

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**HENRIQUE EDUARDO DE BOER**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TENSÃO RESIDUAL NA  
RESISTÊNCIA À CAVITAÇÃO DE REVESTIMENTOS FeMnCrSiB  
DEPOSITADOS POR HVOF**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2017**

**HENRIQUE EDUARDO DE BOER**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TENSÃO RESIDUAL NA  
RESISTÊNCIA À CAVITAÇÃO DE REVESTIMENTOS FeMnCrSiB  
DEPOSITADOS POR HVOF**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz

**PONTA GROSSA**

**2017**



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TENSÃO RESIDUAL NA RESISTÊNCIA À CAVITAÇÃO DE REVESTIMENTOS FEMNCRSIB DEPOSITADOS POR HVOF**

por

**HENRIQUE EDUARDO DE BOER**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 11 de dezembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr.Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz  
Orientador

Prof. Me.Paulo Roberto Campos Alcover Junior  
Membro Titular

Prof.Gabriel Nunes Maia Junior  
Membro Titular

Prof.Dr. Marcos Eduardo Soares  
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de  
Carvalho  
Coordenador do Curso

– O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

## **AGRADECIMENTOS**

Dedico este trabalho, primeiramente a Deus por ter me dado saúde e força e perseverança para superar as dificuldades.

A minha família, em especial minha mãe e minha irmã, que sempre estiveram do meu lado durante todo o curso, me apoiando e incentivando nessa caminhada.

A meu orientador, professor Anderson, o qual foi o maior responsável pela minha caminhada na vida acadêmica, em todos os anos de iniciação científica e na elaboração desse trabalho.

Aos meus amigos de faculdade, Kátia, Gabriel, Michele e Kauan, que desde o início da faculdade, sempre estiveram presentes em todos os momentos da minha vida pessoal e acadêmica.

E por fim, a esta universidade, todo o corpo docente, e auxiliares, pois sem eles, nada disso poderia ser realizado.

## RESUMO

BOER, Henrique Eduardo de. **Avaliação da influência da tensão residual na resistência a cavitação de revestimentos FeMnCrSiB depositados por HVOF**. 2017. 53. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017

**Resumo** - Devido enorme impacto econômico do desgaste na indústria, desenvolveu-se processos de aspersão térmica, buscando reduzir esse desgaste a partir da aplicação revestimentos, mais resistentes ao desgaste, nas superfícies dos materiais sujeitos a condições degradantes. Um dos processos de aspersão térmica cada vez mais vem se utilizando, é o processo de HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), que é realizado com baixas temperaturas e altas velocidades das partículas. Uma das formas de desgaste mecânico, é a erosão causada por cavitação, que ocorre comumente em turbinas hidráulicas, bombas, e outros equipamentos em contato com fluidos. O presente trabalho busca analisar a influência da modificação de parâmetros, durante o processo de aspersão por HVOF, na formação de tensões residuais e sua influência na resistência à cavitação. Buscando assim, fazer uma correlação entre as propriedades mecânicas obtidas no revestimento aspergido, com as variações nos parâmetros do processo, mostrando sua influência na perda de massa por cavitação. Primeiramente, analisando a influência da velocidade das partículas, constatou-se que maiores valores de tensão residual compressiva, foram obtidos, com menores distâncias de aspersão. Observou-se uma por fim, uma correlação, do aumento da tensão residual compressiva do revestimento, com o aumento da dureza do mesmo. E já no aspecto da perda de massa por cavitação, também se verificou que com maior tensão residual compressiva, melhores os resultados da análise.

**Palavras-chave:** HVOF; Aspersão Térmica; Cavitação;

## ABSTRACT

BOER, Henrique Eduardo de. **Evaluation of the influence of the residual stress in the resistance to cavitation FeMnCrSiB coatings deposited by HVOF.** 2017. 53. Work completion of Bachelor in Mechanical Engineering - Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2017.

**Abstract** - Due the huge economic impact of wear in industry, thermal spray processes were developed seeking to reduce the wear from applying more resistant coatings, on the surfaces of materials under degrading conditions. One of the thermal spray processes which has been increasingly being used, it is the process of HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), which is carried out at low temperatures and high particle velocities. One of the types of mechanical wear is the erosion caused by cavitation, which occurs commonly in hydraulic turbines, pumps, and other equipment in contact with fluids. This study aims to analyse the influence of parameter settings modification during the process of HVOF spraying, in its cavitation resistance. Seeking thereby to make a correlation between the mechanical properties obtained in the coating, with the variations in the parameters, showing its influence on weight loss by cavitation. As a result, was found a correlation between the residual stress of the coating, with the loss of aggregate mass cavitation.

**Keywords:** HVOF; Thermal Spray; Cavitation;

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema das pistolas de aspersão nos processos de HVOF –GF (A) e HVOF-LF (B) .....	10
Figura 2 – Desenho esquemático do sensor ICP .....	13
Figura 3 – Estrutura típica de um revestimento de aspersão térmica .....	14
Figura 4 – (a) Momento do colapso de uma bolha de vapor e a região de elevada pressão no meio; (b) formação e colapso das bolhas sob a ponta de um sonotrodo. ....	16
Figura 5 – Velocidade das partículas com variações de parâmetros .....	22
Figura 6 – Temperatura das partículas com a variação dos parâmetros .....	23
Figura 7 – Tensão obtida pelo sensor ICP com a variação dos parâmetros .....	24
Figura 8 – Tensão de Deposição medida pelo sensor ICP com a variação de parâmetros .....	24
Figura 9 – Tensão Térmica medida pelo sensor ICP com a variação de parâmetros .....	25
Figura 10 – Tensão Residual medida pelo sensor ICP com a variação de parâmetros .....	26
Figura 11 – Relação entre a tensão residual e velocidade das partículas .....	26
Figura 12 – Seção transversal da Amostra 01, com aplicação de 200x – Microscópio Óptico .....	28
Figura 13 – Seção transversal da Amostra 01, com ampliação de 1000x – MEV .....	28
Figura 14 – Seção transversal da Amostra 01, com ampliação de 3000x – MEV .....	28
Figura 15 – Seção transversal da Amostra 02, com ampliação de 200x – Microscópio Óptico .....	29
Figura 16 – Seção transversal da Amostra 02, com ampliação de 1000x – MEV .....	30
Figura 17 – Seção transversal da Amostra 02, com ampliação de 3000x – MEV .....	30
Figura 18 – Seção transversal da Amostra 03, com ampliação de 200x – Microscópio Óptico .....	31
Figura 19 – Seção transversal da Amostra 03, com ampliação de 1000x – MEV .....	31
Figura 20 – Seção transversal da Amostra 03, com ampliação de 3000x – MEV .....	31
Figura 21 – Seção transversal da Amostra 04, com ampliação de 200x – Microscópio Óptico .....	32
Figura 22 – Seção transversal da Amostra 04, com ampliação de 1000x – MEV .....	33
Figura 23 – Seção transversal da Amostra 04, com ampliação de 3000x – MEV .....	33
Figura 24 – Seção transversal da Amostra 05, com ampliação de 200x – Microscópio Óptico .....	34
Figura 25 – Seção transversal da Amostra 06, com ampliação de 200x – Microscópio Óptico .....	35
Figura 26 – Seção transversal da Amostra 06, com ampliação de 1000x – MEV .....	35
Figura 27 – Seção transversal da Amostra 06, com ampliação de 3000x – MEV .....	35
Figura 28 – Seção transversal da Amostra 07, com ampliação de 200x – Microscópio Óptico .....	36

Figura 29 – Seção transversal da Amostra 07, com ampliação de 1000x – MEV .....	37
Figura 30 – Seção transversal da Amostra 07, com ampliação de 3000x – MEV .....	37
Figura 31 – Seção transversal da Amostra 08, com ampliação de 200x – Microscópio Óptico .....	38
Figura 32 – Seção transversal da Amostra 08, com ampliação de 1000x – MEV .....	38
Figura 33 - Seção transversal da Amostra 08, com ampliação de 3000x – MEV .....	38
Figura 34 – Gráfico comparativo da porosidade resultante dos revestimentos com a tensão residual .....	40
Figura 35 – Gráfico comparativo da porcentagem de óxidos dos revestimentos com a tensão residual .....	41
Figura 36 – Gráfico comparativo das microdurezas dos revestimentos com a tensão residual.....	42
Figura 37 – Gráfico comparativo da resistência à cavitação dos revestimentos depositados com HVOF a querosene .....	43
Figura 38 – Gráfico comparativo da resistência à cavitação dos revestimentos depositados com metal base CA6NM e ligas comerciais .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição Química da Liga SMA_1NCr, utilizada nos experimentos. .	17
Tabela 2 – Parâmetros utilizados no processo de aspersão das amostras .....	17
Tabela 3 – Tempos dos ensaios de cavitação das amostras .....	19
Tabela 4 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento da Amostra 01 .....	28
Tabela 5 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento da Amostra 02 .....	29
Tabela 6 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento na Amostra 03 .....	31
Tabela 7 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento na Amostra 04 .....	32
Tabela 8 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento na Amostra 05 .....	34
Tabela 9 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento na Amostra 06 .....	35
Tabela 10 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento na Amostra 07 .....	36
Tabela 11 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento na Amostra 08 .....	38

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>9</b>
2.1 PROCESSO DE HVOF.....	9
2.2 PROCESSO DE HVOF LIQUID FUEL.....	10
2.3 MEDIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL POR ICP .....	11
2.4 MORFOLOGIA DE UM REVESTIMENTO ASPERGIDO.....	13
2.5 CAVITAÇÃO .....	14
<b>3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>17</b>
3.1 DEPOSIÇÃO DOS REVESTIMENTOS .....	17
3.2 MEDIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL POR ICP .....	17
3.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	18
3.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS .....	18
3.5 ENSAIO DE CAVITAÇÃO E ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES CAVITADAS.....	19
3.6 ANÁLISE DA SUPERFÍCIE TRANSVERSAL DAS AMOSTRAS.....	20
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>21</b>
4.1 ANÁLISE DA VELOCIDADE E TEMPERATURA DAS PARTÍCULAS.....	21
4.2 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA TENSÃO RESIDUAL DOS REVESTIMENTOS.....	23
4.3 AVALIAÇÃO DA MORFOLOGIA DOS REVESTIMENTOS .....	27
4.3.1 Experimento 01.....	27
4.3.2 Experimento 02.....	29
4.3.3 Experimento 03.....	30
4.3.4 Experimento 04.....	32
4.3.5 Experimento 05.....	33
4.3.6 Experimento 06.....	34
4.3.7 Experimento 07.....	36
4.3.8 Experimento 08.....	37
4.3.9 Comparação entre a Morfologia Resultante dos Experimentos.....	39
4.3.10 Comparação da Porosidade e Porcentagem de Óxidos .....	39
4.4 MICRODUREZA DOS REVESTIMENTOS.....	41
4.5 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CAVITAÇÃO DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS .....	42
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma grande variedade de revestimentos depositados a partir de diferentes processos de aspersão térmica vêm sendo aplicados na indústria com o objetivo de diminuir os efeitos do desgaste, como, por exemplo, a erosão causada pela cavitação, abrasão e corrosão. A resistência ao desgaste destes revestimentos depende principalmente de fatores como a microestrutura, composição química do material, dureza e morfologia do revestimento, o que tem sido muito estudado durante as últimas décadas. Outro fator que interfere diretamente na resistência ao desgaste desses revestimentos é a tensão residual. Por isso, há uma grande importância em avaliar a influência da tensão residual na microestrutura resultante e avaliar os parâmetros de deposição que influenciam na formação da tensão residual nos revestimentos.

O processo de HVOF (High Velocity Oxi-Fuel) vem obtendo os melhores resultados neste quesito devido a sua favorável relação entre as energias cinética e térmica. Porém, ainda não há um entendimento por completo sobre a influência das variáveis do processo na obtenção de revestimentos confiáveis.

Para a análise da formação de tensões residuais durante a deposição de revestimentos aplicados por aspersão térmica, pode-se utilizar o sistema composto por sensor laser que mede a curvatura do corpo de prova, durante e após deposição, em conjunto com software que determina as tensões originadas pelo processo de deposição. Sendo assim, esse sensor possibilita o monitoramento em tempo real das características do processo de aspersão, esta metodologia de medição é apresentada no trabalho de Matejicek e Sampath (2003).

A formação de tensões residuais afeta o comportamento de revestimentos aspergidos sob diferentes formas de desgaste, entretanto, não há estudos que correlacionem a influência dos parâmetros de processo na tensão residual e suas consequências na resistência à cavitação.

A cavitação é um fenômeno caracterizado pela geração e condensação de vapor, em fluidos a alta velocidade, expostos à uma diferença de pressão, formando-se assim bolhas no fluido. A erosão por cavitação é um fator de grande importância ao se tratar de turbinas hidráulicas, uma vez que é o principal fator de degradação desses componentes, afetando seriamente a vida útil e a capacidade de usinas hidroelétricas. Para evitar a ocorrência desse fenômeno, algumas modificações

podem ser feitas, porém existe o inconveniente da redução na eficiência e potência dos equipamentos. Assim, torna-se importante o estudo do reparo das áreas afetadas, visando adoção de materiais com elevada resistência a erosão por cavitação.

Este estudo examina o efeito dos parâmetros de processo de deposição de revestimentos por aspersão térmica HVOF com combustível líquido na formação de tensões residuais, e suas consequências na resistência à cavitação destes revestimentos. A primeira etapa para a realização desta análise é o estudo da influência da distância de deposição, taxa de alimentação e razão de combustível nas características das partículas em voo e nas propriedades dos revestimentos obtidos. A segunda etapa avalia a influência destas características e propriedades na formação das tensões residuais nos revestimentos e, finalmente, a sua relação com a resistência à cavitação desses revestimentos.

## 1.1 PROBLEMA

Qual o efeito da mudança dos parâmetros de processo (Fluxo de Combustível, Distância do Bocal e Fluxo de Pó de Alimentação) na tensão residual final do revestimento, e qual o impacto na resistência a cavitação?

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A cavitação é um fenômeno bastante conhecido e bastante temido pela indústria de geração de energia através de turbinas hidráulicas, por isso, justifica-se o estudo aprofundado sobre técnicas para diminuição do impacto causado por este fenômeno.

Devido a este fato, o estudo de revestimentos resistentes a cavitação se torna relevante, e com isso surge a importância do estudo do efeito da mudança dos parâmetros nas propriedades finais dos revestimentos.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 PROCESSO DE HVOF

O processo de aspersão térmica HVOF (*High Velocity Oxygen Fuel*), de acordo com Takimi *et al.* (2002), dá-se através da combustão de gases (ex. Hidrogênio, Propano) ou líquidos (ex. Querosene) para a deposição de revestimentos metálicos de alta resistência e densidade. Basicamente, o processo HVOF consiste na utilização de uma grande quantidade de combustíveis, que ao serem alimentados em uma câmara de combustão, criam uma chama com alta temperatura e pressão, que faz com que o gás saia a alta velocidade pelo bocal da pistola.

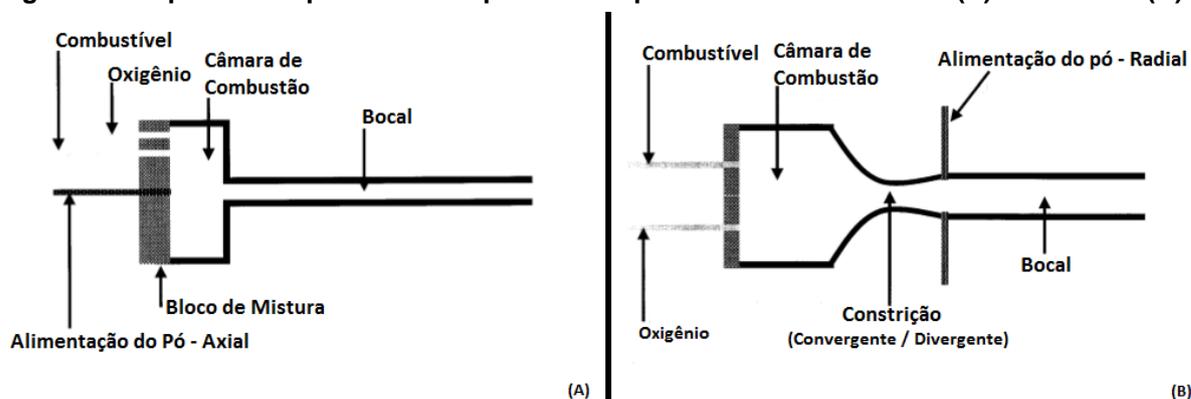
No processo convencional o material aspergido, encontra-se na forma de pó, e quando injetado na câmara de combustão, faz com que suas partículas atinjam velocidades supersônicas (entre 500 m/s e 2000 m/s). Todo esse processo, ocorre em temperaturas relativamente baixas, ao compararmos com outros processos de aspersão, em torno de 2900 °C. Sendo que as partículas ao atingirem o substrato estão em uma condição semifundida. Porém, devido à alta velocidade ao atingir o substrato, os revestimentos resultantes desse processo possuem porosidade muito baixa, geralmente menor que 1%, e uma elevada adesão, além de excelente qualidade nos aspectos de densidade e rugosidade, quando comparados aos outros processos de aspersão, conforme da Wang *et al* (1994).

Zhang *et al.* (2002) descreve que, na sua forma convencional, o processo de HVOF utiliza normalmente combustíveis a gás (HVOF *Gas Fuel*), como Hidrogênio e Propileno. Neste caso, a pistola de aspersão é alimentada simultaneamente pelo gás combustível, e o oxigênio, que são inseridos atrás da câmara de combustão, Figura 1 (A). Já o pó, alimentado de forma axial, na parte traseira da câmara. Assim, após a combustão dos gases, a mistura a alta temperatura, flui através do bocal, saindo posteriormente na forma de jato, em direção ao substrato.

## 2.2 PROCESSO DE HVOF *LIQUID FUEL*

O processo de HVOF-LF (*High Velocity Oxygen Fuel – Liquid Fuel*), como o próprio nome já diz difere em algumas características em relação ao processo convencional. Nele, o combustível utilizado encontra-se na forma líquida, sendo o mais utilizado o querosene, e o formato do bocal é diferenciado, pois, entre a câmara de combustão e o bocal, há uma constricção (convergente – divergente), que possui a função de acelerar a mistura na saída da câmara, Figura 1 (B), Zhang *et al.* (2002).

Figura 1 - Esquema das pistolas de aspersão nos processos de HVOF –GF (A) e HVOF-LF (B)



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2002)

Nesta pistola, o combustível líquido e oxigênio são alimentados na câmara de combustão, onde ocorre a vaporização do querosene, e sua mistura com o oxigênio, ocorrendo então a sua combustão. Esse jato de alta energia então, passa pelo bocal constritor, que acelera o gás. No bocal, o pó é alimentado radialmente ao fluxo de gás, através de duas entradas. Essa mistura flui através do bocal, até sua saída, para então atingir o substrato.

Em relação as características do revestimento depositado, conforme Zhang *et al.* (2002), o processo de HVOF com combustível líquido, apresenta maiores velocidades de partículas, porém com uma menor temperatura da mistura. E além disso, segundo Tabbara (2009), o processo de HVOF por combustível líquido produz uma maior taxa de deposição, favorecendo a produção de revestimentos mais densos, com redução no nível de porosidade, e elevada resistência a corrosão, quando comparado ao processo com combustível a gás.

Na aspersão térmica existem três principais causas para a indução de tensões nos revestimentos: 1) Têmpera das partículas ao atingirem o substrato, isto é, o seu rápido resfriamento ao atingirem a superfície com menor temperatura, o que gera uma tensão residual trativa; 2) Geração de tensão residual compressiva através do efeito “Peening” causado pelas partículas das camadas de revestimento subsequentes; 3) Tensões residuais trativas ou compressivas, dependendo dos materiais utilizados, devido a diferença do CTE (coeficiente de expansão térmica) do substrato e revestimento, segundo Varis *et al* (2014).

### 2.3 MEDIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL POR ICP

Segundo Scuracchio (2012), tensões residuais podem ser definidas como tensões remanescentes em algum corpo sem que haja qualquer presença de fatores externos exercendo alguma forma de influência sobre o mesmo. Sua origem, dá-se a partir de deformações plásticas não uniformes, podendo ser de origem mecânica, térmica ou de oriundas de mudanças microestruturais resultantes de mudanças de fase.

A maioria dos processos mecânicos (fabricação) é responsável pela introdução de tensões residuais de elevada magnitude, devido as grandes solicitações mecânicas/térmicas geradas nesses processos, como relata Totten *et al.* (2003).

Apesar deste estado de tensão ser um estado auto equilibrante é importante sempre levá-lo em consideração, pois as tensões residuais variam entre tensões trativas e tensões compressivas, ou seja, quando acrescido de tensões externas podem apresentar mudança de comportamento, somando ou minimizando o carregamento em função do sentido da carga aplicada, segundo Soares (2003).

Para Barbosa *et al.* (2003), os esforços externos e as tensões residuais sempre se somam linearmente dentro do regime elástico (deve-se levar em conta o sentido). Portanto, o efeito das tensões residuais, de acordo com Ribeiro *et al.* (2003), pode ser prejudicial ou benéfico ao material, uma vez que o mesmo está diretamente ligado ao sinal, magnitude e distribuição destas tensões.

As tensões trativas são muitas vezes deletérias aos componentes, enquanto que tensões residuais compressivas em diversos casos estendem a vida dos

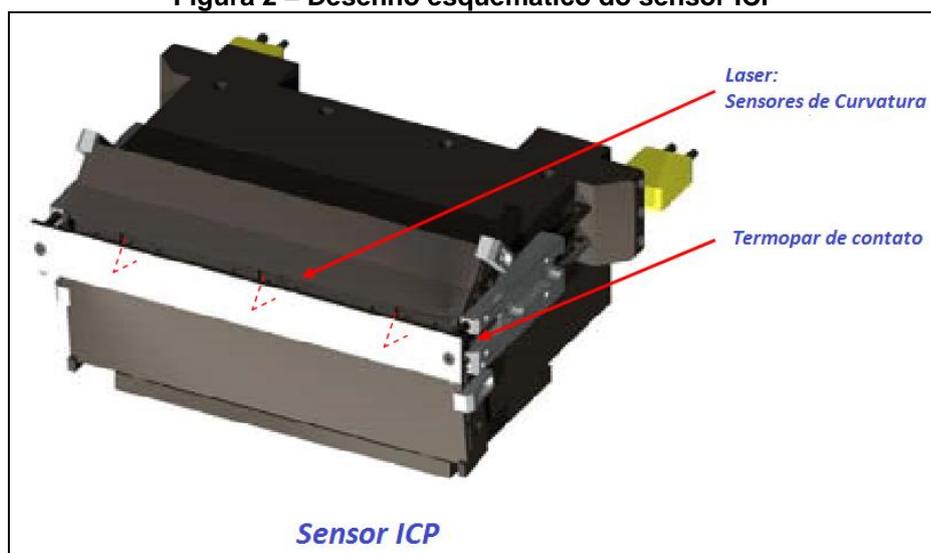
componentes, como relatado por Pukasiewicz (2012). Ribeiro *et al.* (2003) também afirmam que existem muitos casos onde estas tensões foram o fator chave para a ocorrência de falhas estruturais em peças mecânicas. Sendo assim, o controle destas tensões é importante para que se possa garantir um bom desempenho e qualidade do componente.

Segundo Modenesi (2008), estas tensões influenciam fortemente em problemas como o surgimento de trincas, falta de estabilidade dimensional e fratura frágil.

A capacidade de controle dos processos de aspersão térmica, é um tema muito interessante que vem ganhando cada vez mais atenção recentemente. Pois sendo possível o controle de certos parâmetros do processo, pode-se modificar as características resultantes do revestimento, como a tensão residual, por exemplo.

Na busca pela criação de uma ferramenta de controle dos parâmetros dos processos de aspersão térmica, o Centro de Pesquisa em Aspersão Térmica (CTSR), da Universidade de Stony Brook, desenvolveu o ICP (In-situ Coating Properties) sensor, que usado em conjunto com o software Reliacoat, permite a medição das tensões residuais nos processos de aspersão em tempo real.

Segundo Valarezo (2008), o sensor de ICP utiliza-se de medições termo elásticas do feixe de curvatura durante a deposição do revestimento no substrato, extraindo a evolução da tensão residual e o aparecimento de rachaduras. O sensor, Figura 2, é formado por um laser, capaz de medir o deslocamento linear do substrato, e por termopares, que medem a temperatura do substrato na deposição. Sendo assim, esse sensor possibilita o monitoramento em tempo real das características do processo de aspersão.

**Figura 2 – Desenho esquemático do sensor ICP**

Fonte: Adaptado de: Valarezo, A. (2008)

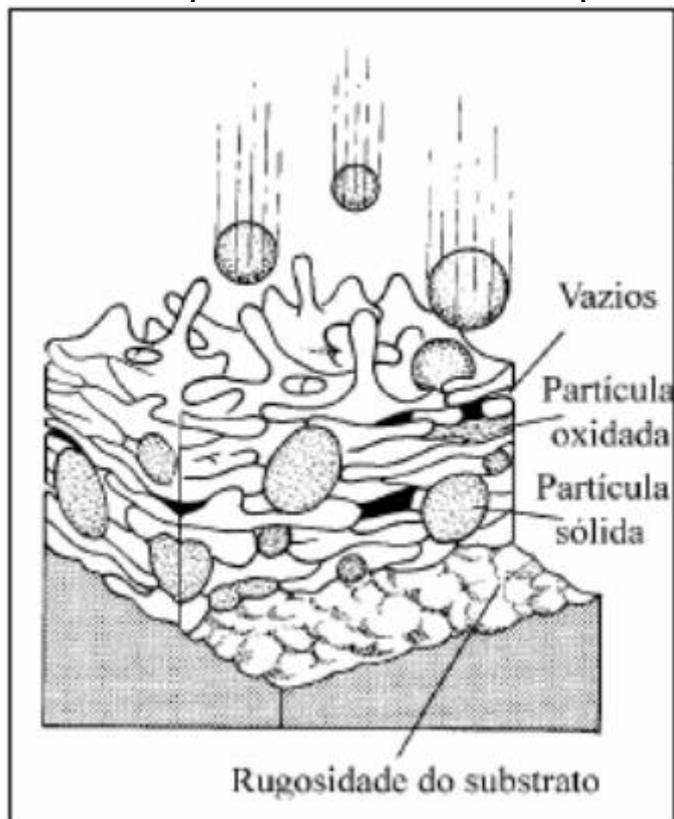
Conforme Realiacoat Technologies (2015), com a utilização desse equipamento, em conjunto com um substrato relativamente fino, possibilita-se a monitoração da curvatura do substrato durante o processo, e pode-se observar a interação entre o substrato e as camadas depositadas. Com isso, variáveis como taxa de alimentação, número de passes, e o estado das partículas, podem ser correlacionados com a tensão residual.

Com a utilização desse sensor durante o processo, se torna possível a suplementação ou até mesmo a substituição de ensaios destrutivos, para a obtenção de certos resultados, conforme Hayden Corporation (2012). E, além disso, ele permite uma rápida otimização das propriedades de revestimento, no interior da cabine de projeção. Permitindo uma correlação geral com as condições do processo.

#### 2.4 MORFOLOGIA DE UM REVESTIMENTO ASPERGIDO

Basicamente, durante o processo de aspersão térmica, o revestimento é formado através do achatamento e posterior solidificação de sucessivas gotículas semifundidas do metal de aspersão. Ao sofrerem o impacto a uma alta velocidade no substrato, essas gotículas, tendem a se achatar em um formato de panquecas, criando as chamadas “lamelas”, conforme Brito (2010). A Figura 3 mostra um esquema simples da estrutura típica de um revestimento originado através do processo de aspersão térmica.

Figura 3 – Estrutura típica de um revestimento de aspersão térmica



Fonte: Bernecki (2004) apud Brito (2010)

A morfologia dos revestimentos é influenciada por uma série de características/parâmetros do processo, como: distância bocal da pistola e substrato, velocidade e temperatura do fluxo, tipo do gás utilizado, acabamento superficial do substrato, entre outros. Com isso, uma pequena variação no processo, pode influenciar de forma negativa ou positiva nas propriedades como:

- Aderência do revestimento;
- Porosidade;
- Teor de Óxidos;

## 2.5 CAVITAÇÃO

Segundo Horta et. al. (1997), a cavitação pode ser basicamente entendida como uma sequência de eventos de formação de bolhas de vapor, que devido à

momentos de queda de pressão, desenvolvem-se gerando eventos de implosão ou explosão, esse fenômeno indesejável é responsável por efeitos como:

- Erosão de contornos sólidos;
- Vibrações e ruídos excessivos;
- Diminuição da capacidade de vertedouros de Usinas Hidrelétricas;
- Diminuição na eficiência de Turbinas Hidráulicas;

De acordo com Vaz (2004) os equipamentos com maior susceptibilidade a terem danos devido a esse fenômeno, são turbinas hidráulicas, bombas e propulsores, que em sua maioria trabalham diretamente em contato com fluidos.

Visando a diminuição do efeito deletério da cavitação nos diversos meios, a forma mais viável para este fim, é a seleção de materiais que possuam características desfavoráveis ao aparecimento do fenômeno, como materiais maciços ou mesmo revestimentos.

Conforme Fedumenti (2010), existem algumas características que tornam os materiais menos susceptíveis a cavitação:

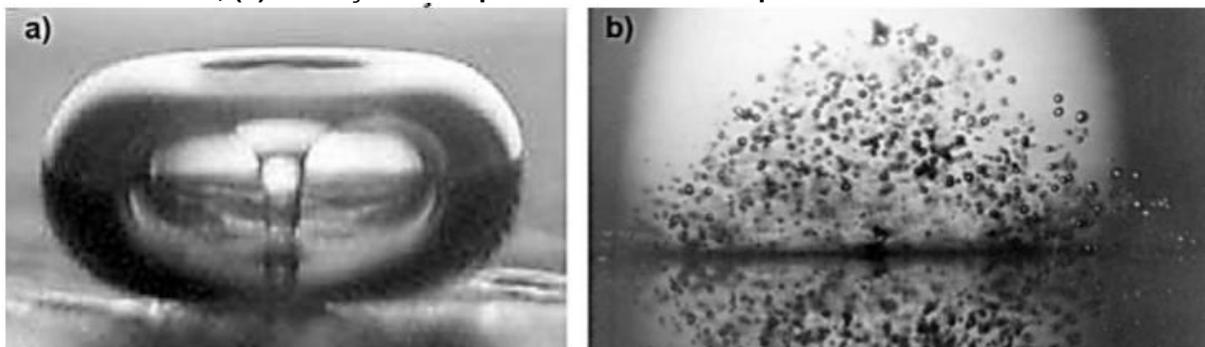
- Aumento da dureza / dureza elevada;
- Baixa energia de falha de empilhamento;
- Distribuição homogênea de pontos de ancoragem das discordâncias;
- Pequeno tamanho de grãos

No caso de turbinas hidráulicas, o fluxo contínuo de água sobre a pá do rotor, gera a ocorrência de gradientes de pressão. E em determinados pontos da pá, onde o gradiente atinge os menores valores, a pressão resultante é menor que a pressão de evaporação da água, fazendo-se assim, com que nesses pontos sejam geradas bolhas de vapor, que seguindo o fluxo da água, são movidas para regiões de maior pressão, voltando a sua forma líquida, conforme Ribeiro (2007).

Nesse momento, devido a transformação da bolha de vapor, gera-se um jato de água contrário a superfície da pá, e devido ao movimento e mudança de gradiente contínua na pá, ocorre a geração de tensões cíclicas, que por fim geram perda de massa na superfície do componente, resultando assim na erosão por

cavitação. Na Figura 4 pode ser ver o fenômeno de formação e implosão de uma bolha de vapor.

**Figura 4 – (a) Momento do colapso de uma bolha de vapor e a região de elevada pressão no meio; (b) formação e colapso das bolhas sob a ponta de um sonotrodo.**



Fonte: Adaptado de Sonosys (2014) apud Sucharski (2016)

No processo de cavitação, a perda de massa inicia-se na fase de incubação, onde as tensões residuais da implosão, removem pouca ou quase nenhuma massa da superfície.

Após isso, têm-se a fase de aceleração, onde a superfície encruada devido aos impactos, começa a soltar uma maior quantidade de partículas. Sendo então seguida pela fase de atenuação, onde a rugosidade existente, gera uma absorção do impacto na superfície.

E por fim, tem-se a fase estacionária, onde a perda de massa se torna constante.

### 3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 DEPOSIÇÃO DOS REVESTIMENTOS

A liga aspergida foi a liga SMA\_1NCr, Tabela 1. Durante o processo, foram controladas as temperaturas e velocidades das partículas projetadas através de equipamento Accuraspray. E com o auxílio do software ReliaCoat, em conjunto com o sensor ICP, foi possível obter os dados de tensão residual nas amostras.

O processo de aspersão térmica por HVOF foi realizado no Centro de pesquisas em Aspersão Térmica (Center for Thermal Spray Research), da Universidade de Stony Brook, nos Estados Unidos. Ao todo foram aspergidas oito amostras, variando-se os parâmetros de aspersão como: fluxo de querosene, fluxo do pó da liga e distância entre o bico da pistola e a chapa a ser aspergida. As variações nos parâmetros para cada amostra estão listadas na Tabela 2.

**Tabela 1 – Composição Química da Liga SMA\_1NCr, utilizada nos experimentos.**

Liga	Compos.	Fe	C	N	Mn	Cr	Ni	Si	B	Mo
SMA_1NCr	Nominal	Res	0,1 0,2	0,25 0,35	14 16	14 16	---	3 3,5	---	---
	Absorção Atômica	52	nm*	nm*	16	12	0,55	3,5	---	---

Fonte: Autoria Própria

**Tabela 2 – Parâmetros utilizados no processo de aspersão das amostras**

Amostra	Distância (mm)	Fluxo de Querosene (l/min)	Taxa de Alimentação (g/min)
1	250	0,4	20
2	350	0,4	20
3	250	0,4	35
4	350	0,4	35
5	250	0,32	20
6	350	0,32	20
7	250	0,32	35
8	350	0,32	35

Fonte: Autoria Própria

#### 3.2 MEDIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL POR ICP

A medição da tensão residual nas amostras foi feita simultaneamente ao processo de aspersão, com o sensor de ICP acoplado ao substrato, e com o auxílio

do software Reliacoat, que possibilitou a obtenção de gráficos, nos quais eram plotados em tempo real os pontos de curvatura medidos pelo sensor.

Assim, definidos esses pontos, o software gerou uma série de resultados, nos quais pôde-se obter os valores das tensões originadas pela deposição, e as tensões térmicas nas amostras aspergidas, que somados fornecem os valores de tensões residuais em cada uma das amostras.

### 3.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para a análise das amostras, as mesmas foram cortadas em duas partes, sendo uma das partes cortada para posterior embutimento, visando a análise da microestrutura, usando a parte transversal da amostra. E a outra parte, cortada num tamanho aproximado de 260 mm x 15 mm, para a realização do teste de cavitação.

Para as amostras da seção transversal, após seu corte realizou-se seu embutimento, em baquelite, na embutidora *Buehler SimpliMet XPS1*, obtendo-se amostras circulares de 30mm de diâmetro.

Para a caracterização metalográfica das amostras, foi realizado o lixamento e posterior polimento das mesmas, polindo-se a superfície superior das amostras embutidas, e para as amostras para cavitação, polindo-se a superfície horizontal superior, onde foi depositado o revestimento. As lixas usadas foram de 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh de carboneto de silício, e para o polimento, usou-se suspensão de diamante de 3,0  $\mu\text{m}$ , 0,25  $\mu\text{m}$  e sílica coloidal 0,01  $\mu\text{m}$ .

### 3.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

O ensaio de microdureza foi realizado nas amostras embutidas com carga de 300gf, utilizando-se o indentador Vickers, conforme norma ASTM E384-99. Para cada amostra, foram realizadas medições em quatorze colunas, homoganeamente espaçadas ao longo do revestimento, com cada uma delas contendo cinco medições. Para cada uma das colunas, a medição foi realizada, partindo-se da extremidade superior da amostra, em direção ao substrato, sendo possível obter três medições no revestimento e duas no substrato.

### 3.5 ENSAIO DE CAVITAÇÃO E ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES CAVITADAS

O ensaio de cavitação foi realizado conforme norma ASTM G32/16 - “*ASTM Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus*”, somente em três amostras, que foram escolhidas de acordo com seus parâmetros, buscando avaliar os três parâmetros mais distintos entre si. As amostras selecionadas inicialmente foram a 01, 07 e 08, pois apresentavam uma maior variação na tensão residual.

Este ensaio consiste na medição da perda de massa do corpo amostra fixada a uma distância de 0,5 mm da ponta de sacrifício do vibrador, que pulsa em um banho de água destilada.

Antes do primeiro ensaio de cavitação, realizou-se a pesagem das amostras, a fim de determinar seu peso inicial, sendo cada uma das amostras pesadas cinco vezes.

Como tempo total de ensaio, estabeleceu-se 300 minutos, iniciando-se com 1 minuto, e dobrando-se esse valor. Durante o fim de uma cavitação e o início da próxima, foi realizada a pesagem das amostras, visando analisar a perda de massa no processo.

E em intervalos de tempo pré-estabelecidos, a superfície cavitada, foi analisada com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), da marca Tescan modelo Vega 3, sempre se obtendo imagens de pontos pré-estabelecidos, visando a obtenção de imagens ilustrando o desenvolvimento da região cavitada.

A Tabela 3, mostra a progressão dos tempos de cavitação das amostras, e os intervalos em que as imagens das superfícies cavitadas foram obtidos.

**Tabela 3 – Tempos dos ensaios de cavitação das amostras**

Tempo de Ensaio (min)	1	2	4	8	15	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Tempo de ensaio acumulado (min)	1	3	7	15	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
Análise MEV				X	X	X			X					X

**Fonte: Autoria Própria**

A medição da tensão residual nas amostras foi feita simultaneamente ao processo de aspersão, com o sensor de ICP acoplado ao substrato, e com o auxílio do software Reliacoat, que possibilitou a obtenção de gráficos, nos quais eram plotados em tempo real os pontos de curvatura medidos pelo sensor.

Assim, definidos esses pontos, o software gerou uma série de resultados, nos quais pôde-se obter os valores das tensões originadas pela deposição, e as tensões térmicas nas amostras aspergidas, que somados fornecem os valores de tensões residuais em cada uma das amostras.

### 3.6 ANÁLISE DA SUPERFÍCIE TRANSVERSAL DAS AMOSTRAS

Para a análise da morfologia do revestimento, foram utilizadas as amostras previamente embutidas em baquelite, para que se fosse possível analisar a seção transversal das mesmas. Com o auxílio do microscópio ótico Zeiss, foram obtidas imagens do revestimento com aproximações de 200x e 500x, buscando avaliar a presença de poros e óxidos presentes entre as lamelas de revestimento aspergidas.

Para a obtenção das porcentagens de cada fase presente no revestimento, utilizou-se o software AxioVison da Zeiss, onde para cada amostra foram obtidas quatro imagens em preto e branco, com uma aproximação de 500x. Com o software então, foi possível separar-se cada uma das fases de acordo com sua tonalidade, assim sendo, as faixas mais escuras, os poros, as acinzentadas, os óxidos, e as mais claras as lamelas do metal aspergido. Possibilitando-se assim, através da área ocupada por cada uma das faixas de tons, obter-se a porcentagem da cada fase no revestimento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados para as oito diferentes amostras, que contaram com diferentes parâmetros de aspersão, sendo assim, foi possível fazer-se as seguintes análises:

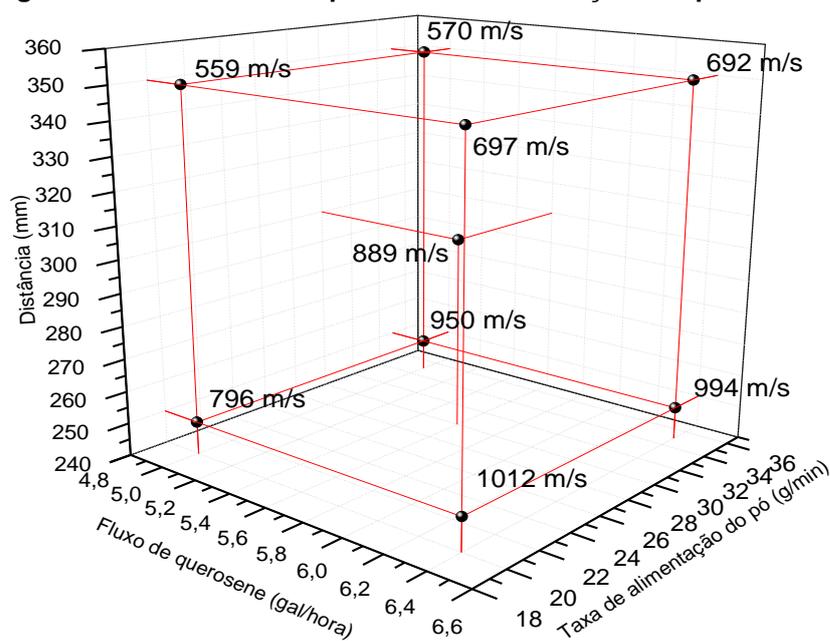
- Análise da Velocidade e Temperatura das Partículas;
- Influência dos Parâmetros na Tensão Residual dos Revestimentos;
- Avaliação da Morfologia dos Revestimentos;
- Microdureza dos Revestimentos;
- Avaliação da Resistência à Cavitação dos Revestimentos Depositados;
- Avaliação dos Mecanismos de Perda de Massa;

### 4.1 ANÁLISE DA VELOCIDADE E TEMPERATURA DAS PARTÍCULAS

Com o auxílio do software AccuraSpray, pôde-se obter as velocidades e temperaturas das partículas para os diferentes parâmetros adotados. Assim, a partir dos parâmetros de deposição utilizados avaliou-se a influência dos mesmos sobre as propriedades das partículas.

Na Figura 5 é avaliada a influência dos parâmetros sobre a velocidade das partículas.

**Figura 5 – Velocidade das partículas com variações de parâmetros**



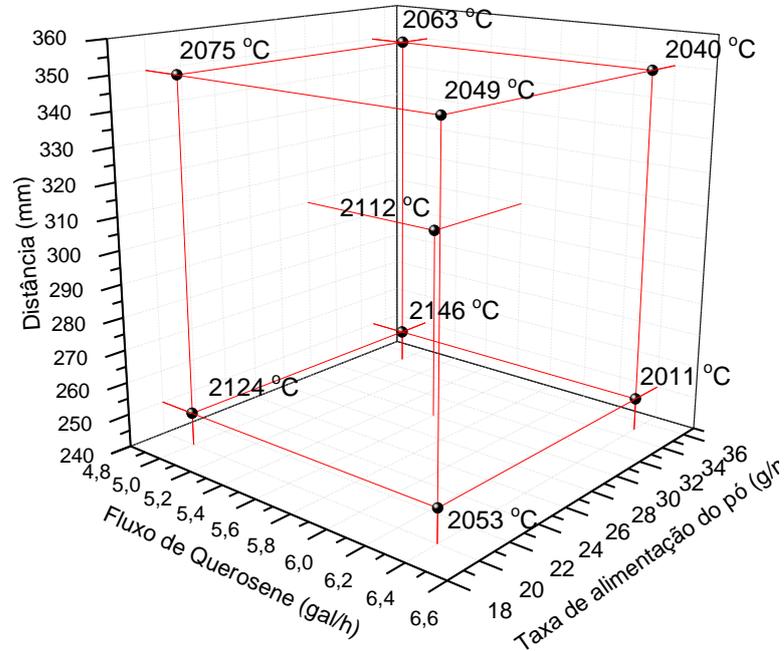
**Fonte: Autoria Própria**

É possível observar que os três parâmetros apresentaram uma influência significativa. Com relação aos dados obtidos é possível destacar o maior aumento da velocidade das partículas com a diminuição da distância de deposição e com o maior fluxo de querosene. Estes dois parâmetros foram os que apresentaram uma influência mais clara nas propriedades das partículas, enquanto que a taxa de alimentação de pó apresentou uma leve tendência de aumento na velocidade com a redução na taxa de alimentação.

Vale destacar que a técnica de deposição por HVOF a querosene apresentou velocidades de partículas muito superiores às do equipamento HVOF a gás que apresentou valores de 398m/s para deposições com distância de 200mm e alimentação de 50g/min, 250mm de distância de fluxo de oxigênio de 30% e de propileno de 36%. Já para a temperatura das partículas, Figura 6, observou-se que as mudanças nos parâmetros de deposição não promoveram alterações muito claras nas temperaturas destas partículas. Inicialmente pode-se observar um aumento da temperatura com uma menor vazão do querosene e uma menor distância de deposição. Enquanto isso a taxa de alimentação de pó não promoveu uma alteração significativa na temperatura. Apesar destas avaliações, a variação de temperatura foi muito pequena se comparada com a variação de velocidade das

mesmas. A temperatura das partículas apresentou um comportamento muito similar ao da HVOF a gás, a qual apresentou temperaturas na faixa de 2090°C.

**Figura 6 – Temperatura das partículas com a variação dos parâmetros**

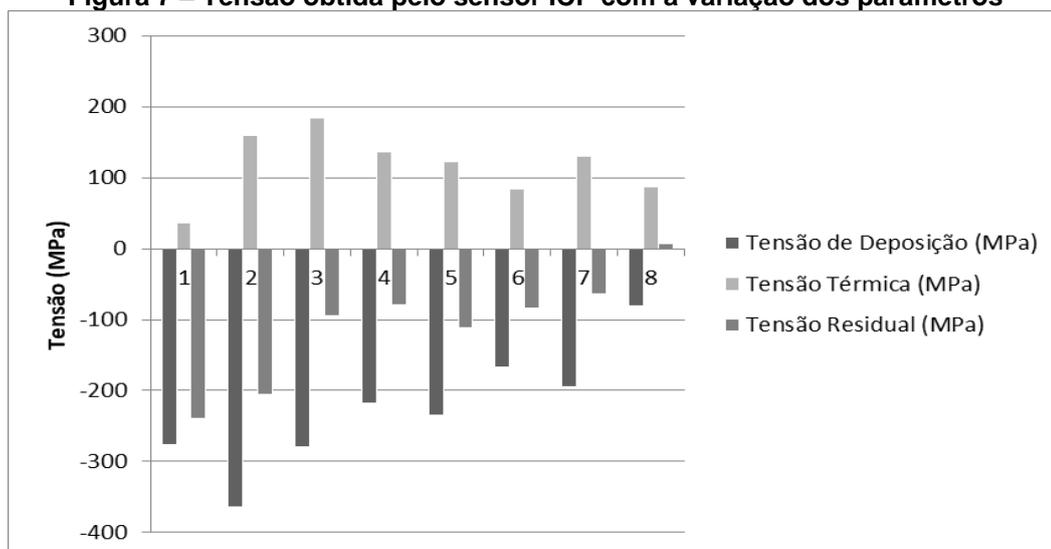


**Fonte: Autoria Própria**

#### 4.2 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NA TENSÃO RESIDUAL DOS REVESTIMENTOS

Na Figura 7 são apresentados os resultados da Tensão de Deposição, resultante do processo de deposição do revestimento, Tensão Térmica, resultante do aquecimento da chapa e Tensão Residual, estabelecida na amostra após atingir a situação de resfriamento da amostra.

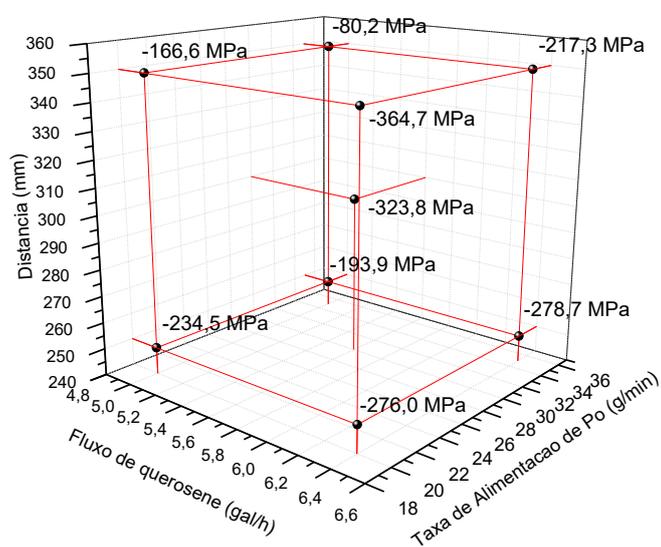
**Figura 7 – Tensão obtida pelo sensor ICP com a variação dos parâmetros**



Fonte: Autoria Própria

A partir dos dados coletados pelo ICP, Figura 8, observou-se a formação de tensões compressivas para todos os parâmetros analisados, variando esta tensão de forma correlata com a velocidade das partículas. As amostras com menor distância de deposição apresentaram um aumento na tensão de deposição, tornando-se mais compressivas. O aumento do fluxo de querosene também promoveu um aumento da tensão compressiva da deposição dos revestimentos. A variação na taxa de alimentação do pó teve uma menor influência que os parâmetros anteriormente descritos.

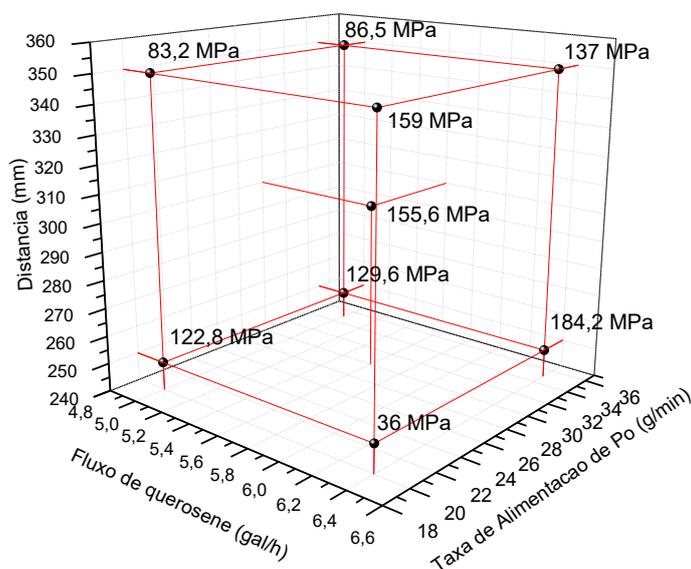
**Figura 8 – Tensão de Deposição medida pelo sensor ICP com a variação de parâmetros**



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 9 é observada a formação das Tensões Térmicas dos revestimentos depositados. Estas tensões são decorrentes do processo de aquecimento das amostras. Ao contrário da tensão de deposição não foi possível obter uma correlação muito clara entre os parâmetros de processo e as tensões térmicas geradas nas amostras.

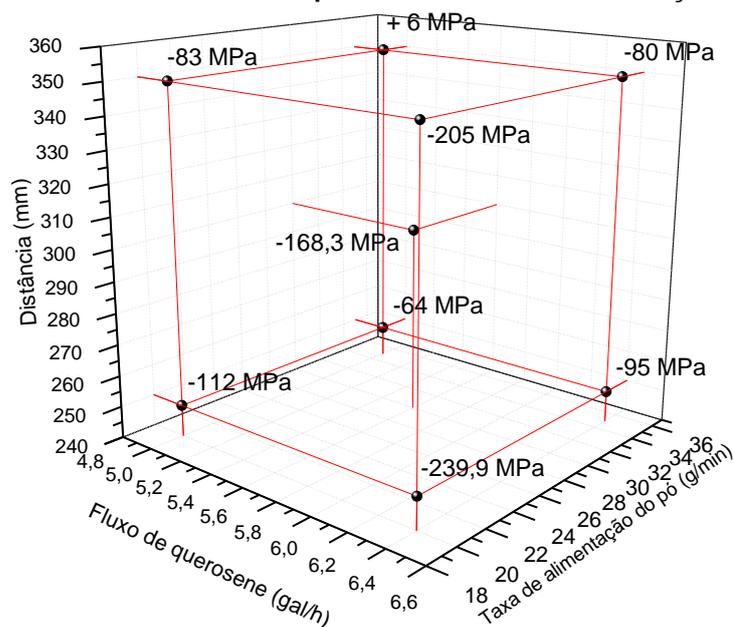
**Figura 9 – Tensão Térmica medida pelo sensor ICP com a variação de parâmetros**



**Fonte: Autoria Própria**

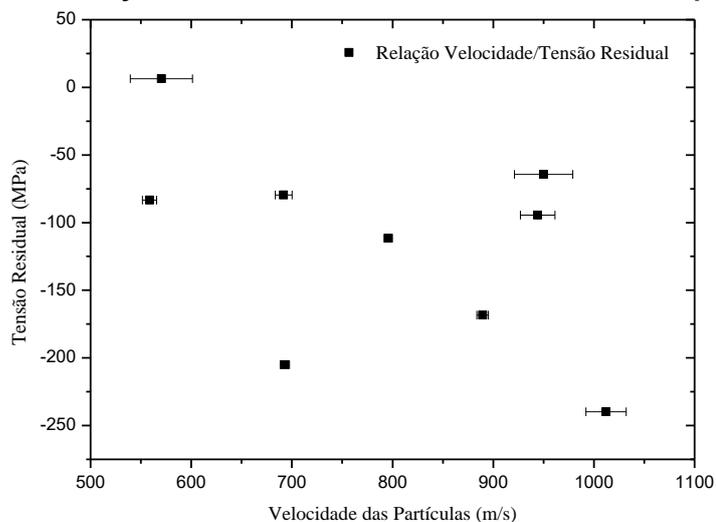
A partir dos dados de tensão residual coletados pelo ICP, Figura 10, observou-se uma forte influência da velocidade das partículas na tensão residual dos revestimentos, Figura 11. O aumento de velocidade das partículas com a menor distância de deposição e como maior fluxo de querosene propiciou um aumento na tensão residual compressiva dos revestimentos. A variação na taxa de alimentação do pó, apesar de não influenciar significativamente a velocidade das partículas propiciou um aumento significativo na tensão compressiva dos revestimentos com a diminuição da taxa de alimentação.

**Figura 10 – Tensão Residual medida pelo sensor ICP com a variação de parâmetros**



Fonte: Autoria Própria

**Figura 11 – Relação entre a tensão residual e velocidade das partículas**



Fonte: Autoria Própria

Segundo observado na literatura o aumento da tensão compressiva dos revestimentos é muito importante para o aumento da resistência do revestimento à abrasão, por exemplo. Segundo observado por Vackel, *et al.* (2015) o aumento da tensão compressiva de revestimentos de WC apresentou um aumento da dureza e da resistência à abrasão e corrosão com o uso de HVOF com combustível querosene e com o aumento da tensão compressiva. A melhoria das propriedades

de revestimentos NiCr e FeCr também foram obtidas com o uso de HVOF a querosene em trabalho conduzido por Oksa e Metsäjoki (2014).

Neste trabalho conduzido por Oksa e Metsäjoki (2014), observou-se que os parâmetros de deposição conduzidos por HVOF líquido que apresentaram maior velocidade de partícula também propiciaram um aumento da tensão residual compressiva. Além desta característica observou-se neste trabalho que a redução no fluxo de querosene reduziu a oxidação dos revestimentos.

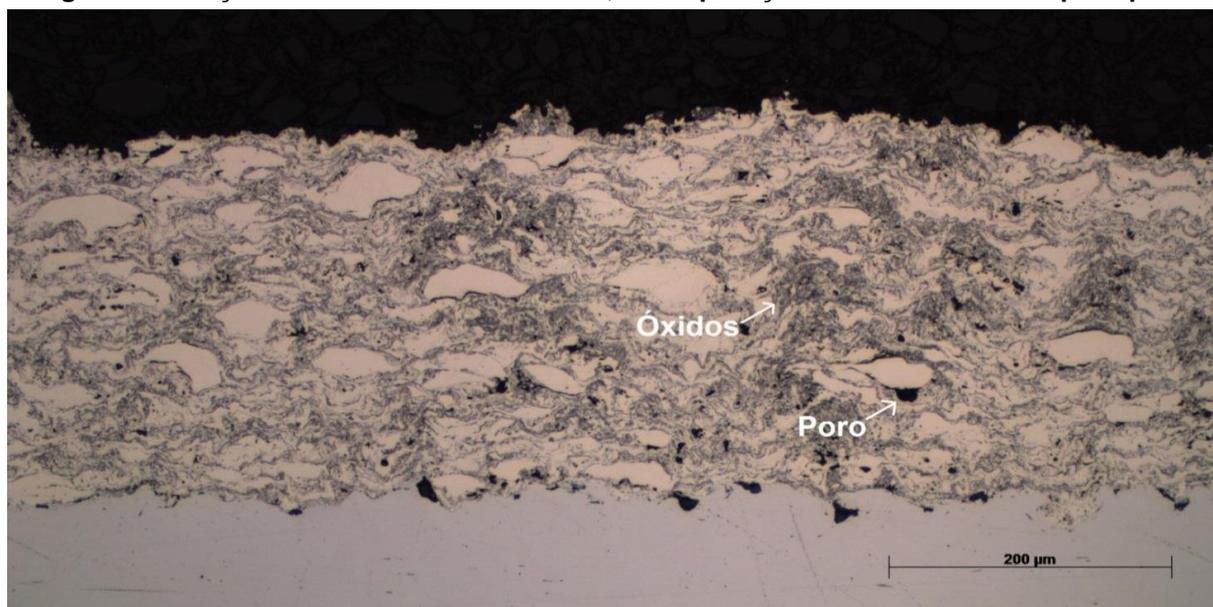
### 4.3 AVALIAÇÃO DA MORFOLOGIA DOS REVESTIMENTOS

A caracterização da morfologia dos revestimentos, tanto superficial quanto microestrutural foi realizada por análises de imagens geradas por microscopia ótica. A apresentação dos resultados é feita para cada revestimento em função do experimento.

#### 4.3.1 Experimento 01

Na Figura 12 é mostrada a morfologia do revestimento da amostra 01, em que a deposição foi feita com uma distância de 250 mm, taxa de alimentação de pó de 25 g/min e fluxo de querosene de 6,4 gal/hora, no processo HVOF. Na figura, pode-se identificar os poros, em algumas regiões, e os óxidos que circundam as partículas do revestimento aspergido. Na Tabela 4, é possível ver os resultados da medição da porcentagem de poros e óxidos presentes na amostra.

Figura 12 – Seção transversal da Amostra 01, com aplicação de 200x – Microscópio Óptico



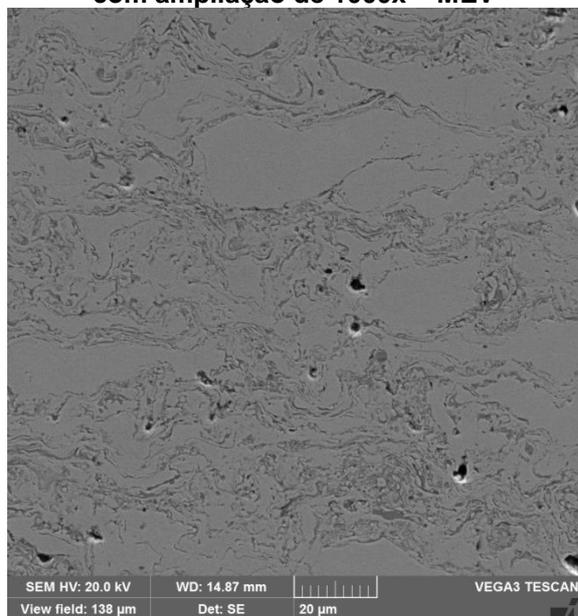
Fonte: Autoria Própria

Tabela 4 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento da Amostra 01

Poros (%)	Óxidos (%)
0,35	10,69

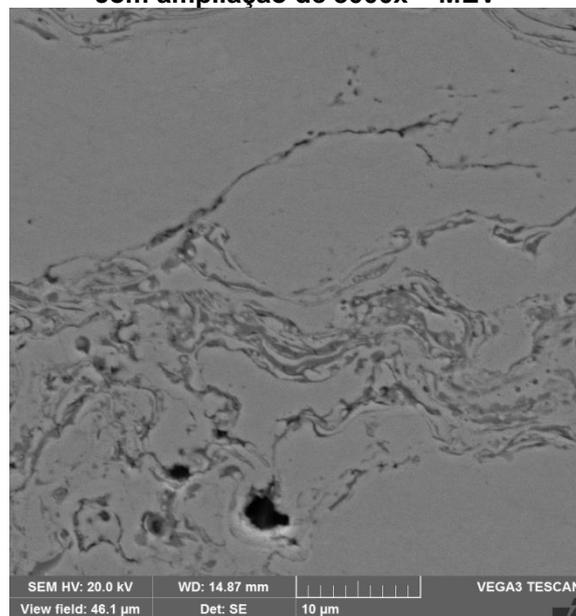
Fonte: Autoria Própria

Figura 13 – Seção transversal da Amostra 01, com ampliação de 1000x – MEV



Fonte: Autoria Própria

Figura 14 – Seção transversal da Amostra 01, com ampliação de 3000x – MEV

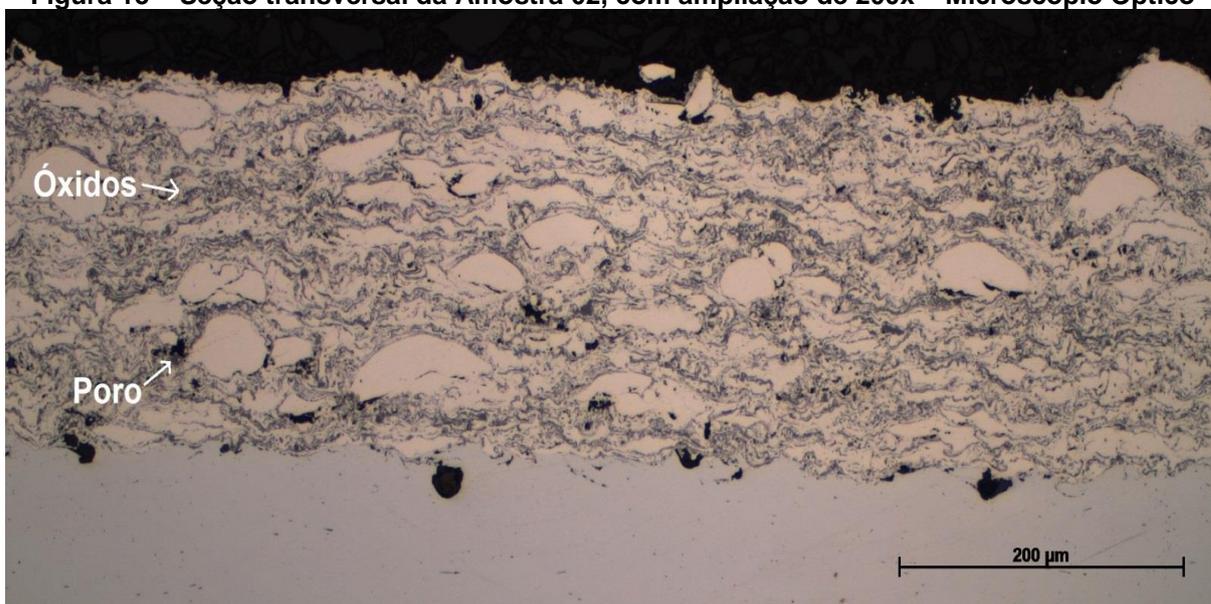


Fonte: Autoria Própria

#### 4.3.2 Experimento 02

Na Figura 15 é mostrada a morfologia do revestimento da amostra 02, em que a deposição foi feita com uma distância de 350 mm, taxa de alimentação de pó de 25 g/min e fluxo de querosene de 6,4 gal/hora, no processo HVOF. Na figura, pode-se identificar os poros, em algumas regiões, e os óxidos que circundam as partículas do revestimento aspergido. Na Tabela 5, é possível ver os resultados da medição da porcentagem de poros e óxidos presentes na amostra.

**Figura 15 – Seção transversal da Amostra 02, com ampliação de 200x – Microscópio Óptico**



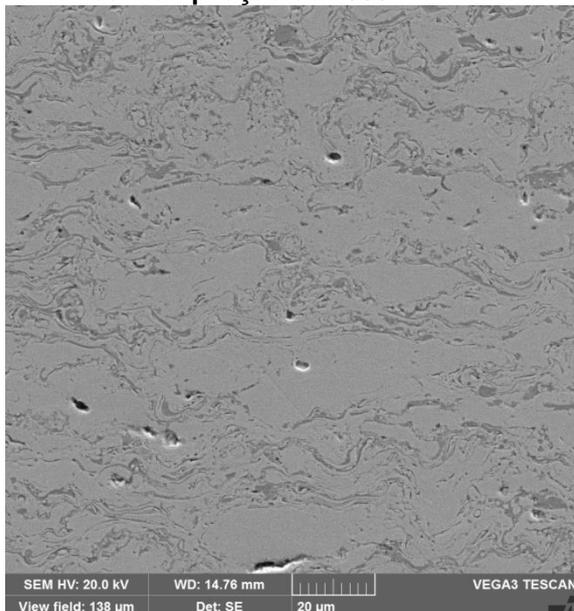
Fonte: Autoria Própria

**Tabela 5 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento da Amostra 02**

Poros (%)	Óxidos (%)
0,35	10,23

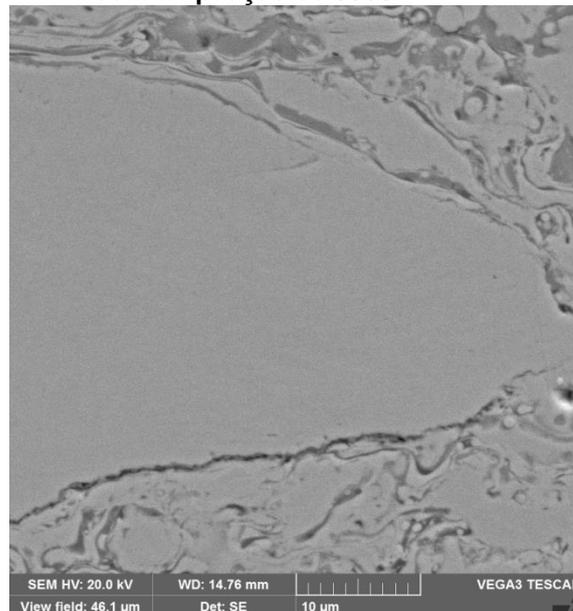
Fonte: Autoria Própria

**Figura 16 – Seção transversal da Amostra 02, com ampliação de 1000x – MEV**



**Fonte: Autoria Própria**

**Figura 17 – Seção transversal da Amostra 02, com ampliação de 3000x – MEV**

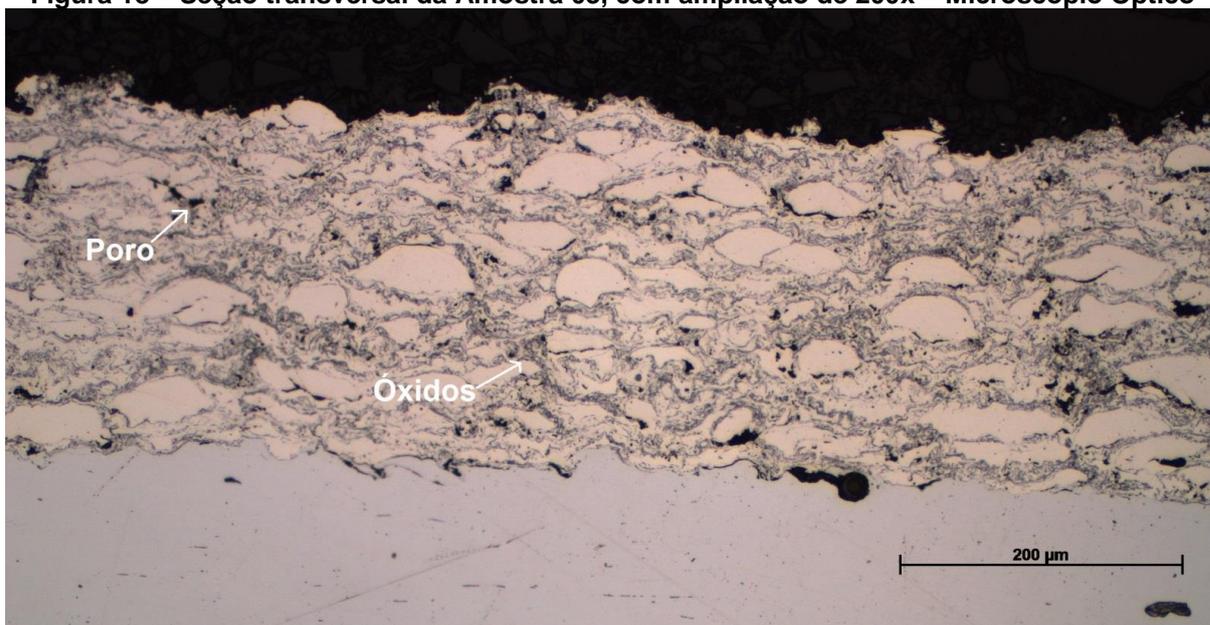


**Fonte: Autoria Própria**

#### 4.3.3 Experimento 03

Na Figura 18 é mostrada a morfologia do revestimento da amostra 03, em que a deposição foi feita com uma distância de 250 mm, taxa de alimentação de pó de 35 g/min e fluxo de querosene de 6,4 gal/hora, no processo HVOF. Na figura, pode-se identificar os poros, em algumas regiões, e os óxidos que circundam as partículas do revestimento aspergido. Na Tabela 6, é possível ver os resultados da medição da porcentagem de poros e óxidos presentes na amostra.

Figura 18 – Seção transversal da Amostra 03, com ampliação de 200x – Microscópio Óptico



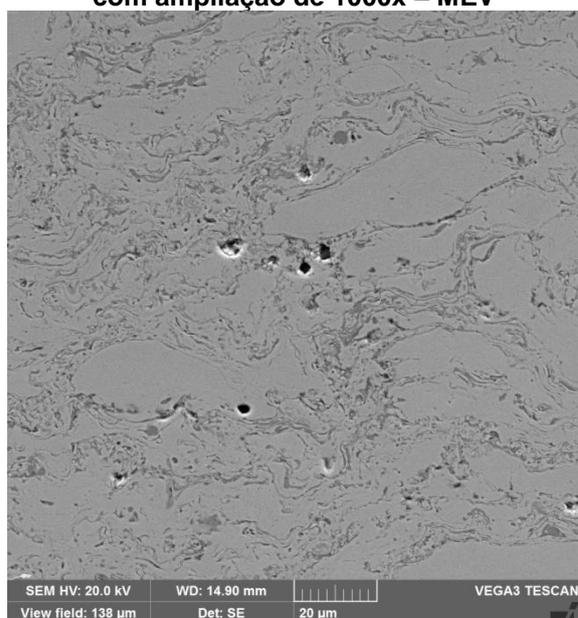
Fonte: Autoria Própria

Tabela 6 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento na Amostra 03

Poros (%)	Óxidos (%)
0,33	11,51

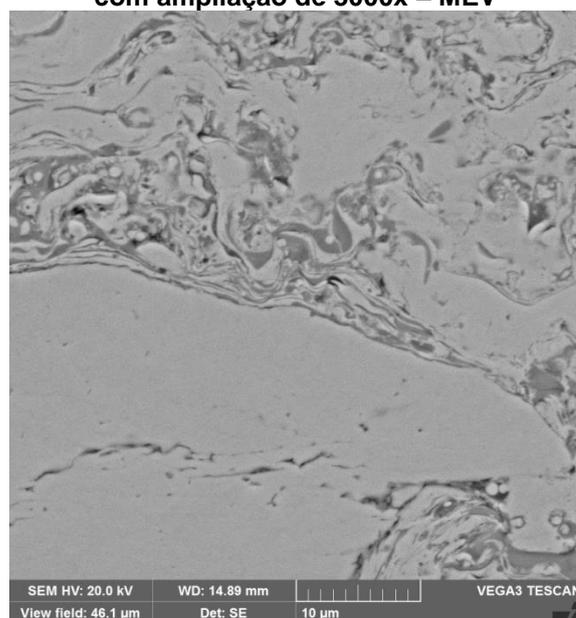
Fonte: Autoria Própria

Figura 19 – Seção transversal da Amostra 03, com ampliação de 1000x – MEV



Fonte: Autoria Própria

Figura 20 – Seção transversal da Amostra 03, com ampliação de 3000x – MEV

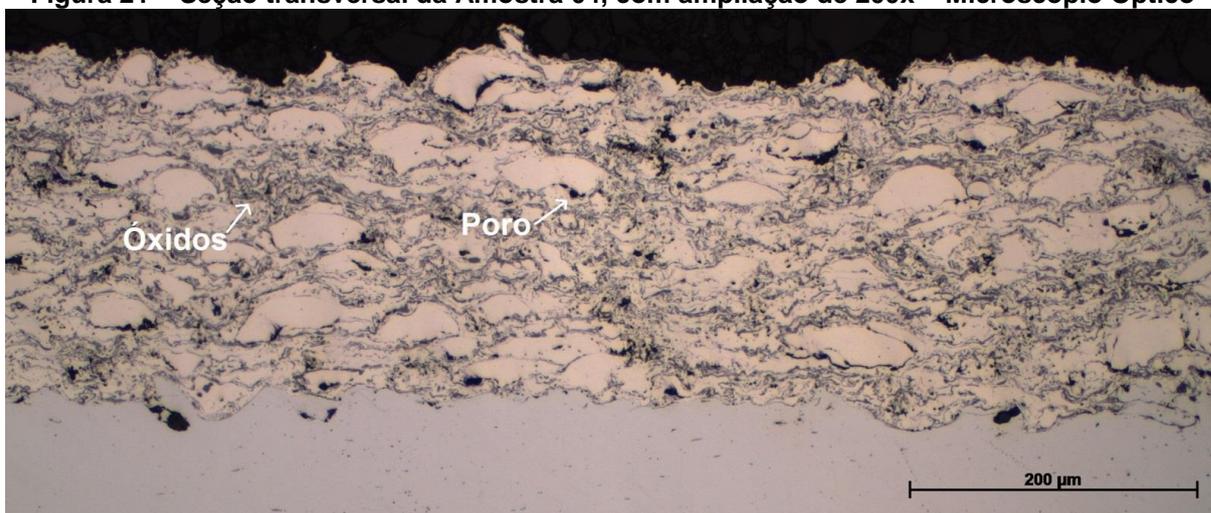


Fonte: Autoria Própria

#### 4.3.4 Experimento 04

Na Figura 21 é mostrada a morfologia do revestimento da amostra 04, em que a deposição foi feita com uma distância de 350 mm, taxa de alimentação de pó de 35 g/min e fluxo de querosene de 6,4 gal/hora, no processo HVOF. Na figura, pode-se identificar os poros, em algumas regiões, e os óxidos que circundam as partículas do revestimento aspergido. Na Tabela 7, é possível ver os resultados da medição da porcentagem de poros e óxidos presentes na amostra.

**Figura 21 – Seção transversal da Amostra 04, com ampliação de 200x – Microscópio Óptico**



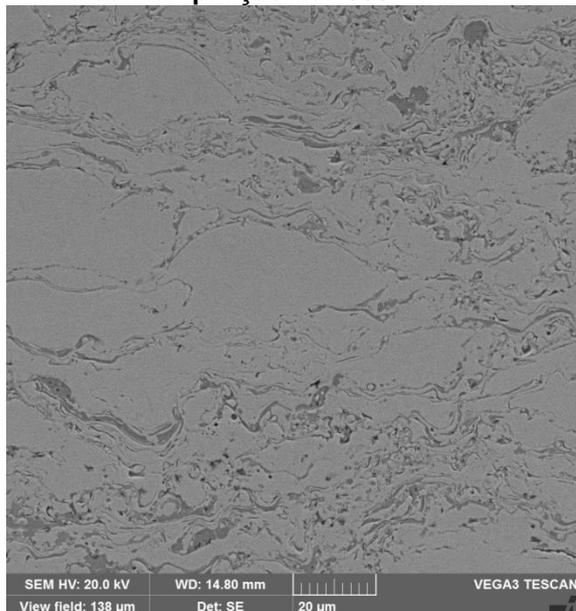
Fonte: Autoria Própria

**Tabela 7 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento na Amostra 04**

Poros (%)	Óxidos (%)
0,40	13,25

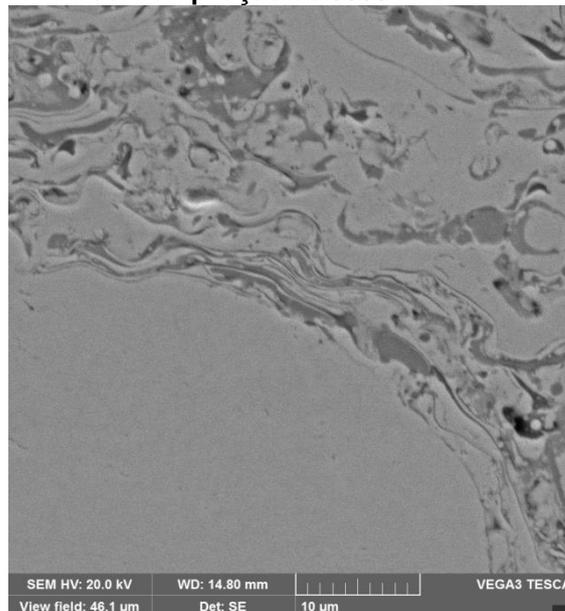
Fonte: Autoria Própria

**Figura 22 – Seção transversal da Amostra 04, com ampliação de 1000x – MEV**



**Fonte: Autoria Própria**

**Figura 23 – Seção transversal da Amostra 04, com ampliação de 3000x – MEV**

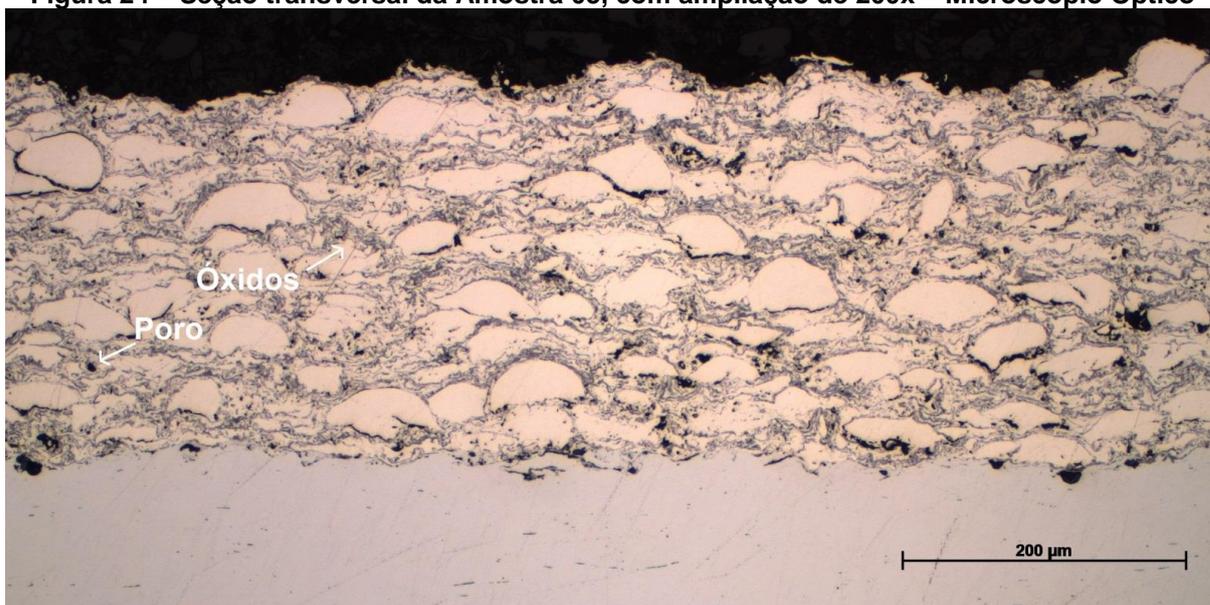


**Fonte: Autoria Própria**

#### 4.3.5 Experimento 05

Na Figura 24 é mostrada a morfologia do revestimento da amostra 05, em que a deposição foi feita com uma distância de 250 mm, taxa de alimentação de pó de 20 g/min e fluxo de querosene de 5,0 gal/hora, no processo HVOF. Na figura, pode-se identificar os poros, em algumas regiões, e os óxidos que circundam as partículas do revestimento aspergido. Na Tabela 8, é possível ver os resultados da medição da porcentagem de poros e óxidos presentes na amostra.

**Figura 24 – Seção transversal da Amostra 05, com ampliação de 200x – Microscópio Óptico**



Fonte: Aatoria Própria

**Tabela 8 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento na Amostra 05**

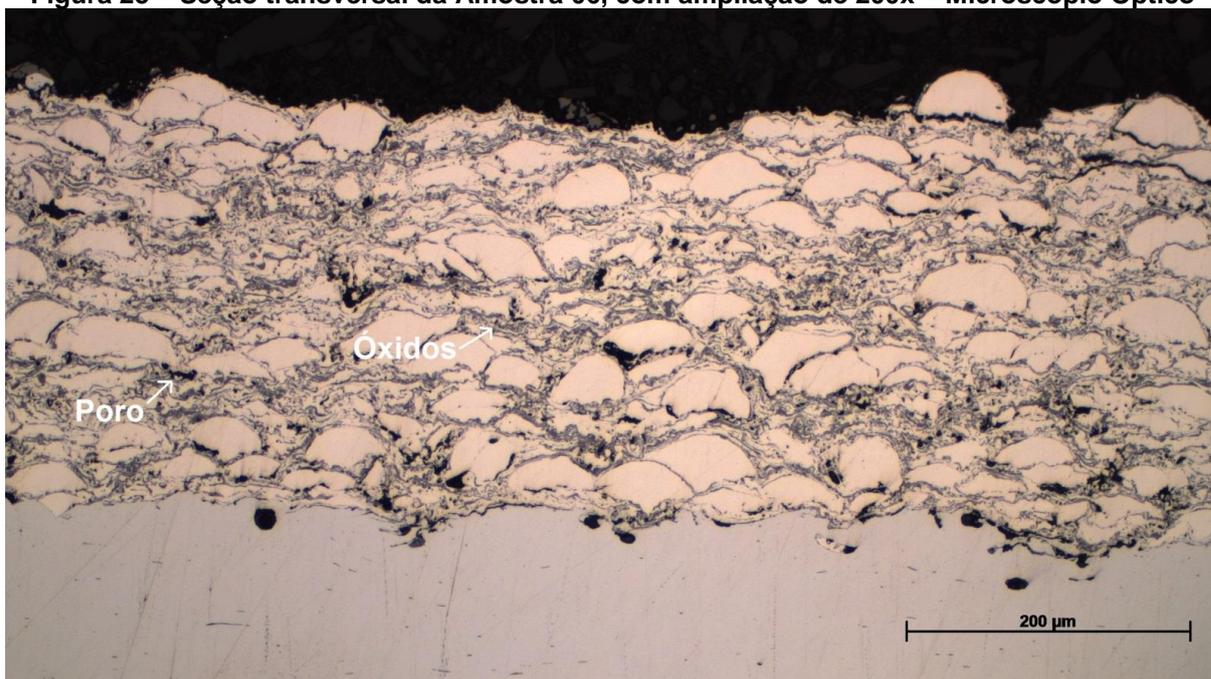
Poros (%)	Óxidos (%)
0,32	11,85

Fonte: Aatoria Própria

#### 4.3.6 Experimento 06

Na Figura 25 é mostrada a morfologia do revestimento da amostra 06, em que a deposição foi feita com uma distância de 350 mm, taxa de alimentação de pó de 20 g/min e fluxo de querosene de 5 gal/hora, no processo HVOF. Na figura, pode-se identificar os poros, em algumas regiões, e os óxidos que circundam as partículas do revestimento aspergido. Na Tabela 9, é possível ver os resultados da medição da porcentagem de poros e óxidos presentes na amostra.

Figura 25 – Seção transversal da Amostra 06, com ampliação de 200x – Microscópio Óptico



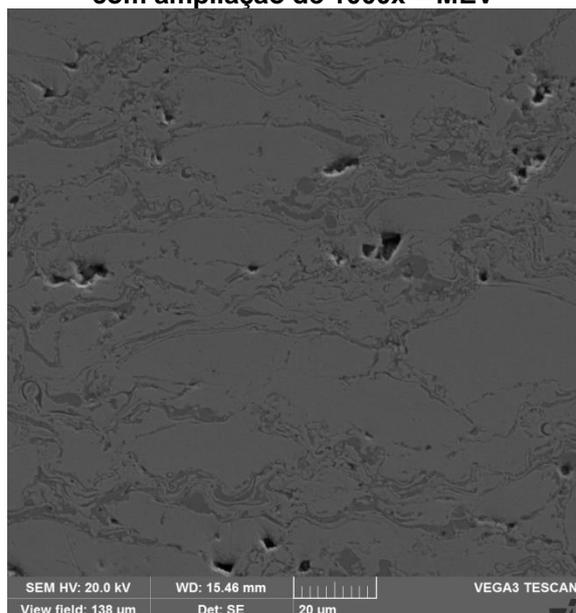
Fonte: Autoria Própria

Tabela 9 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento na Amostra 06

Poros (%)	Óxidos (%)
0,39	12,93

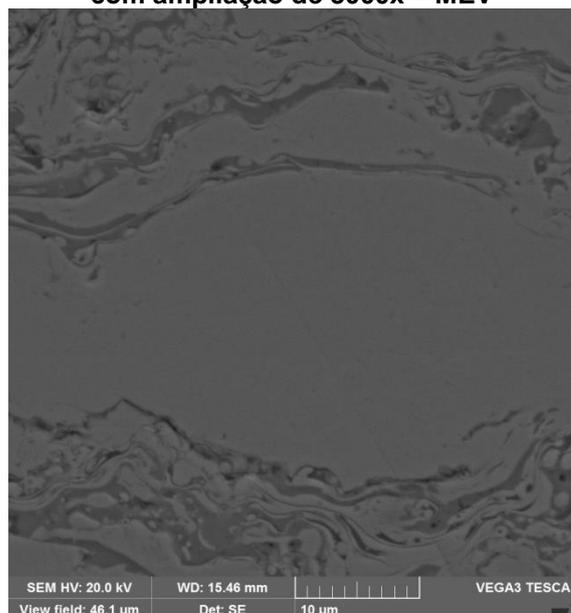
Fonte: Autoria Própria

Figura 26 – Seção transversal da Amostra 06, com ampliação de 1000x – MEV



Fonte: Autoria Própria

Figura 27 – Seção transversal da Amostra 06, com ampliação de 3000x – MEV

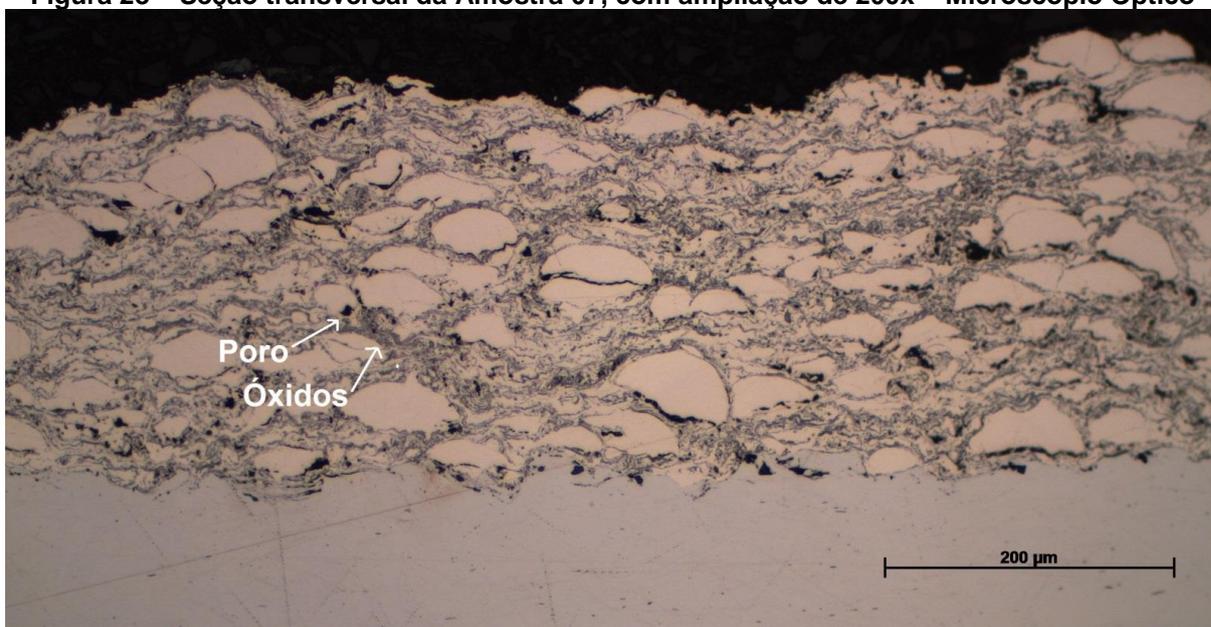


Fonte: Autoria Própria

#### 4.3.7 Experimento 07

Na Figura 28 é mostrada a morfologia do revestimento da amostra 07, em que a deposição foi feita com uma distância de 250 mm, taxa de alimentação de pó de 35 g/min e fluxo de querosene de 5 gal/hora, no processo HVOF. Na figura, pode-se identificar os poros, em algumas regiões, e os óxidos que circundam as partículas do revestimento aspergido. Na Tabela 10, é possível ver os resultados da medição da porcentagem de poros e óxidos presentes na amostra.

**Figura 28 – Seção transversal da Amostra 07, com ampliação de 200x – Microscópio Óptico**



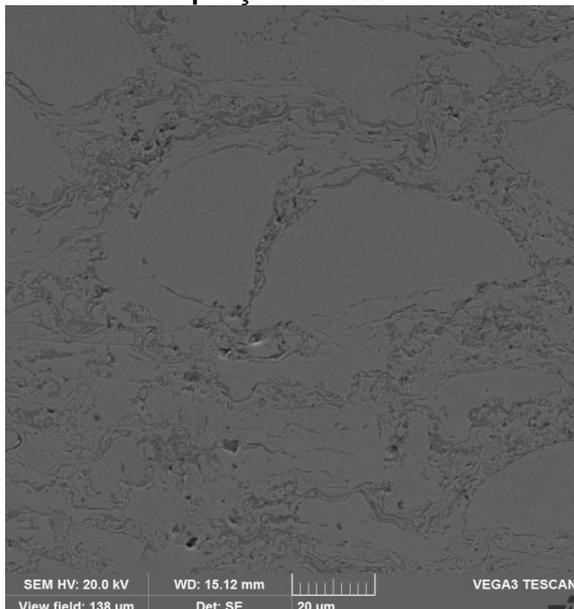
Fonte: Autorial Própria

**Tabela 10 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento na Amostra 07**

Poros (%)	Óxidos (%)
0,31	12,80

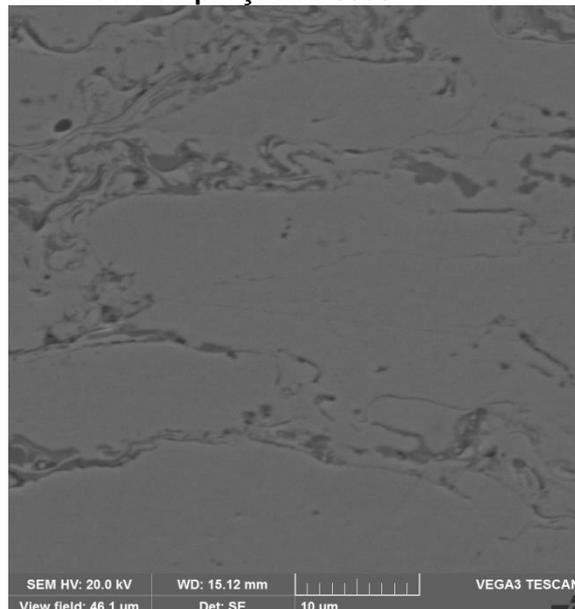
Fonte: Autorial Própria

**Figura 29 – Seção transversal da Amostra 07, com ampliação de 1000x – MEV**



**Fonte: Autoria Própria**

**Figura 30 – Seção transversal da Amostra 07, com ampliação de 3000x – MEV**

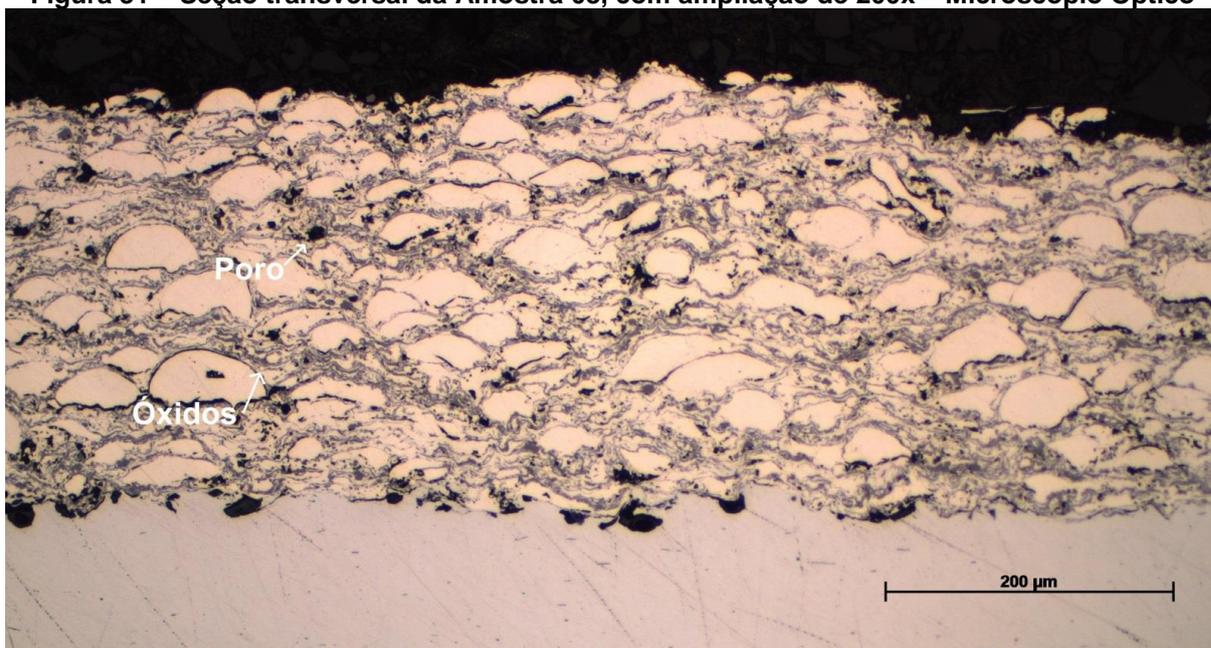


**Fonte: Autoria Própria**

#### 4.3.8 Experimento 08

Na Figura 31 é mostrada a morfologia do revestimento da amostra 08, em que a deposição foi feita com uma distância de 350 mm, taxa de alimentação de pó de 35 g/min e fluxo de querosene de 5 gal/hora, no processo HVOF. Na figura, pode-se identificar os poros, em algumas regiões, e os óxidos que circundam as partículas do revestimento aspergido. Na Tabela 11, é possível ver os resultados da medição da porcentagem de poros e óxidos presentes na amostra.

Figura 31 – Seção transversal da Amostra 08, com ampliação de 200x – Microscópio Óptico



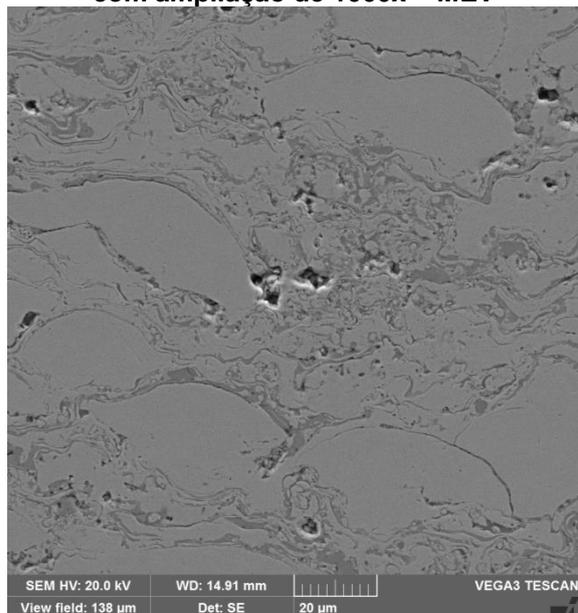
Fonte: Autoria Própria

Tabela 11 – Resultados da porcentagem de poros e óxidos do revestimento na Amostra 08

Poros (%)	Óxidos (%)
0,72	11,67

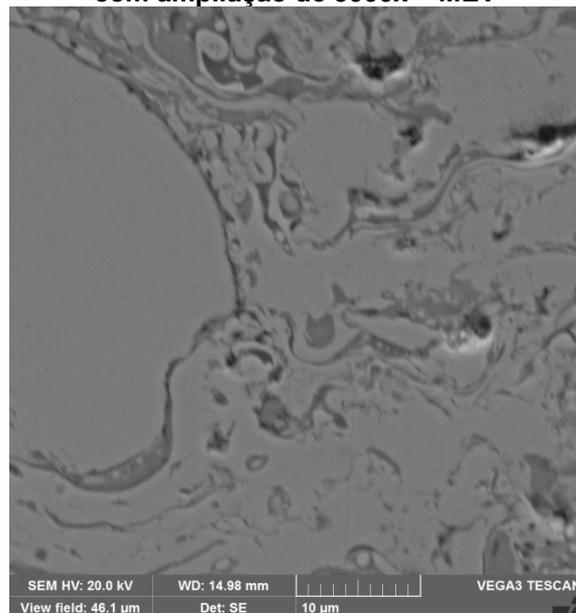
Fonte: Autoria Própria

Figura 32 – Seção transversal da Amostra 08, com ampliação de 1000x – MEV



Fonte: Autoria Própria

Figura 33 - Seção transversal da Amostra 08, com ampliação de 3000x – MEV



Fonte: Autoria Própria

#### 4.3.9 Comparação entre a Morfologia Resultante dos Experimentos

Analisando-se as imagens dos revestimentos obtidos, pode ver-se que a quantidade de poros presente é relativamente baixa. Sendo sempre os mesmos encontrados principalmente nas redondezas das partículas do pó aspergido.

Já no caso dos óxidos, constata-se que estão homogeneamente difundidos por todo revestimento, porém, somente nas partes do revestimento onde houve total fusão das partículas. Já em relação as partículas maiores do material aspergido, pode-se ver uma concentração de óxidos somente envolvendo as mesmas, com seu interior sendo formado somente pelo metal aspergido.

Já na questão da formação do revestimento, comparando-se as imagens de 12 a 33, é possível observar que os experimentos 01, 02 e 04, obtiveram uma maior taxa de fusão completa do pó aspergido, em relação aos demais. Esse fato pode ser constatado pelo fato que existe uma menor quantidade de partículas inteiras nesses revestimentos, e além disso, essas partículas encontram-se mais achatadas, quando comparadas as demais.

Ao analisarmos a Figura 12 , por exemplo, vê-se que as lamelas presentes estão distanciadas umas das outras, e seu formato resultante é proveniente de uma compressão das mesmas, resultando em um aspecto achatado. Além disso, vê-se que a morfologia dominante nesse revestimento é basicamente formada pelo metal aspergido fundido, intercalado por faixas de óxidos.

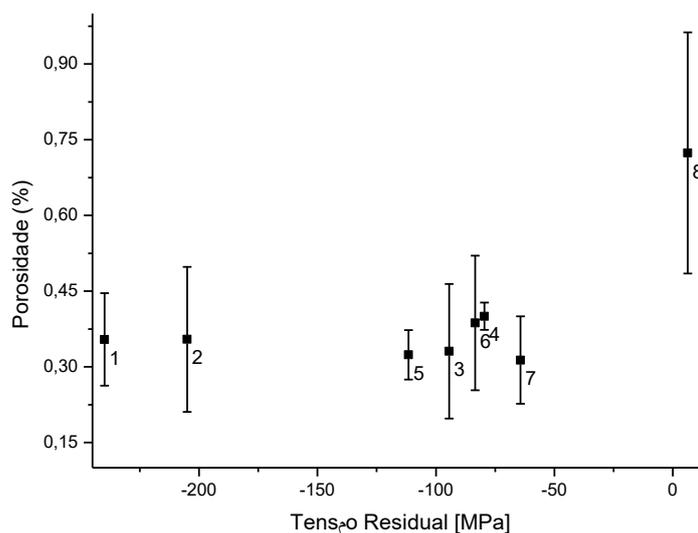
Porém, ao analisarmos a Figura 24, vê-se que a morfologia dominante é formada pelas partículas do pó, que estão sobrepostas umas às outras, apresentando um menor achatamento, e além disso, vê-se que a camada de óxido envolvendo as mesmas, é consideravelmente mais espessa, em relação as da Figura 12.

#### 4.3.10 Comparação da Porosidade e Porcentagem de Óxidos

Na Figura 34 é apresentado um gráfico onde é possível comparar a porosidade das amostras aspergidas em relação com a tensão residual das

mesmas. Fica evidente que nas amostras que apresentaram valores de tensão residual negativos (compressiva), não se vê nenhuma influência da tensão residual na porosidade, pois todos os valores obtidos ficaram próximos dos 0,3 %. Já na amostra 08, que é a única que apresentou uma tensão residual trativa, pode se ver que a mesma obteve um valor duas vezes maior que a média das outras amostras analisadas, podendo assim, correlacionar a presença de tensões residuais trativas na amostra com o aumento da porosidade.

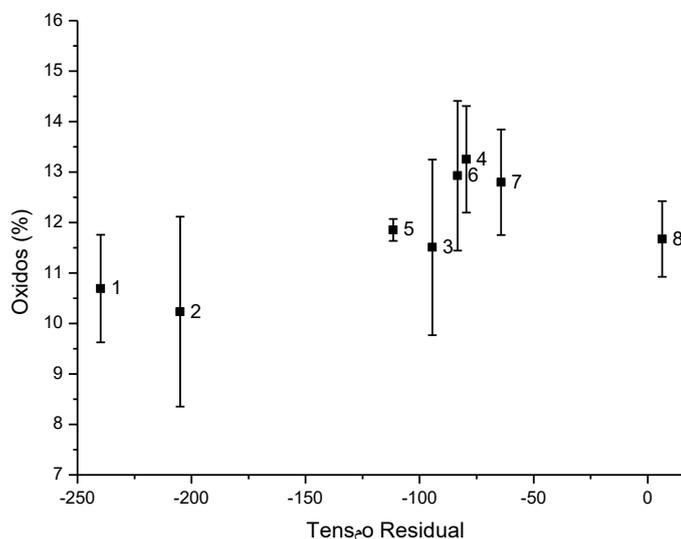
**Figura 34 – Gráfico comparativo da porosidade resultante dos revestimentos com a tensão residual**



**Fonte: Autoria Própria**

Na Figura 35, é apresentado um gráfico onde é possível comparar a porcentagem de óxidos das amostras aspergidas em relação com a tensão residual das mesmas. Analisando os valores da porcentagem de óxidos com seus respectivos desvios, pode-se ver que não há uma influência direta da tensão residual nesses dados, pois mesmo com uma variação entre os resultados, não se evidencia uma redução, ou aumento dos mesmos com o aumento dos valores de tensão residual.

**Figura 35 – Gráfico comparativo da porcentagem de óxidos dos revestimentos com a tensão residual**

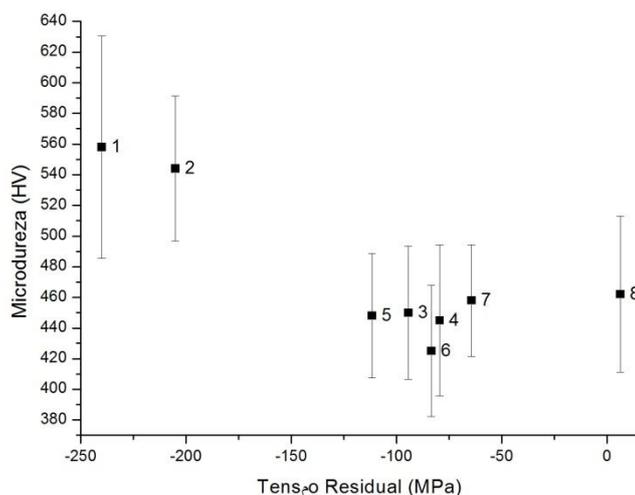


**Fonte: Autorial Própria**

#### 4.4 MICRODUREZA DOS REVESTIMENTOS

Na Figura 36 é apresentado um gráfico onde é possível comparar a dureza média dos revestimentos aspergidos. Nesta imagem fica evidente o aumento de dureza do revestimento com o aumento da tensão residual dos mesmos, neste caso ligado diretamente ao aumento da velocidade das partículas.

Analisando-se esses resultados, pode-se observar que existe uma tendência de valores mais elevados de microdureza, quando há uma maior tensão residual compressiva no revestimento. Porém, vale-se ressaltar que na faixa entre -125 MPa e +6 MPa, não se verificou grandes diferenças nos valores de microdureza obtidos. Isso pode ser explicado devido ao fato que tensões residuais compressivas, são tidas como benéficas a estrutura resultante em processos mecânicos, possibilitando uma maior adesão entre as lamelas. Ou seja, comparando os extremos do gráfico (amostras 1 e 8), evidencia-se a total influência da tensão residual do revestimento com sua microdureza, com valores mais altos de microdureza, para maiores valores de tensão residual compressiva (negativos).

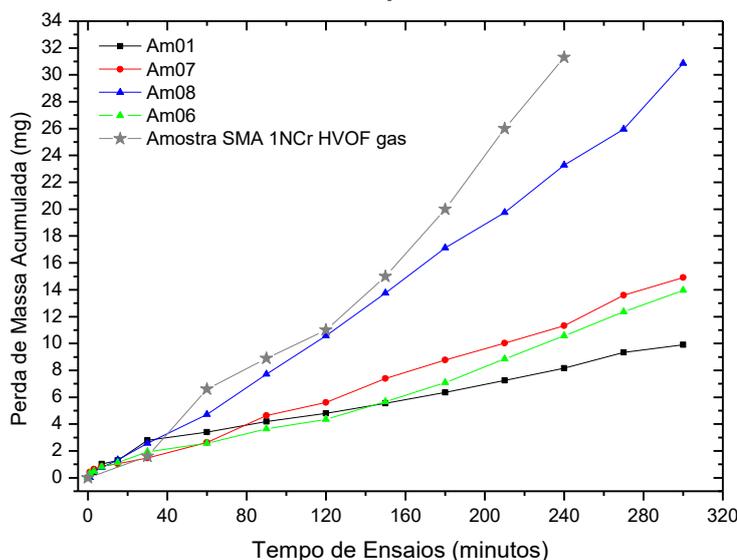
**Figura 36 – Gráfico comparativo das microdurezas dos revestimentos com a tensão residual**

**Fonte: Autoria Própria**

#### 4.5 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CAVITAÇÃO DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS

Os resultados de cavitação, sobre os revestimentos depositados na etapa de análise da variação de parâmetros indicam uma mudança de comportamento com a tensão residual, ou seja, o aumento da tensão residual compressiva levou a um aumento da resistência à cavitação do revestimento, Figura 37. Além deste aumento da resistência à cavitação dos revestimentos com a tensão residual, pode-se observar que os revestimentos depositados com HVOF a querosene apresentaram uma resistência muito superior à das amostras depositadas com HVOF com combustível gasoso.

**Figura 37 – Gráfico comparativo da resistência à cavitação dos revestimentos depositados com HVOF a querosene**

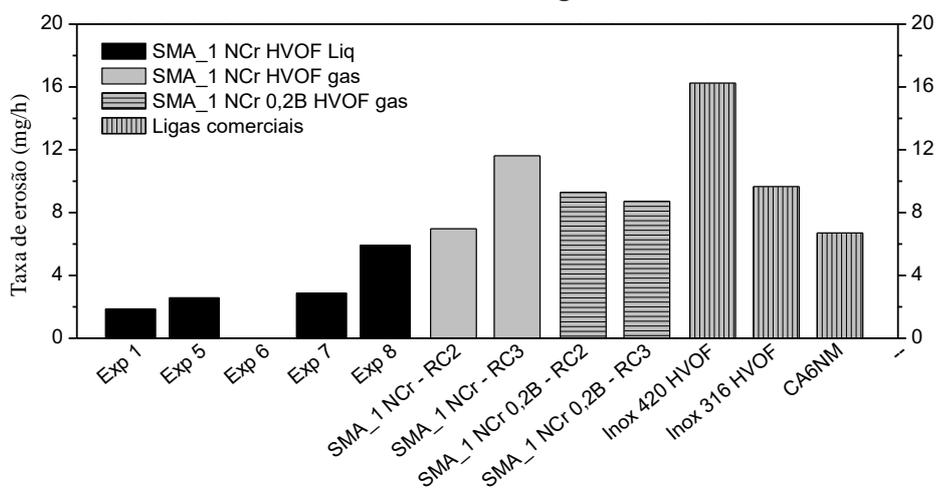


**Fonte: Autoria Própria**

Na Figura 38 é apresentado um gráfico com os resultados de perda de massa acumulada de amostras das ligas em teste SMA 1NCr e ligas comerciais depositadas no presente projeto. Pode-se observar que a liga SMA 1NCr depositada com HVOF gás apresenta resistência à cavitação semelhante à do metal base CA6NM, e superior à das ligas comerciais 316 e 420 depositadas por HVOF.

Entretanto a liga experimental SMA\_1NCr depositada por HVOF com combustível líquido apresentou uma resistência muito superior à do aço CA6NM obtendo valores de perda de massa de 1,87mg/h, enquanto que o aço CA6NM apresenta uma perda de massa de 6,7mg/h. O revestimento depositado com HVOF a querosene com menor resistência foi a amostra 08 com uma perda de massa 5,9mg/h, ainda inferior ao metal base.

**Figura 38 – Gráfico comparativo da resistência à cavitação dos revestimentos depositados com metal base CA6NM e ligas comerciais**



**Fonte: Autoria Própria**

Estes resultados indicam o elevado benefício da deposição por HVOF líquido e da formação de tensão residual compressiva nos revestimentos depositados por esta técnica.

## 5 CONCLUSÃO

A partir dos dados coletados pelo equipamento AccuraSpray, observou-se que o aumento da velocidade das partículas está correlacionado com a diminuição na distância de deposição e com o aumento do fluxo de querosene. A temperatura das partículas praticamente não apresentou variação com os parâmetros utilizados.

A taxa de alimentação de pó não apresenta grande influência sobre a velocidade de partículas em voo, porém o aumento da taxa tem grande influência na redução da tensão residual. Este efeito é atribuído ao aumento de partículas em contra fluxo gerado por partículas não aderidas (ricocheteadas).

Os parâmetros que determinaram um aumento na velocidade das partículas também geraram um aumento na tensão compressiva dos revestimentos, sendo que, para os parâmetros utilizados, as tensões residuais dos revestimentos variaram entre -240 a +6,3 MPa. Apesar desta variação na tensão residual, não foi observado uma alteração significativa na porosidade e fração de óxidos dos revestimentos para os parâmetros selecionados.

Em relação a dureza, os revestimentos com tensão residual compressiva acima de -200 MPa apresentaram um aumento significativo, de 440 HV para acima de 540 HV na média.

Este trabalho mostra que há uma forte correlação entre as tensões residuais do revestimento com a sua resistência à cavitação. E a tensão residual está diretamente relacionada com o efeito peening gerado pela velocidade de partículas. O aumento das tensões residuais compressivas levou a um aumento significativo da resistência à cavitação dos mesmos. Estes resultados indicam que a utilização de técnicas de deposição com maior velocidade de projeção de partículas é importante para o aumento da resistência à cavitação e que o monitoramento da formação das tensões residuais dos revestimentos aspergidos in-situ é válido para a definição das propriedades à cavitação dos revestimentos aspergidos.

## REFERÊNCIAS

LUO, W.; SELVADURAI, U.; TILLMANN, W. Effect of Residual Stress on the Wear Resistance of Thermal Spray Coatings. **Journal Of Thermal Spray Technology**, v. 25, n. 1-2, p. 321-330, 2015.

BRITO., V. R. S. **Caracterização de Revestimentos Metálicos Aspergidos Termicamente por Arco Elétrico**. 2010. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Cefet/rj, Rio de Janeiro, 2010.

SUCHARSKI, G. B.. **Estudo da erosão por cavitação sobre diferentes morfologias de revestimentos de FeMnCrSiB aplicados por aspensão térmica chama FS e HVOF com tratamento de shot peening..** 2016. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

VAZ, C. T. Avaliação da Resistência à erosão por cavitação do metal de soldas produzidas com consumíveis tipo 13%CR - 4%Ni - 0,4%Mo. 2014. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

HORTA, C. A. et al. Cavitação em Turbinas Hidráulicas do Tipo Francis e Kaplan no Brasil. Brasília: Eletronorte, 1997. 9 p.

VARIS, T. *et al.* Formation Mechanisms, Structure, and Properties of HVOF-Sprayed WC-CoCr Coatings: An Approach Toward Process Maps. **Journal Of Thermal Spray Technology**, v. 23, n. 6, p. 1009-1018, 2014.

COFINO, R. C.. Análise das tensões residuais em uma junta soldada em condição overmatch. 2010. 82 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Fei, São Bernando do Campo, 2010.

WANG, Q. *et al.* The Parameters Optimization and Abrasion Wear Mechanism of Liquid Fuel HVOF Sprayed Bimodal WC–12Co Coating. **Surface And Coatings Technology**, v. 206, n. 8-9, p. 2233-2241, 2012.

SHABANA *et al.* Tribological and Corrosion Behavior of HVOF Sprayed WC-Co, NiCrBSi and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr Coatings and Analysis Using Design of Experiments. **Materials Today: Proceedings**, [s.l.], v. 2, n. 4-5, p. 2654-2665, 2015.

ZHANG, D; HARRIS, S. J.; McCARTNEY, D. G. Microstructure Formation and Corrosion Behaviour in HVOF-Sprayed Inconel 625 Coatings. **Materials Science And Engineering A**, v. 344, n. 1-2, p. 45-56, 2003.

TABBARA, H.; GU, S. Computational Simulation of Liquid-Fuelled HVOF Thermal Spraying. **Surface And Coatings Technology**, v. 204, n. 5, p. 676-684, 2009.

SINGH, R.; TIWARI, S. K.; MISHRA, S. K. Cavitation Erosion in Hydraulic Turbine Components and Mitigation by Coatings: Current Status and Future Needs. **Journal Of Material Engineering And Performance**, v. 21, n. 7, p. 1539-1551, 2011.

FU, W. T. *et al.* The Resistance to Cavitation Erosion of CrMnN Stainless Steels. **Journal Of Materials Engineering And Performance**, v. 7, n. 6, p. 801-804, 1998.

WILL, C. R. *et al.* Estudo Comparativo de Três Ligas Austeníticas com Cobalto Resistentes à Cavitação Depositadas por Plasma Pulsado Térmico. **Soldagem & Inspeção (impresso)**, v. 15, n. 1, p. 52-60, 2010.

BARBOSA, B. R. M.; TEODÓSIO, J. R.; NETTO, T. A. Evolução do Estado de Tensões Residuais Introduzidas por Shot Peening em Aços Inoxidáveis Martensíticos. In: 2º **Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**. Rio de Janeiro, 15-18 jun. 2003..

RIBEIRO, J. E; VAZ, M. V.; PILOTO, P. Medição de Campos de Tensões Residuais: Estudo Preliminar. In: **VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional**. Évora 14-16 abr. 2003.

PUKASIEWICZ, A. G. M. *et al.* Influência da Refusão por Plasma na Microestrutura de um Revestimento Fe-Mn-Cr-Si Depositado por Aspersão Térmica Arco Elétrico sobre Aço Inoxidável ASTM A743-CA6NM. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, n. 1, p.65-75, 2012.

MODENESI, P. J. Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico. **Dissertação** – Universidade Federal de Minas Gerais, Pampulha, 2008. Disponível em: <[http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/tensao\\_residual.pdf](http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/tensao_residual.pdf) >. Acesso em 15 dez. 2013

MATEKICEK, J.; SAMPATH, S. In situ Measurement of Residual Stresses and Elastic Moduli in **Thermal Sprayed Coatings: Part 1: Apparatus and Analysis**, *Acta Mater.*, 51(3), p 863-872, 2003.

**American Standard for Testing and Materials** - ASTM E384-99: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken: ASTM, 1999.

**American Standard for Testing and Materials** - ASTM G32-00: Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus. West Conshohocken: ASTM, 2000

VACKEL, A., DWIEDI, G., SAMPATH S. Structurally Integrated, Damage Tolerant, Thermal Spray Coatings, **Journal of Material**, 2015, v. 67, nº 7, 1540-1553, 2015.

OKSA, M.; METSÄJOKI, J. Optimizing NiCr and FeCr HVOF Coating Structures for High Temperature Corrosion Protection Applications. **Journal Of Thermal Spray Technology**, v. 24, n. 3, p. 436-453, 2014.

GUI, M. *et al.* Influence of Processing Parameters on Residual Stress of High Velocity Oxy-Fuel Thermally Sprayed WC-Co-Cr Coating. **Journal Of Materials Engineering And Performance**, v. 21, n. 10, p. 2090-2098, 2012.

VAIDYA, A. *et al.* An Integrated Study of Thermal Spray Process–Structure–Property Correlations: A Case Study for Plasma Sprayed Molybdenum Coatings. **Materials Science And Engineering: A**, v. 403, n. 1-2, p.191-204, 2005.

TOSHA, K. Influence of Residual Stresses on the Hardness Number in the Affected Layer Produced by Shot Peening. In: **2nd Asia-Pacific Forum on Precision Surface Finishing and Deburring Technology**. Seul, jul. 2002.

LUO, W., SELVADURAI, U., TILLMANN, W. Effect of Residual Stress on the Wear Resistance of Thermal Spray Coatings, **Journal Of Thermal Spray Technology**, v. 25, n.1, p.321-330, 2015.

VALAREZO, A., SAMPATH, S. An Integrated Assessment of Process-Microstructure-Property Relationships for Thermal-Sprayed NiCr Coatings, **Journal Of Thermal Spray Technology**, v. 20, n.6, p.1244-1258, 2011.

WANG, Z., ZHU, J. Cavitation erosion of Fe-Mn-Si-Cr shape memory alloys, **Wear**, v. 256, n° 1-2, p. 66-72, jan. 2004.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical Behavior of Materials**. Nova Jersey: Prentice-Hall, 1998.

American Standard of Testing Materials: ASTM G32-16: **Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus**, 2016.