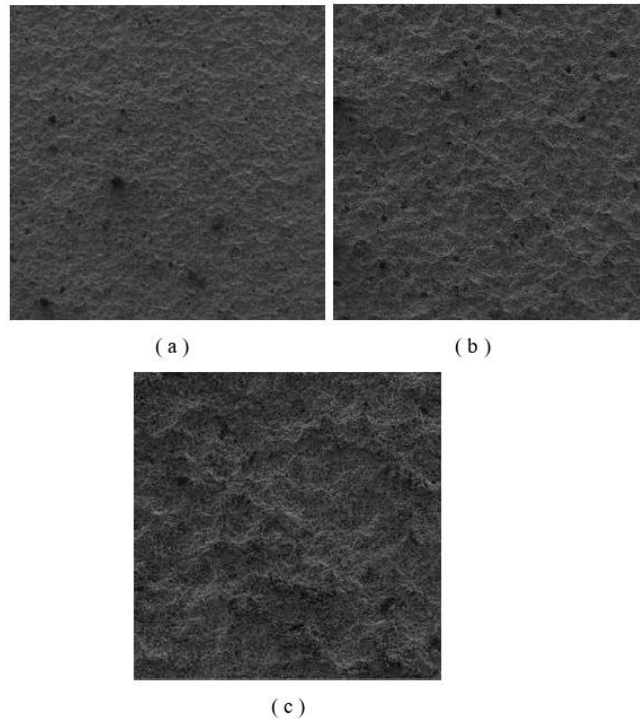


Figure 2. Image obtained by SEM of the Cr₃C₂ 25Ni Cr coating with a) 100x magnification b) 200x c) 500x magnification.

Making the surface topography after machining, from profilometry, we obtained the surface roughness data of the sample, some analyzed data such as Ra, Rt, Rz, Tp and Rv are shown in **Table 2**.

Table 2. Surface roughness data of samples sprayed with Cr₃C₂ 25NiCr by the HVOF method.

Roughness Parameters	Coating		
	Zig Zag	Concordant	Discordant
Ra	1,58	2,49	1,8
Rt	21,65	32,4	25,1
Rp	7,31	11,6	8,73
Rv	10,56	15	12,5
Rz	17,85	26,6	21,2

Analyzing the Ra first, we verified that the machining in the zig zag direction is what obtains the best surface finish. Checking the Rv with Rp, it is noticed that the Rp is always smaller when compared to the Rv, showing that the valleys are predominant on the machined surface, which may be caused by the lamellar structure that can be completely ripped in the machining process, causing greater numbers and deep valleys.

In the Concordant sample, where the highest value of Ra is obtained, then we do the surface topography in it due to the greater ease of observing the phenomena. In **Figure 3**, the to-

ography performed on a 3mm x20mm surface is shown, taking a transition region where the tool passes from the end of the coating to the substrate.

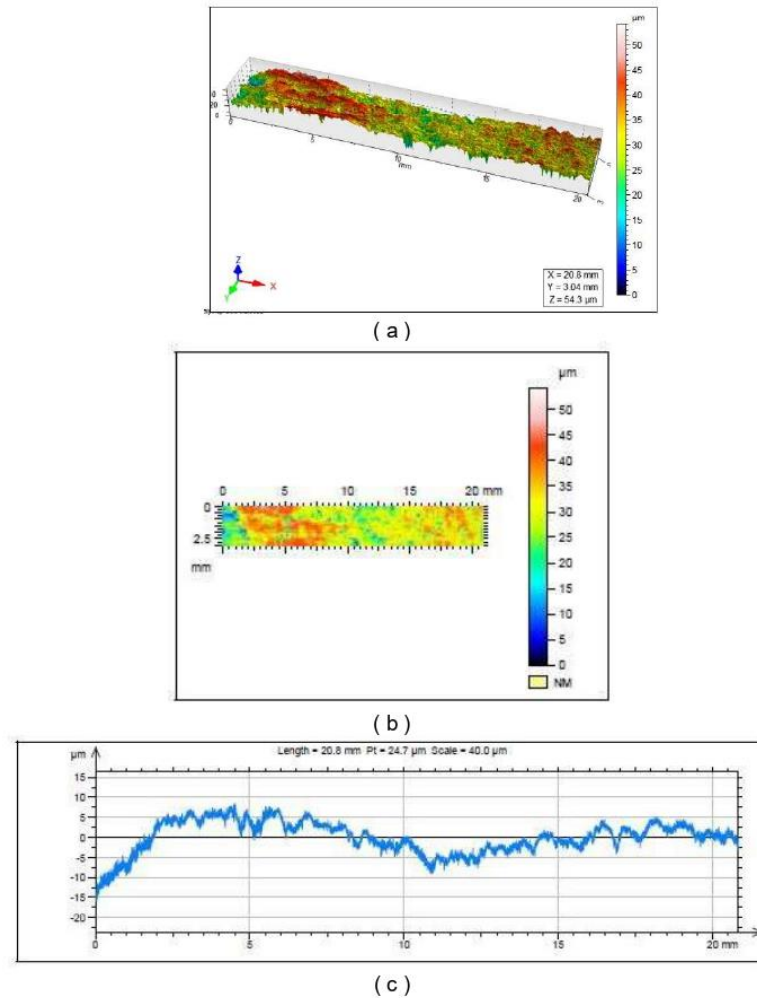


Figure 3. Image of the surface topography obtained by the profilometer of the Cr₃C₂ 25Ni Cr coating machined with Ball Nose in the Concordant direction, the images being a) 3D b) 2D c) Graphic.

Compared to the Images in Figure 3, a linear behavior of the machining on the substrate can be seen, due to the angulation of the machining, which would be from 0 to 4mm approximately observed in the graph, from 4mm to 20mm is the region where the coating was machined, showing a greater variation when compared to the substrate, both in the amount of valleys and peaks, as in the surface standardization. In addition, there appears to be an accumulation of material in the transition region between the substrate and the coating.

Continuing the analysis of the concordant sample, we make a point analysis on the machined coating and the machined substrate, to compare the two regions, in **Figure 4** a 2D image of a 3mm x3mm surface of each region is observed.

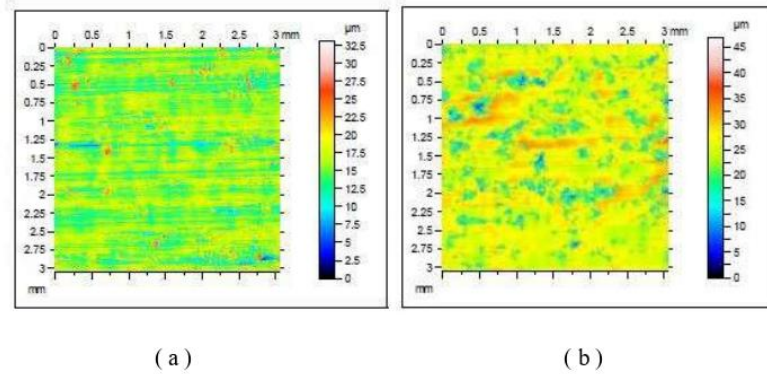
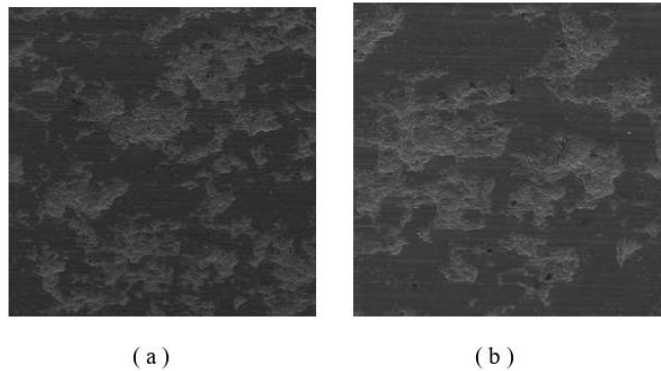
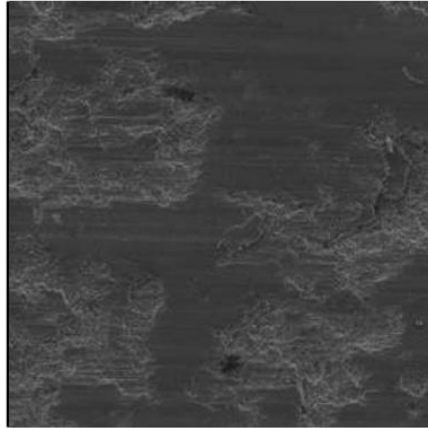


Figure 4. Image of the surface topography obtained by the Profilometer of the Cr3C2 25Ni Cr coating machined with Ball Nose in the Concordant direction, being the images a) Substrate b) Coating

In Figure 4, we were able to analyze the number of existing valleys in large numbers and great depths in the machined coating comparing it with its machined substrate, showing the surface difference shown in Figure 3c, strengthening that these valleys are generated due to the lamellar structure formed by the spraying process, where the lamellae are completely removed.

In the SEM tests, some images of the surface of the coating machined in the concordance direction were taken, as shown in **Figure 5**.



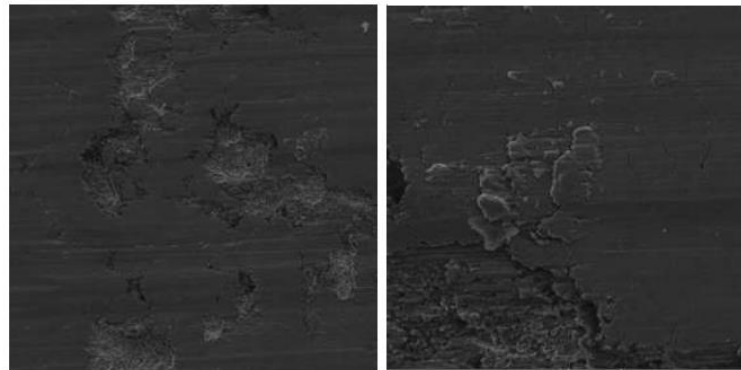


(c)

Figure 5. Image performed in the SEM of the coating machined by Ball Nose in the concordance direction with an increase of a) 100 times b) 200 times c) 300 times.

In Figure 5, it is possible to visualize the large amount of valleys contained in the surface, and when you have a closer approximation, you can visualize the ripped lamellae, in addition to some points of deposition of material with a dragging of some lamellae that ended up adhering again to the surface. surface during the machining flow, which demonstrates the large difference in peaks and valleys, in which a small percentage of particles are adhered back to the surface of the ones that were pulled out.

In **Figure 6**, we can see in the machining process in the zig zag direction some deposition points with more emphasis.



(a)

(b)

Figure 6. Image performed in the SEM of the coating machined by Ball Nose in the zig zag direction with an increase of a) 500 times b) 1000 times.

In Figure 6, we were able to verify a greater adhesion, compared to others found, and in it we verified the adhesion by kneading due to the machining process. Also in **Figure 7**, we were able to verify an amount of adhesion on a larger scale in the transition when the tool passes from the coating to the machined substrate, thus demonstrating the apparent accumulation of material found in the profilometry in this region.

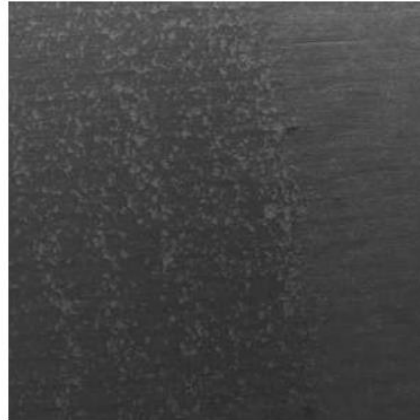


Figure 7. Image performed in the SEM of the coating machined by Ball Nose in the zig zag direction in the transition region between the machined coating and the machined substrate caused due to the angulation in the machining.

4. Conclusion

From the results obtained in the machining process by the SEM and Profilometry tests, we reached the following conclusions, that due to the lamellar structure of the sprayed coating, in the machining process, these lamellae are pulled out, generating large valleys in the machining process. machining, and these same ripped lamellae end up entering the machining flow, and some of these lamellae end up adhering again to the surface by a kneading of the tool on the surface, giving a surface with large amounts of valleys and few peaks spread across the surface. surface.

References

- [1] K. H. Lin, Y. C. Lin, and S. T. Lin, "Effects of reduction atmosphere and nano carbon powder addition on the deoxidization of injection molded aluminum nitride parts," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 201, no. 1–3, pp. 701–705, 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.140.
- [2] A. Pereira, P. Hernández, J. Martinez, J. A. Pérez, and T. G. Mathia, "Surface topographic characterization for polyamide composite injection molds made of aluminum and copper alloys," *Scanning*, vol. 36, no. 1, pp. 39–52, 2014, doi: 10.1002/sca.21083.
- [3] J. Sun, P. Shen, and D. Zeng, "High Wear-Resistant Aluminum Matrix Composite Layer Fabricated by MIG Welding with Lateral B4C Powder Injection," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 27, no. 11, pp. 5700–5708, 2018, doi: 10.1007/s11665-018-3672-4.
- [4] M. K. Srinath, J. Nagendra, H. V. Puneeth, and M. S. Ganesha Prasad, "Micro-structural, physical and tribological properties of HVOF sprayed (TiC + Cr₂O₃) composite coatings," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2020, doi:

- 10.1016/j.matpr.2020.10.342.
- [5] C. Verdon, A. Karimi, and J. L. Martin, "Microstructural and analytical study of thermally sprayed WC-Co coatings in connection with their wear resistance," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 234–236, pp. 731–734, 1997, doi: 10.1016/s0921-5093(97)00377-8.
- [6] M. Hartlieb and K. Anderson, "Die Casting," *Alum. Sci. Technol.*, pp. 175–192, 2018, doi: 10.31399/asm.hb.v02a.a0006525.
- [7] C. A. C. Sequeira, "Corrosion in Molten Metals," *High Temp. Corros.*, pp. 325–339, 2018, doi: 10.1002/9781119474371.ch14.
- [8] A. S. Takimi, "Obtenção de superligas NiCrAlY nanoestruturais por moagem de alta energia e sua aplicação por aspersão térmica hipersônica (Hvof)," *Diss. Mestr.*, 2004.
- [9] M. Li and P. D. Christofides, "Multi-scale modeling and analysis of an industrial HVOF thermal spray process," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 60, no. 13, pp. 3649–3669, 2005, doi: 10.1016/j.ces.2005.02.043.
- [10] N. Vashishtha, S. G. Sapate, B. Jyoti Sahariah, and P. Bagde, "Microstructural characterization and wear behaviour of High Velocity Oxy-Fuel sprayed Cr₃C₂-25NiCr coating," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 17686–17693, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.089.
- [11] M. Xie *et al.*, "Influence of process parameters on high velocity oxy-fuel sprayed Cr₃C₂-25%NiCr coatings," *Coatings*, vol. 7, no. 7, 2017, doi: 10.3390/coatings7070098.
- [12] L. N. L. De Lacalle, A. Lamikiz, M. H. Fernandes, A. Gutiérrez, and J. A. Sánchez, "Turning of thick thermal spray coatings," *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 249–254, 2001, doi: 10.1361/105996301770349349.
- [13] H. Liborius, T. Grund, A. Nestler, G. Paczkowski, A. Schubert, and T. Lampke, "Influence of the finish-machining by turning and diamond smoothing on the tribological properties of Fe₁₇Cr₂Ni_{0.2}C thermally sprayed coatings," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 405, no. December 2020, p. 126731, 2021, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126731.
- [14] B. Clauß, H. Liborius, T. Lindner, M. Löbel, A. Schubert, and T. Lampke, "Influence of the cutting parameters on the surface properties in turning of a thermally sprayed AlCoCrFeNiTi coating," *Procedia CIRP*, vol. 87, pp. 19–24, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.02.015.
- [15] Metco 443, "Material Product Data Sheet Chromium Carbide – Nickel Chromium Powder Blends," vol. 2, pp. 2–7, 2014.