

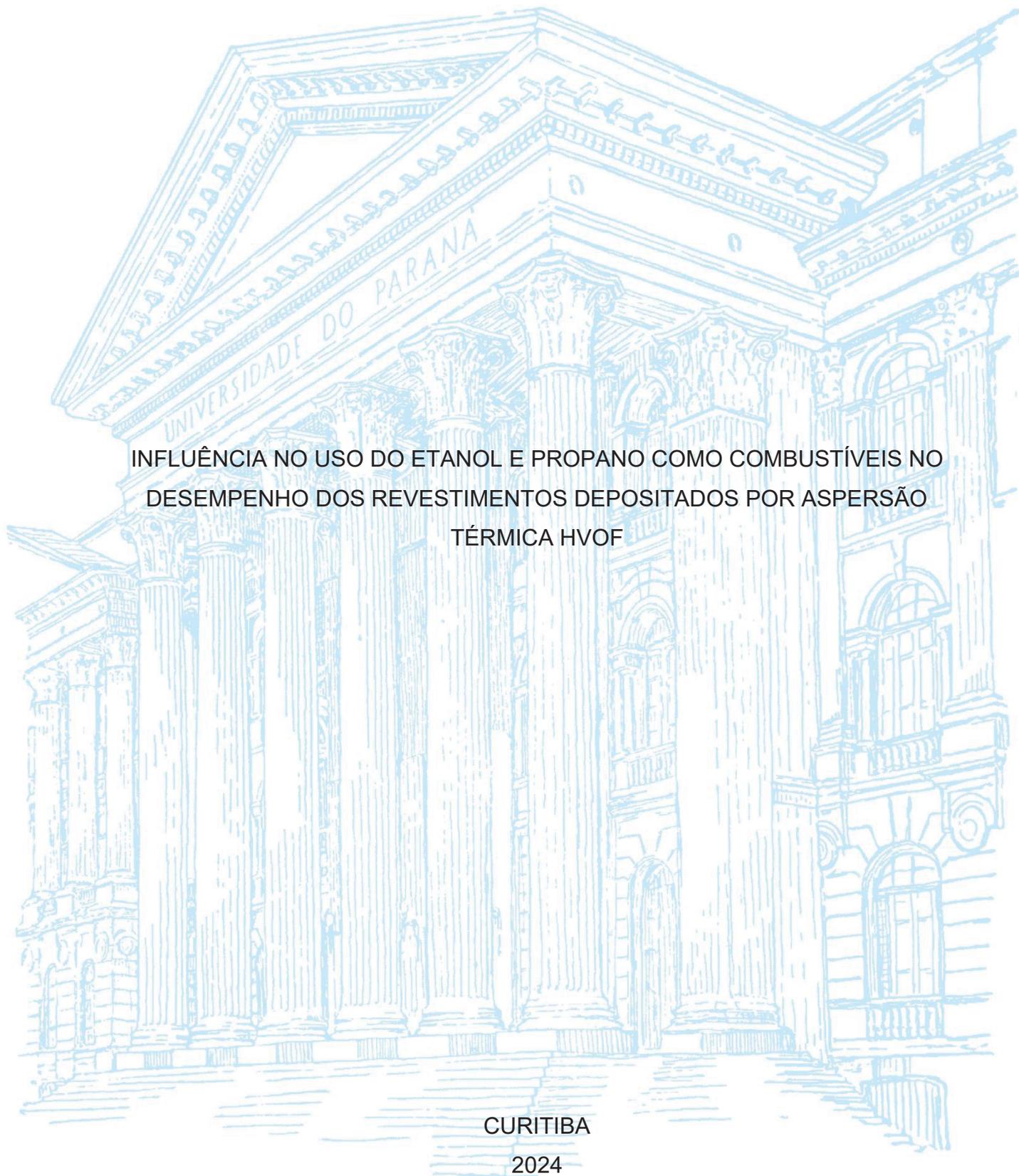
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

SARAH ANABELE SILVA

INFLUÊNCIA NO USO DO ETANOL E PROPANO COMO COMBUSTÍVEIS NO
DESEMPENHO DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR ASPERSÃO
TÉRMICA HVOF

CURITIBA

2024



SARAH ANABELE SILVA

INFLUÊNCIA NO USO DO ETANOL E PROPANO COMO COMBUSTÍVEIS NO
DESEMPENHO DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR ASPERSÃO
TÉRMICA HVOF

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, área de concentração Fabricação, Materiais e Sustentabilidade, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Bavaresco Sucharski

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Silva, Sarah Anabele

Influência no uso do etanol e propano como combustíveis no desempenho dos revestimentos depositados por aspersão térmica HVOF / Sarah Anabele Silva. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Ramón Sigifredo Cortés Paredes

Coorientador: Gustavo Bavaresco Sucharski

1. Aspersão térmica. 2. Cavitação. 3. Álcool. 4. Propano. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Cortés Paredes, Ramón Sigifredo. IV. Sucharski, Gustavo Bavaresco. V. Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
MECÂNICA - 40001016040P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **SARAH ANABELLE SILVA** intitulada: **INFLUÊNCIA NO USO DO ETANOL E PROPANO COMO COMBUSTÍVEIS NO DESEMPENHO DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA HVOF**, sob orientação do Prof. Dr. RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 19 de Dezembro de 2024.

Assinatura Eletrônica

13/01/2025 08:25:16.0

RAMON SIGIFREDO CORTES PAREDES

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

07/02/2025 15:11:05.0

SIDNEI ANTONIO PIANARO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA)

Assinatura Eletrônica

07/01/2025 08:34:41.0

ANDERSON GERALDO MARENDA PUKASIEWICZ

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Centro Politécnico - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531980 - Tel: 41 3361-3701 - E-mail: pgmec@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 420535

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 420535

Dedico este trabalho aos meus pais, Gilmara e Marcos, que são a minha estrutura, meu alicerce. E ao Tiago, meu companheiro e incentivador.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo apoio incondicional e incentivo constante, que sempre foram a minha base e força para seguir em frente. À minha irmã, pela amizade, parceria e pela presença fundamental em todos os momentos dessa jornada.

Ao meu companheiro Tiago, pela paciência, amor e carinho, que tornaram os desafios mais leves e me deram a motivação para seguir adiante com confiança.

Ao Professor Ramon e ao Gustavo, pela honra de serem meus orientadores, pelos ensinamentos valiosos, pela amizade sincera e pelo exemplo de profissionalismo que me inspirou diariamente.

Ao Professor Hélio Padilha, Doutor em Engenharia, por sua contribuição fundamental como membro da banca avaliadora, sempre oferecendo uma troca enriquecedora de conhecimento e experiência.

Aos pesquisadores Irene, Igor e Cleiton, ao técnico Maicon e à equipe do REVSOLDA, pelo auxílio essencial na realização dos experimentos, pela generosa troca de saberes e pelo trabalho colaborativo que tanto contribuiu para o sucesso desta pesquisa.

Ao Professor Anderson, pelos ensinamentos compartilhados e pelas valiosas trocas de conhecimento, e ao LABMULT pelo apoio na utilização dos equipamentos que foram indispensáveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao PG-Mec – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, por viabilizar a realização deste sonho e pela formação acadêmica que me proporcionou. Ao secretário Jonatas, pela paciência e disposição em sempre sanar minhas dúvidas e facilitar todos os processos administrativos.

Ao LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, pela bolsa de mestrado e pelo suporte na realização do projeto de pesquisa, além do acesso e utilização dos equipamentos do REVSOLDA, essenciais para a execução dos experimentos.

Aos estagiários do LACTEC, José, Sofia e Matheus Dutra, e aos bolsistas Isabela e Pedro, pelo apoio técnico com os equipamentos e pela preparação das amostras, sem os quais o andamento do projeto não teria sido possível.

Aos membros da banca, Professor Dr. Sidnei A. Pianaro e Professor Dr. Anderson Pukasiewicz, pelas atentas revisões e pelas excelentes contribuições, que enriqueceram e aprimoraram a qualidade final deste trabalho.

Ao LABATS, pela colaboração e suporte técnico em diversos momentos.

A todas as pessoas que, de alguma forma, estiveram ao meu lado, oferecendo seu apoio, compartilhando experiências ou contribuindo para o sucesso desta pesquisa. Agradeço profundamente a cada um de vocês.

“Um livro, uma caneta, uma criança e um professor podem mudar o mundo.”

(MALALA YOUSAFZAI, 2013)

RESUMO

Os diferentes revestimentos depositados pelos processos de aspersão térmica apresentam características morfológicas distintas. No processo HVOF (High Velocity Oxy-Fuel – Aspersão térmica a chama de alta velocidade) o modelo de pistola do tipo com alimentação gasosa ou líquida como etanol e propano, pode produzir revestimentos resistentes à cavitação e, conseqüentemente, melhorar o desempenho das ligas aplicadas. Dessa forma, esta pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de avaliar as influências dos combustíveis etanol e propano nas características dos revestimentos de aço inoxidável austenítico 316L. Os parâmetros avaliados foram: estequiometria da reação, fluxo mássico de gases e líquidos que compõem os elementos necessários para a combustão, taxa de alimentação do pó metálico carregado através de um gás inerte e distância entre a pistola e o substrato a ser depositado. As condições de deposição foram otimizadas utilizando a metodologia de Taguchi, e os resultados foram analisados estatisticamente para identificar os principais fatores que afetam a qualidade dos revestimentos. Após a obtenção dos revestimentos, foram então realizadas análises de porosidade, teor de óxidos, microdureza, espessura, tenacidade à fratura e resistência à erosão por cavitação. Os resultados evidenciaram que os revestimentos depositados com etanol apresentaram menor porosidade, podendo chegar a 0,2% em relação a 1% de propano; menor teor de óxidos, podendo chegar a 2% em relação aos 4,5% de propano; maior dureza 450 em relação a 400 HV e tenacidade 3,5 para $2,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, além de maior resistência à cavitação, podendo chegar a valores de 0,01mg/min comparado a 0,04mg/min para propano. Esses resultados foram associados à combustão de etanol, que favorece uma velocidade mais alta das partículas e temperatura relativamente menor que a pistola de propano. Como característica do processo de aspersão, os revestimentos possuem porosidade e óxidos, o que poderia comprometer a resistência à cavitação, por tanto a importância de se avaliar e quantificar além da porosidade, e teor de óxidos, também a microestrutura, microdureza Vickers, espessura, tenacidade à fratura e resistência à erosão por cavitação. Conclui-se que o combustível escolhido associado à tecnologia da pistola exerce influência direta na qualidade do revestimento, e a seleção deve considerar as demandas específicas de cada aplicação. O etanol mostrou-se ideal para aplicações que exigem alta resistência mecânica, enquanto o propano oferece vantagens em termos de espessura e volume de deposição. Esta análise reforça a importância do ajuste dos parâmetros de deposição para maximizar as propriedades desejadas dos revestimentos.

Palavras-chave: Aspersão térmica; HVOF; HVOF propano; HVOF etanol; Cavitação.

ABSTRACT

The various coatings deposited through thermal spraying processes exhibit distinct morphological characteristics. In the High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) process, the type of spray gun, which uses either gaseous or liquid fuels such as ethanol or propane, can produce coatings resistant to cavitation, thereby enhancing the performance of the applied alloys. Accordingly, this research evaluates the influence of ethanol and propane fuels on the properties of 316L austenitic stainless steel coatings. The parameters evaluated included reaction stoichiometry, mass flow rates of the gases and liquids required for combustion, feed rate of the metallic powder carried by an inert gas, and the distance between the spray gun and the substrate to be coated. Deposition conditions were optimized using the Taguchi methodology, and the results were analyzed statistically to identify the primary factors influencing coating quality. Following the deposition of the coatings, analyses were conducted to assess porosity, oxide content, microhardness, thickness, fracture toughness, and resistance to cavitation erosion. The findings revealed that ethanol-deposited coatings exhibited superior performance, with lower porosity (down to 0.2%, compared to 1% for propane), reduced oxide content (down to 2% compared to 4.5% for propane), higher hardness (450 HV compared to 400 HV), greater fracture toughness (3.5 MPa \sqrt{m} compared to 2.5 MPa \sqrt{m}), and enhanced resistance to cavitation erosion (as low as 0.01 mg/min compared to 0.04 mg/min for propane). These results were attributed to ethanol combustion, which resulted in higher particle velocities and relatively lower temperatures than propane-fueled spray guns. As a characteristic of the thermal spraying process, coatings inherently exhibit porosity and oxides, which may compromise their cavitation resistance. Therefore, it is essential to evaluate and quantify not only porosity and oxide content, but also microstructure, Vickers microhardness, thickness, fracture toughness, and resistance to cavitation erosion. The choice of fuel, along with spray gun technology, directly influences the coating quality, and should align with the specific requirements of each application. Ethanol was found to be ideal for applications demanding high mechanical strength, whereas propane demonstrated advantages in terms of coating thickness and deposition volume. This analysis underscores the importance of fine-tuning deposition parameters to optimize the desired properties of the coatings.

Keywords: Thermal spray; HVOF; HVOF propane-fueled; HVOF ethanol-fueled; Cavitation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CLASSIFICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ASPERSÃO TÉRMICA E SUAS FONTES DE ENERGIA.	20
FIGURA 2 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PISTOLA E SUBSTRATO REVESTIDO DA TÉCNICA DE ASPERSÃO TÉRMICA	21
FIGURA 3 – PISTOLA DE DEPOSIÇÃO HVOF DJ2700 COM COMBUSTÍVEL GASOSO.....	22
FIGURA 4 – PISTOLA DE DEPOSIÇÃO HVOF QUEROSENE LÍQUIDO: JP5000 ..	24
FIGURA 5 – PISTOLA DE DEPOSIÇÃO HVOF COM ETANOL: E-GUN	25
FIGURA 6 – TEMPERATURA E VELOCIDADE RESULTANTES DA COMBUSTÃO DE ETANOL E OXIGÊNIO.....	26
FIGURA 7 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MORFOLOGIA DE UM REVESTIMENTO.....	27
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FENÔMENO DE CAVITAÇÃO	29
FIGURA 9 – LOCAIS DE CAVITAÇÃO PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO EM TURBINA FRANCIS	31
FIGURA 10 -MICROESTRUTURA DE REVESTIMENTO 316L COM DIFERENTES λ , TODAS AS AMOSTRAS UTILIZARAM 300MM COMO DISTÂNCIA DE DEPOSIÇÃO PARA HVOF QUEROSENE.	35
FIGURA 11 – MICROESTRUTURA DE REVESTIMENTO $Cr_3C_2 - NiCr$ COM DIFERENTES λ APLICADOS POR HVOF ETANOL	37
FIGURA 12 – FLUXOGRAMA METODOLOGIA	38
FIGURA 13 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA DEPOSIÇÃO.....	41
FIGURA 14 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA DEPOSIÇÃO.....	42
FIGURA 14 – CONFIGURAÇÃO UTILIZADA COMO PADRÃO PARA DEPOSIÇÃO EM TODAS AS AMOSTRAS.....	46
FIGURA 15 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MEDIÇÃO DE POROSIDADE POR ANÁLISE DE IMAGENS. EM A) IMAGENS POR MEV COM AMPLIAÇÃO DE 2000X; EM B) A MESMA IMAGEM APÓS ANÁLISE.....	50

FIGURA 16 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MEDIÇÃO DE POROSIDADE POR ANÁLISE DE IMAGENS. EM A) IMAGENS POR MEV COM AMPLIAÇÃO DE 500X; EM B) ÁREA REFERENTE AO REVESTIMENTO DA MESMA IMAGENS APÓS ANÁLISE.	51
FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA INDENTADOR VICKERS.....	52
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO DE CAVITAÇÃO	54
FIGURA 19 – GEOMETRIA DA PONTEIRA DE SACRIFÍCIO.....	54
FIGURA 13 - PARTÍCULAS DE 316L ANALISADAS NO MEV. A) 500X; B) 2000X.	56
FIGURA 21 - LEGENDA PARA AS TABELAS DE “PARÂMETROS OTIMIZADOS”.	67
FIGURA 22 - MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO DE HVOF ETANOL. (A) EXP 9 MELHOR RESULTADO, (B) EXP 5 MENOS SATISFATÓRIO.	68
FIGURA 24 - MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO DE 1003 HVOF PROPANO. (A) EXP 09 MELHOR RESULTADO, (B) EXP 03 MENOS SATISFATÓRIO.....	81

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - GRÁFICO REPRESENTATIVO DA TAXA DE EROÇÃO POR CAVITAÇÃO	30
GRÁFICO 2 – JANELA DE DEPOSIÇÃO HVOF PROPANO.....	40
GRÁFICO 3 – JANELA DE DEPOSIÇÃO HVOF ETANOL	40
GRÁFICO 4 - ESPESSURA DAS AMOSTRAS (μm), PISTOLA ETANOL.....	59
GRÁFICO 5 - MICRODUREZA DAS AMOSTRAS (HV), PISTOLA ETANOL	60
GRÁFICO 6 – TENACIDADE A FRATURA (MPam), PISTOLA ETANOL.....	60
GRÁFICO 7 – PORCENTAGEM DE ÓXIDOS E POROS, PISTOLA ETANOL.....	61
GRÁFICO 8 – CURVA RELATIVA À PERDA DE MASSA POR CAVITAÇÃO AO LONGO DO TEMPO, PARA CADA AMOSTRA.....	62
GRÁFICO 9 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À POROSIDADE, DEPOSITADO POR ETANOL.....	63
GRÁFICO 10 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO AO TEOR DE ÓXIDOS, DEPOSITADO POR ETANOL.....	64
GRÁFICO 11 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À MICRODUREZA VICKERS, DEPOSITADO POR ETANOL.	65

GRÁFICO 12 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À ESPESSURA, DEPOSITADO POR ETANOL.....	65
GRÁFICO 13 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À TENACIDADE, DEPOSITADO POR ETANOL.....	66
GRÁFICO 14 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À TAXA DE EROSÃO POR CAVITAÇÃO, DEPOSITADO POR ETANOL.....	67
GRÁFICO 15 - ESPESSURA DAS AMOSTRAS (μm), PISTOLA PROPANO.	71
GRÁFICO 16 - MICRODUREZA DAS AMOSTRAS (μm), PISTOLA PROPANO.	72
GRÁFICO 17 - TENACIDADE A FRATURA (MPam), PISTOLA PROPANO.....	72
GRÁFICO 18 - PORCENTAGEM DE ÓXIDOS E POROS, PISTOLA PROPANO....	73
GRÁFICO 19 - CURVA RELATIVA À PERDA DE MASSA POR CAVITAÇÃO AO LONGO DO TEMPO, PARA CADA AMOSTRA.....	74
GRÁFICO 20 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À POROSIDADE, DEPOSITADO POR PROPANO.	75
GRÁFICO 21 – EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO AO TEOR DE ÓXIDOS, DEPOSITADO POR PROPANO.	76
GRÁFICO 22 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À MICRODUREZA VICKERS, DEPOSITADO POR PROPANO.....	77
GRÁFICO 23 – EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À TENACIDADE, DEPOSITADO POR PROPANO.....	78
GRÁFICO 24 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À ESPESSURA, DEPOSITADO POR PROPANO.	79
GRÁFICO 25 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À TAXA DE EROSÃO, DEPOSITADO POR PROPANO.....	80
GRÁFICO 26 - COMPARAÇÃO PARÂMETROS POROSIDADE E TEOR DE ÓXIDOS DE HVOF POR ETANOL E PROPANO.....	83
GRÁFICO 27 - COMPARAÇÃO PARÂMETROS MICROUREZA E TENACIDADE DE HVOF POR ETANOL E PROPANO.....	84
GRÁFICO 28 - COMPARAÇÃO PARÂMETROS ESPESSURA E CAVITAÇÃO DE HVOF POR ETANOL E PROPANO.....	85
GRÁFICO 30 – COMPARAÇÃO DE PERDA DE MASSA POR CAVITAÇÃO DE HOF ETANOL E PROPANO	85

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – PARÂMETROS JATEAMENTO ABRASIVO	42
QUADRO 2 – ARRANJO ORTOGONAL L9 DE TAGUCHI.....	44
QUADRO 3 – PARÂMETROS ENSAIO DE CAVITAÇÃO	55
QUADRO 4 – ANÁLISES ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA AVALIAR OS RESULTADOS.....	57
QUADRO 5 – PARÂMETROS OTIMIZADOS.....	69
QUADRO 6 – PARÂMETROS SUGERIDOS PELO FORNECEDOR	70
QUADRO 7 – PARÂMETROS OTIMIZADOS	81
QUADRO 8 - PARÂMETROS SUGERIDOS PELO FORNECEDOR	82

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA NOMINAL DA LIGA EM PESO (%)	41
TABELA 2 – PARÂMETROS DE PROCESSO VARIÁVEIS.....	47
TABELA 3 – PARÂMETROS DE PROCESSO FIXOS.....	47
TABELA 4 – DEPOSIÇÃO HVOF ETANOL (PISTOLA EGUN®).....	48
TABELA 5 - DEPOSIÇÃO HVOF PROPANO (PISTOLA DJ2700®).....	48

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ANEEL	Agência nacional de energia elétrica
ASTM	Padrão americano para teste de materiais, <i>American standard for testing materials</i>
FST®	<i>Flame Spray Technology</i> ®
HVOF	Aspersão térmica de alta velocidade, <i>High velocity oxy-fuel</i>
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão
UFPR	Universidade federal do Paraná
DOE	Planejamento de experimento, <i>Design of experiment</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

λ – Estequiometria

® - Marca registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivos específicos.....	18
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1	ASPERSÃO TÉRMICA.....	19
2.1.1	Características gerais dos processos de aspersão térmica.....	19
2.1.2	Pistola de HVOF gasoso	22
2.1.3	Pistola de HVOF Líquido	23
2.1.4	Influência das variáveis de processo.....	26
2.1.5	Revestimentos depositados por Aspersão Térmica.....	27
2.1.5.1	Microestrutura.....	27
2.2	CAVITAÇÃO	28
2.2.1	Erosão por cavitação	28
2.2.2	Cavitação em turbina Francis	30
2.2.3	Propriedades mecânicas e metalúrgicas para resistência à cavitação.....	32
2.2.4	Liga 316L.....	32
2.2.5	Resistência à cavitação de revestimentos aspergidos	33
2.3	INFLUÊNCIA DA ESTEQUIOMETRIA NO PROCESSO HVOF SOBRE A POROSIDADE E MICRODUREZA DO REVESTIMENTO	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	JANELA DE DEPOSIÇÃO.....	38
3.2	SELEÇÃO DA MATÉRIA PRIMA.....	41
3.3	REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS EQUIPAMENTOS	41
3.4	PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO	42
3.4.1	Preparação da superfície.....	42
3.5	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL – DOE	43
3.5.1	Aspersão térmica HVOF	46
3.6	CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS.....	49
3.6.1	Microscopia óptica	49
3.6.2	Microscopia Eletrônica de Varredura, MEV	49
3.6.3	Análise da Fração de área de óxidos e poros	50
3.6.4	Ensaio de microdureza Vickers	51

3.6.5	Tenacidade à fratura.....	52
3.6.6	Ensaio de erosão por cavitação.....	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO PÓ	56
4.2	ETANOL: E-GUN®	57
4.2.1	Características dos revestimentos aspergidos	57
4.2.2	Gráfico de efeitos principais	62
4.2.3	Parâmetros otimizados	67
4.2.4	Comparação sugestão de parâmetros do fornecedor.....	69
4.3	PROPANO: DJ2700®.....	70
4.3.1	Características dos revestimentos aspergidos	70
4.3.2	Gráfico de efeitos principais	74
4.3.3	Parâmetros otimizados	80
4.3.4	Comparação sugestão de parâmetros do fornecedor.....	82
4.4	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE AMBOS OS PROCESSOS.....	82
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
	REFERÊNCIAS.....	89
	APÊNDICE 1 – ANÁLISE ESTATÍSTICA	94

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica através de turbinas hidráulicas é uma fonte de energia renovável, que utiliza turbinas para converter energia potencial gravitacional em energia cinética, a fim de gerar eletricidade. Apresentou-se, em escala global, o desenvolvimento de represas de grande porte a partir da década de 1990. Em 2021, hidrelétricas contribuíram com 16% da eletricidade do mundo e 69% de toda a energia renovável, sendo utilizada por diversas nações como uma alternativa à descarbonização dos sistemas de energia (“GLOBAL ENERGY REVIEW 2021 – ANALYSIS - IEA”, [S.D.]; XU et al., 2023).

No Brasil, segundo dados divulgados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no primeiro semestre de 2023, das 160 usinas que entraram em operação, oito são pequenas centrais hidrelétricas, com 121,5 MW (2,36%); e três são centrais geradoras hidrelétricas, com 11,4 MW (0,22%). Do total instalado nas usinas do país, 52,74% correspondem às Usinas Hidrelétricas, gerando cerca de 103,5 GW (ANEEL, 2023).

As turbinas hidráulicas representam mais da metade da produção total de energia do Brasil. Sendo através delas que se converte a energia do momento linear em torque e rotação. No entanto, um dos principais problemas relacionados a manutenção dos rotores é a perda de massa por cavitação.

O processo de cavitação é caracterizado por um fenômeno físico que ocorre quando há uma variação de pressão em um fluido que, nas turbinas hidrelétricas, acontece ao longo das pás devido a variação do fluxo de água. Formando bolhas de vapor que implodem em regiões próximas da superfície metálica, acarretando uma perda de massa local. A decorrência deste fenômeno faz com que haja uma divergência em relação a superfície original, mesmo após soldagem de recuperação, agravando ainda mais o processo de erosão ao longo do tempo.

A manutenção dessas turbinas normalmente é realizada através da soldagem, aplicando-se metais de adição de aços inoxidáveis austeníticos. Estes materiais demonstram elevada tenacidade, que combinada com o endurecimento por deformação e consequente formação de martensita, apresenta elevada resistência à cavitação. No entanto, durante a soldagem ocorrem sucessivos ciclos térmicos que ocasionam em mudanças de propriedades nas zonas termicamente afetadas, formando fases frágeis que favorecem a erosão por cavitação.

Os ciclos térmicos inerentes ao processo de soldagem, aliados a dilatação do cordão de solda e as tensões residuais geradas facilitam a perda do perfil hidráulico das pás, fazendo com que haja uma erosão acentuada nessas regiões.

Portanto, a aplicação de revestimentos resistentes a cavitação, pelo processo de aspersão térmica, que não causa os problemas observados na soldagem, aliado a respectivos processos de monitoramento e otimização passou a ser mais explorado nas últimas décadas, devido a ferramentas de diagnóstico aprimoradas, criadas para melhorar o processo de revestimento (OKSA; METSÄJOKI, 2015).

Esta técnica é utilizada em aplicações em que a qualidade da superfície é de grande importância, devido a tolerâncias dimensionais do equipamento, que acabam não sendo atingidas ao longo do tempo, devido a efeitos de erosão ou corrosão. A aplicação de revestimentos também possui como vantagem a não diluição do material base, como ocorre na soldagem, aumentando a eficiência das ligas depositadas.

Para preservar a integridade estrutural das pás de turbina hidrelétrica é que a aspersão térmica é utilizada, com o objetivo de aumentar a vida útil das pás e reduzir o tempo de intervenções de manutenção e aumentar o intervalo entre paradas. Porém o processo pode apresentar desvantagens como alguma falta de aderência do revestimento a um certo nível de porosidade. Assim, foram analisados neste estudo os revestimentos obtidos a partir do processo HVOF, que permite depositar revestimentos de elevada aderência e baixa porosidade. A pesquisa visa explorar o processo HVOF utilizando dois combustíveis diferentes e, conseqüentemente, diferentes tecnologias de pistola de aspersão térmica.

Apesar dos avanços no uso da aspersão térmica para mitigar a erosão por cavitação, ainda há uma lacuna na literatura quanto à comparação sistemática dos revestimentos obtidos com diferentes tecnologias de pistola de aspersão térmica e combustíveis no processo HVOF. A escassez de dados detalhados sobre o desempenho desses revestimentos na literatura motiva a presente investigação.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral é o estudo dos revestimentos aplicados com liga comercial METCO 1003, equivalente ao aço inoxidável 316L, através dos processos HVOF de combustível gasoso (Propano) e líquido (Etanol), utilizando a metodologia de Taguchi para otimização de parâmetros.

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Neste trabalho serão desenvolvidos alguns pontos específicos para atingir o objetivo geral, descritos abaixo:

- Obter parâmetros otimizados de processo, através dos valores definidos nas janelas de deposição, para ambas as pistolas estudadas.
- Caracterizar os revestimentos (porosidade e teor de óxidos, microdureza, espessura, tenacidade à fratura, taxa de erosão por cavitação) e avaliar a influência dos parâmetros de processo nesse resultado (estequiometria da reação, fluxo mássico de fluidos, distância de deposição e taxa de alimentação do pó metálico).
- Promover uma comparação dos resultados provenientes de experimentos realizados para aspensão térmica HVOF, utilizando combustível líquido (etanol) e gasoso (propano).

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão introduzidos alguns conceitos referentes ao processo utilizado na pesquisa, sendo eles o processo de manufatura utilizado para deposição do revestimento, descrição da microestrutura obtida, fenômeno erosivo e corrosivo, respectivamente.

2.1 ASPERSÃO TÉRMICA

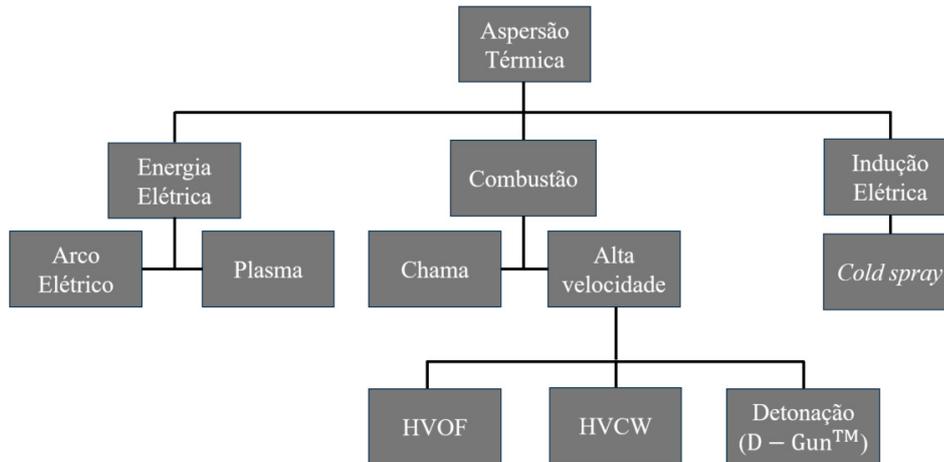
A aspersão térmica compreende um grupo de processos, que tem como finalidade a deposição sobre uma superfície previamente preparada, também conhecida como substrato, de camadas de materiais metálicos ou não metálicos, formando um revestimento.

Durante a deposição, os materiais são fundidos ou aquecidos através de uma fonte de calor e projetada por uma pistola, favorecendo o ancoramento e possível difusão dos materiais depositados no substrato e entre as partículas.

2.1.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PROCESSOS DE ASPERSÃO TÉRMICA

As fontes de calor e gases comprimidos são utilizados para elevar a temperatura e fornecer energia cinética às partículas. Essa energia pode ser fornecida através da combustão de gases, arco elétrico, plasma ou indução elétrica. Conforme demonstrado na classificação dos processos de aspersão térmica apresentada na FIGURA 1.

FIGURA 1 - CLASSIFICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE ASPERSÃO TÉRMICA E SUAS FONTES DE ENERGIA.

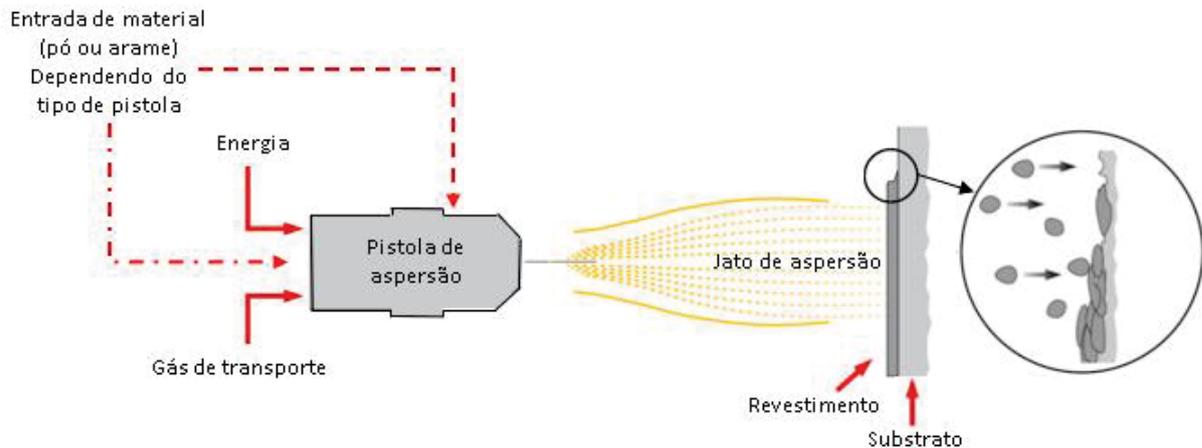


FONTE: A autora (2024).

O material a ser aspergido, em forma de partículas, é acelerado por gases de transporte sob pressão contra a superfície, deformando-se e aderindo ao substrato e, conseqüentemente, nas partículas já aderidas, gerando camadas constituídas de pequenas partículas deformadas paralelamente ao substrato, com estrutura lamelar podendo conter inclusões de óxidos, vazios e porosidade (AMERICAN WELDING SOCIETY INC., 1985).

Através da FIGURA 2 mostra-se um diagrama esquemático de uma pistola e substrato revestido da técnica de aspersão térmica, que foi desenvolvida entre 1882-1889, tendo como precursor MU Schoop de Zurique, Suíça (THAKUR; VASUDEV, 2022), este apresentou o primeiro sistema de metalização utilizando arames metálicos alimentados uniformemente através de ar comprimido e combustão com chama a gás. Já em 1940 desenvolveu-se outro tipo de pistola que tem como fonte de calor um arco voltaico, formado entre as pontas dos dois arames alimentados. Em 1950 foi desenvolvido o processo de aplicação por arco plasma e, posteriormente, deposição de pós por detonação (FAUCHAIS; HEBERLEIN; BOULOS, 2014).

FIGURA 2 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PISTOLA E SUBSTRATO REVESTIDO DA TÉCNICA DE ASPERSÃO TÉRMICA



FONTE: Adaptado de Oerlikon Metco (2016).

O processo HVOF foi desenvolvido entre 1970 e 1980 por dois cientistas Browning e Witfield, somente em meados de 1980 começou a ser comercializado. Esta tecnologia permitiu a transferência de partículas em velocidades hipersônicas, podendo atingir velocidades de 1000 m/s (PAWŁOWSKI, 2008; THAKUR; VASUDEV, 2022).

Os revestimentos têm o objetivo geral de reduzir as taxas de desgaste e aumentar a resistência a corrosão ou cavitação de materiais, peças e componentes estruturais. E vem sendo utilizados desde então, buscando elevar o desempenho dos sistemas mecânicos, que comumente apresentam elevadas pressões e temperaturas de trabalho, aumentando também a vida útil de componentes.

Na aspersão térmica a aderência do revestimento normalmente considera ter um substrato previamente preparado em relação a limpeza e superfície rugosa, no qual os materiais aspergidos em contato com o substrato formam o revestimento. Portanto, são três os mecanismos fundamentais, de acordo com a natureza das forças atuantes: ancoramento mecânico, químico-metalúrgico e físico. A aderência é, pois, uma combinação destes três mecanismos. As partículas em voo são aquecidas e aceleradas contra o substrato, deformando-se numa forma lenticular. Devido à área superficial da partícula e sua velocidade, estas resfriam-se rapidamente e ancoram-se mecanicamente na rugosidade da superfície.

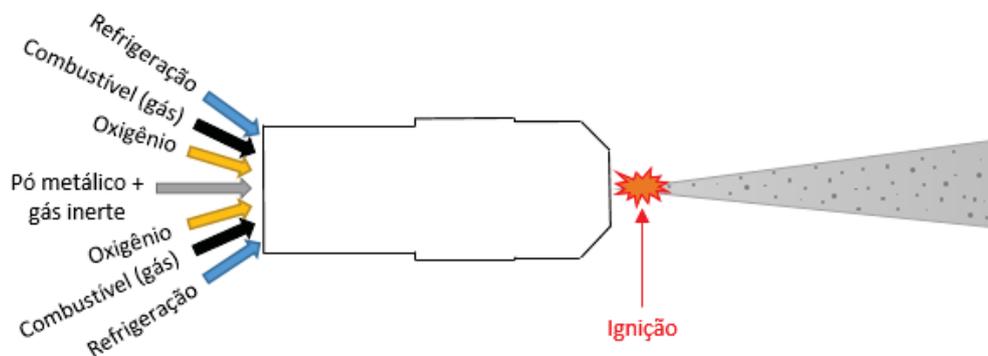
Por conseguinte, os revestimentos depositados podem se diluir parcialmente com o substrato. Sendo assim, os revestimentos têm o objetivo geral de reduzir as taxas de desgaste e aumentar a resistência a corrosão ou cavitação de materiais,

peças e componentes estruturais. Buscando elevar o desempenho dos sistemas mecânicos, que comumente apresentam elevadas pressões e temperaturas de trabalho, aumentando também a vida útil de componentes.

2.1.2 PISTOLA DE HVOF GASOSO

No processo de aspersão térmica HVOF com combustível gasoso, a mistura de oxigênio e combustível ocorre previamente à entrada na câmara de combustão, que origina uma queima com temperatura de chama na faixa de 2700 a 3100°C, mais uniforme e estável (CORTÉS P. R, 1998). O material de deposição, em forma de pó, é inserido com a presença de um gás de arraste, sendo utilizados geralmente, argônio ou nitrogênio (SUDAPRASERT; SHIPWAY; MCCARTNEY, 2003). Uma imagem esquemática da pistola utilizada para a deposição HVOF com combustível gasoso está representada na FIGURA 3.

FIGURA 3 – PISTOLA DE DEPOSIÇÃO HVOF DJ2700 COM COMBUSTÍVEL GASOSO



FONTE: A autora (2024).

Conforme a FIGURA 3, o material de deposição em pó é introduzido de maneira axial à pistola na câmara de combustão, garantindo altas temperaturas, e gerando uma aceleração das partículas do material a ser depositado. O material em forma de pó é, então, aquecido e acelerado pelos produtos da combustão a altas velocidades, e no geral, atingem temperaturas mais elevadas que seu ponto de fusão (MARTIN, 2005). No entanto, o pó não funde, devido ao curto tempo que as partículas ficam expostas na fonte de calor, permitindo um aumento na energia cinética das partículas que será transferido ao substrato (CORTÉS P. R, 1998).

A aceleração das partículas ocorre a partir da estricção do fluido que passa por um tubo convergente/divergente para as três pistolas estudadas de etanol, querosene e propano. O pó é adicionado posteriormente à câmara de combustão e estricção do fluido.

2.1.3 PISTOLA DE HVOF LÍQUIDO

O processo de deposição HVOF com combustível líquido é um dos processos mais utilizados na indústria, pois promove a deposição de revestimentos com menor porosidade e oxidação. Este produto da deposição é então mais interessante se comparado a revestimentos depositados por HVOF com combustível gasoso, devido às propriedades mecânicas apresentadas.

As tochas possuem características fundamentais diferentes como: fluxo de gases, velocidade de saída dos gases e eficiência térmica. O design da pistola é baseado em fluido comprimido, que passa através de um bocal convergente ou convergente/ divergente. Bocais convergentes que saem em dutos estreitos tem uma limitação de velocidade Mach 1. Para atingir maiores velocidades o bocal precisa ser projetado como convergente/ divergente (RUSCH, 2007).

A tocha para a deposição HVOF com combustível líquido é representada pela FIGURA 4 e FIGURA 5.

Para estes sistemas, o material de deposição em forma de pó é introduzido de maneira radial na pistola e, ao contrário do processo com combustível gasoso, a injeção do material ocorre posteriormente à combustão. Essa combustão passa por um bocal que aumenta a velocidade, o pó é injetado a alta velocidade por um gás de arraste. Essa alta temperatura, por sua vez, aquece as partículas de pó antes de chegar ao substrato em estado plástico e gerar o revestimento de alta densidade. (RUSCH, 2007).

Além dos processos de deposição HVOF com combustível líquido possuírem as características descritas anteriormente, alterando-se o fluido é possível obter algumas diferenças que ajudam a entender como cada processo pode influenciar no revestimento final. No geral, o processo de deposição HVOF com querosene é o processo com combustível líquido mais difundido industrialmente, uma vez que é uma matéria prima utilizada para gerar energia com grande disponibilidade, na maioria dos

casos, especialmente fora do Brasil. Por ser uma tecnologia mais antiga, há diversos estudos correlacionando parâmetros e características deste processo.

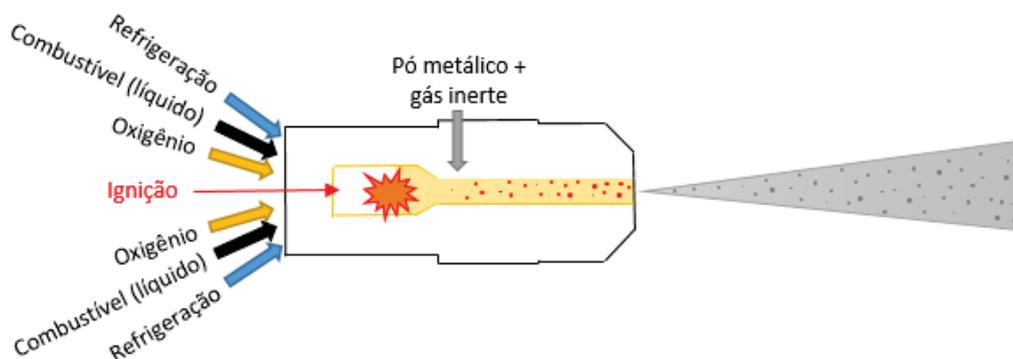
Por outro lado, o processo de deposição HVOF com etanol é uma tecnologia muito nova, tendo poucos estudos na área. Sendo o etanol um combustível mais acessível e que produz 30% menos emissões tóxicas se comparado ao querosene. Apresenta também uma combustão muito eficiente, produzindo menos fumos e matéria particulada que outros combustíveis como o diesel, querosene ou gasolina (FST, 2016).

Em diversos países, o querosene não tem um custo tão elevado quanto a gasolina e o etanol, além de possuir maior disponibilidade de uso. A pistola de deposição JP5000, produzida pela TAFA e distribuída pela Flame Spray Technologies está representada na FIGURA 4.

De acordo com Kamnis e Gu (2006) que investigaram extensivamente a temperatura na saída da pistola, a temperatura média registrada para a combustão de querosene foi de 1826°C. De modo que a temperatura máxima das partículas se aproxima de 1726°C, e para partículas maiores, de 8µm, a temperatura registrada é de 1500°C.

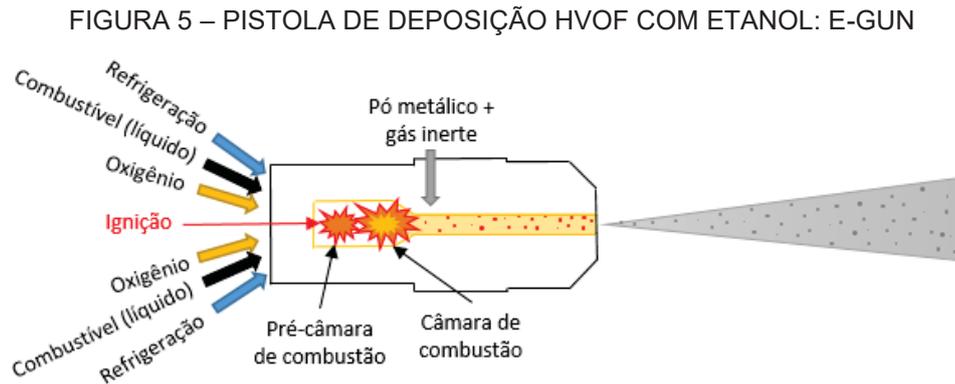
O poder calorífico dos combustíveis de querosene e propano é semelhante, sendo 11,94 kWh/kg para o querosene (AVIATION FUELS: TECHNICAL REVIEW, 2007), e 12,88 kWh/kg para o propano (MORAN; SHAPIRO, 2002). Já o etanol possui poder calorífico de 7,92 kWh/kg (MORAN; SHAPIRO, 2002), gerando menos energia, se considerando o mesmo aporte térmico fornecido para os três combustíveis (LIU, 2022).

FIGURA 4 – PISTOLA DE DEPOSIÇÃO HVOF QUEROSENE LÍQUIDO: JP5000



FONTE: A autora (2024).

O processo de deposição HVOF com etanol como combustível é um método ainda pouco utilizado na indústria, por ter sido desenvolvido recentemente. Quanto à característica construtiva da pistola, é possível visualizar na FIGURA 4 que a pistola de deposição utilizada para o etanol eGun® (FST, 2005) é similar à pistola de deposição com querosene, representada na FIGURA 5.

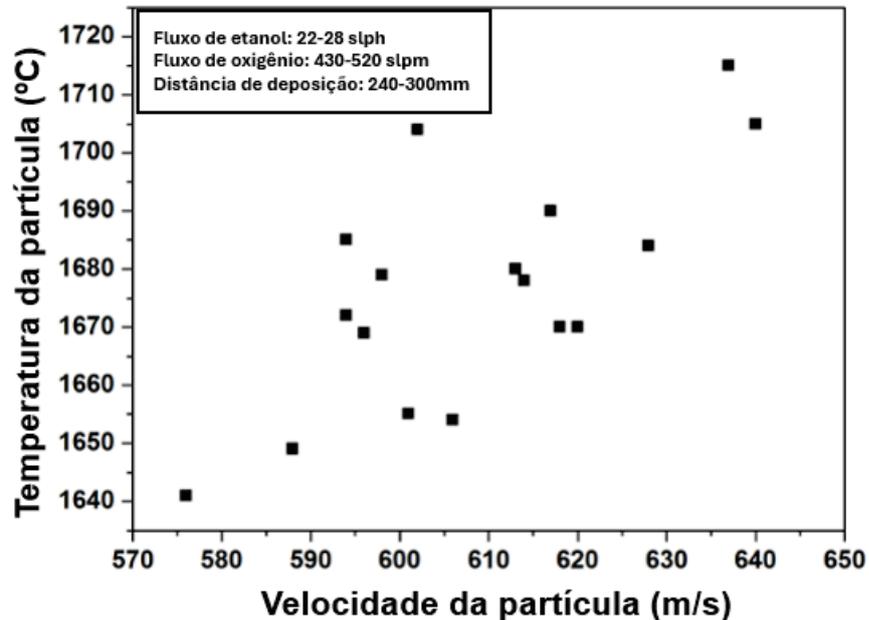


FONTE: A autora (2024).

A principal diferença é que a pistola de deposição com combustível etanol possui uma pré-câmara de combustão. No geral, em sistemas de combustão, essa câmara garante a mistura adequada de etanol e oxigênio, proporcionando um turbilhonamento da mistura. Além disso, a câmara de pré-combustão é necessária em casos com maior pressão interna da câmara, promovendo uma maior eficiência da ignição e uma combustão mais rápida.

É possível visualizar na FIGURA 6 que a temperatura e a velocidade atingidas pela pistola de etanol se assemelham aos valores obtidos na pistola de propano. Os valores apresentados na figura resultam de estequiometrias que variam de 0,96 a 1,22.

FIGURA 6 – TEMPERATURA E VELOCIDADE RESULTANTES DA COMBUSTÃO DE ETANOL E OXIGÊNIO.



FONTE: Adaptado de LIU (2022).

Em relação a velocidade e temperatura do HVOF propano, SILVA et al. (2023) obtiveram valores elevados em relação a temperatura das partículas, cerca de 2000°C, especialmente devido ao alto poder calorífico do propano 12.88 kWh/kg (MORAN; SHAPIRO, 2002). Enquanto a velocidade apresentou valores reduzidos se comparados a pistola de querosene e etanol, cerca de 400 m/s.

2.1.4 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO

As variáveis de processo consideradas neste trabalho para as pistolas de HVOF são:

- Distância de deposição;
- Relação de combustão (oxigênio/ combustível);
- Fluxo mássico dos gases na combustão;
- Preparação da superfície;
- Taxa de alimentação do pó.

Estas variáveis influenciam diretamente a velocidade e temperatura das partículas em voo. Podendo afetar a aderência, porosidade, porcentagem de óxidos ou gerando tensões residuais destes revestimentos.

2.1.5 REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

A microestrutura apresentada pela formação do revestimento a partir do processo de aspersão térmica é constituída pela formação de lamelas do revestimento (microconstituintes). Este revestimento é formado por partículas aspergidas deformadas, como panquecas ou salpicos, óxidos e porosidade (AMERICAN WELDING SOCIETY INC., 1985).

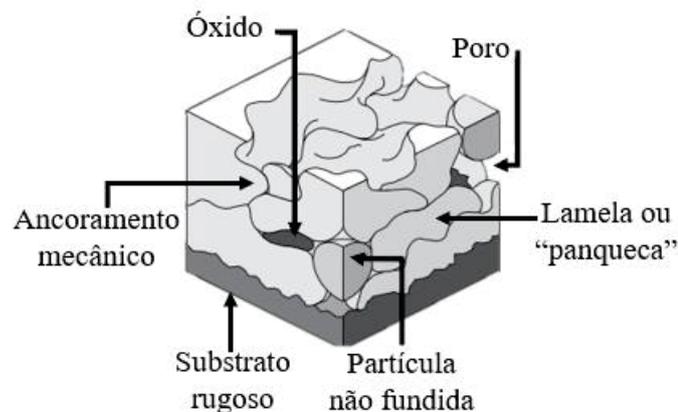
2.1.5.1 Microestrutura

Na FIGURA 7 é apresentada a morfologia de revestimentos aspergidos, composta por partículas fundidas e não fundidas, além da presença de óxidos e poros. Estas partículas sobrepostas em forma de lamelas formam camadas. Também sendo chamados de “panquecas”.

A física do processo pode acarretar diferentes características do revestimento. Através da energia cinética e temperatura de partículas, rugosidade, limpeza e temperatura do substrato.

Sendo assim, a porosidade do revestimento, neste trabalho, é definida pelos vazios entre as partículas aspergidas, diferentemente do conceito de porosidade em processos de fundição e soldagem, no qual a porosidade é relativa à presença de gases no interior da estrutura (SUCHARSKI, 2016).

FIGURA 7 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MORFOLOGIA DE UM REVESTIMENTO.



FONTE: Adaptado de (SUCHARSKI, 2016).

2.2 CAVITAÇÃO

Nesta seção serão abordados o fenômeno da erosão por cavitação, cavitação em turbina Francis e locais de ocorrência, além de propriedades metalúrgicas de resistência à cavitação.

2.2.1 EROSÃO POR CAVITAÇÃO

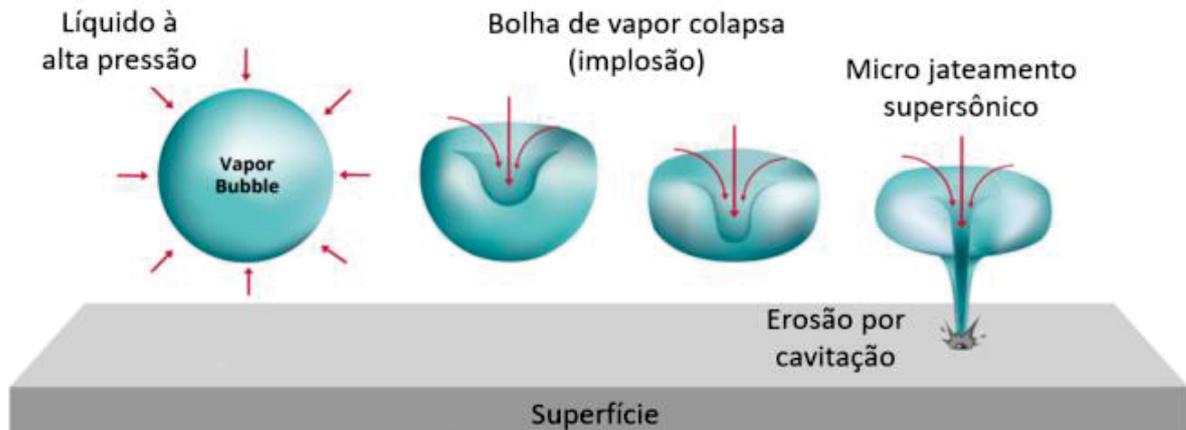
A cavitação é um fenômeno físico que ocorre quando um líquido é exposto a uma variação de pressão elevada, causando o colapso de bolhas de vapor. Como explicado por (AYLI, 2019) e (CAI, 2019), seguindo o princípio de Bernoulli, quando a velocidade do fluido aumenta, a pressão reduz, diminuindo por consequência seu ponto de ebulição para a temperatura ambiente, fazendo com que ocorra uma ebulição a frio.

A ocorrência excessiva deste fenômeno pode causar danos estruturais e desgaste prematuro em máquinas e equipamentos. Normalmente ocorrendo em materiais e equipamentos que estão em um meio líquido, subaquático, que favorece a falha destes componentes (BECKER, 2021).

Este efeito apresenta consequências indesejadas destacadas por Escaler et al. (2006); Espitia e Toro (2010) e Silveira (2018), como: instabilidade de fluxo, vibrações excessivas e diminuição do desempenho das máquinas, podendo reduzir de 10 a 20% a eficiência da turbina (AYLI, 2019).

Na FIGURA 8 é possível visualizar um microjato, causado pela implosão de uma bolha de vapor, erodindo a superfície.

FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FENÔMENO DE CAVITAÇÃO



FONTE: Adaptado de ("WHAT IS VALVE CAVITATION?", 2022).

A conversão da energia potencial, relativa às turbinas hidráulicas, está diretamente relacionada ao fenômeno e a dimensão das bolhas antes do colapso, aliado a elevada energia cinética ao redor destas bolhas (PUKASIEWICZ, 2008).

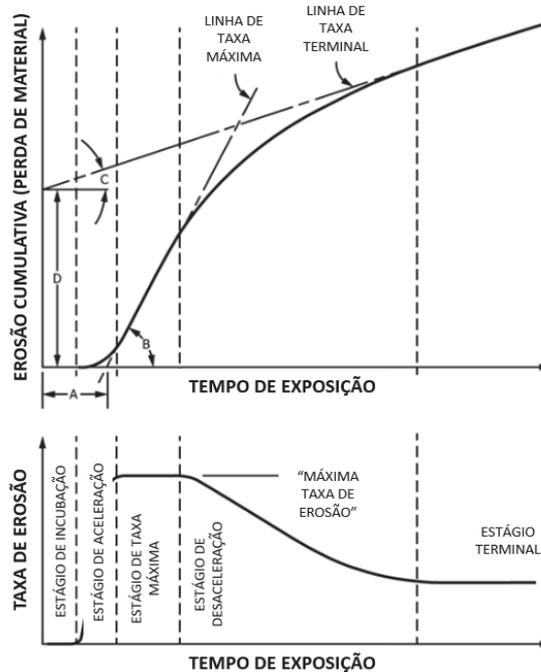
Sendo assim, dois mecanismos foram propostos: a pressão gerada pela onda de choque ao redor do rompimento e o dano do material como resultado do impacto, gerado por um microjato (PUKASIEWICZ, 2008).

Quando o colapso de bolhas ocorre próximo a uma superfície sólida, ocorre geração de tensões superficiais altamente localizadas e transitórias. A repetição deste fenômeno devido ao colapso repetitivo causa falha local da superfície agravada pela fadiga no caso de tensões menores que o limite elástico do material, ocasionando desgaste (BRENNEN, 2005; SILVEIRA, 2018).

Estas cargas repetitivas de alta frequência e intensidade geram um processo erosivo em forma de pittings ou dimples. Em estudos realizados por Sreedhar; Albert; Pandit (2015) em aço 316L em solução sólida, submetido a ensaio de cavitação, observou-se o acúmulo de bandas de escorregamento que originam micro trincas. Sendo assim, a deformação plástica pelo fenômeno erosivo amplia as cavidades até coalescerem e, assim levarem a fratura, apresentando dimples.

Em materiais sólidos, o fenômeno pode ser identificado em 4 etapas: incubação, fase de aceleração, fase de atenuação e fase estacionária. Esse padrão é adotado pela norma ASTM G32-16E1 (2021), como apresentado no GRÁFICO 1 abaixo.

GRÁFICO 1 - GRÁFICO REPRESENTATIVO DA TAXA DE EROÇÃO POR CAVITAÇÃO



FONTE: (ASTM G32-16e1, 2021).

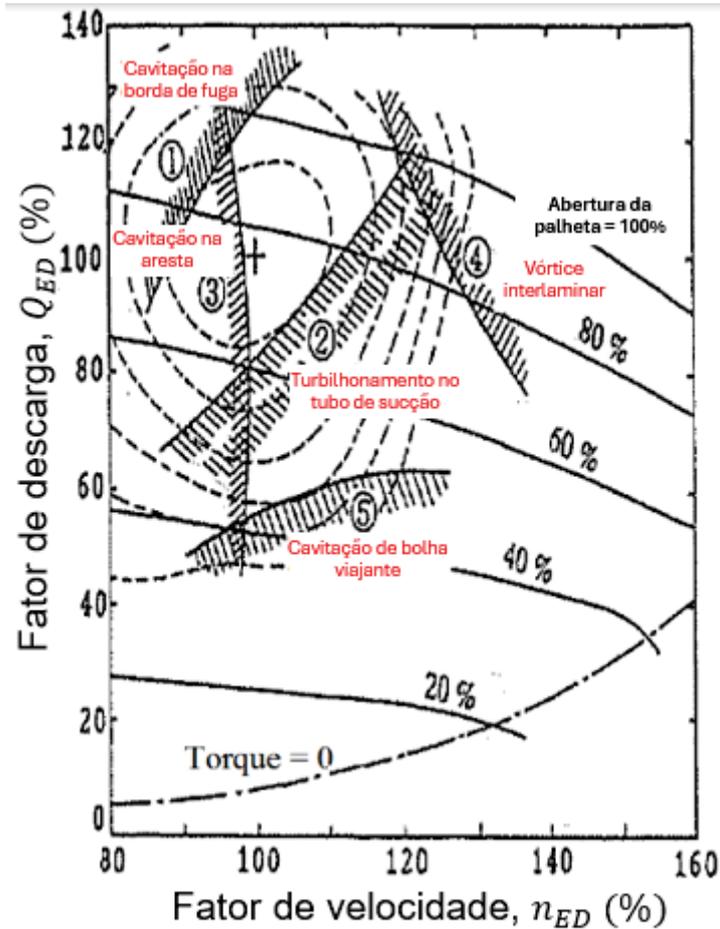
Em A é apresentado o período de incubação, ou seja, o estágio inicial do fenômeno, em B a tangente representa a taxa máxima de erosão, em C a tangente representa a taxa de erosão terminal e em D a linha de taxa terminal que intercepta o eixo y.

No estágio de aceleração há um aumento da taxa de erosão, atingindo o valor de máxima taxa de erosão. Posteriormente, a taxa de erosão é reduzida ou estabilizada, até o estágio terminal.

2.2.2 CAVITAÇÃO EM TURBINA FRANCIS

A cavitação em turbinas pode ocorrer em diferentes locais, como bordo de ataque, bordo de fuga, folga da ponta, redemoinho no tubo de sucção, cubo ou coroa e superfícies internas das pás (BRIJKISHORE; KHARE; PRASAD, 2021; DEMIREL et al., 2015). Dependendo diretamente das condições de operação, como demonstrado na FIGURA 9.

FIGURA 9 – LOCAIS DE CAVITAÇÃO PARA DIFERENTES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO EM TURBINA FRANCIS



FONTE: Adaptado de (DEMIREL *et al.*, 2015).

A cavitação no bordo de ataque ocorre devido a separação do fluxo na ponta da pá devido à variação incorreta no ângulo do fluxo que entra na turbina, condição de operação 1 (DEMIREL *et al.*, 2015).

Já a cavitação na borda de fuga ocorre durante operações de sobrecarga e é agravada quando a cavitação se move em direção à montante da pá do rotor, condição de operação 2 (DEMIREL *et al.*, 2015; ESCALER *et al.*, 2006).

Na condição de operação 5, a cavitação de bolha viajante é observada durante condições de carga parcial. Já a cavitação na folga da ponta ocorre em velocidades altas e baixa pressão (BRIJKISHORE; KHARE; PRASAD, 2021; MOTYCAK; SKOTAK; KUPCIK, 2012).

Em relação a cavitação nas superfícies das pás, na condição de operação 4, vórtices secundários são formados entre as pás. Se esses vórtices tocarem as bordas das pás, então esse tipo de cavitação pode ser prejudicial. Na faixa de operação de

alta carga, os vórtices se tornam instáveis (BRIJKISHORE; KHARE; PRASAD, 2021; DEMIREL et al., 2015).

O design rigoroso das pás e o uso de materiais resistentes à erosão por cavitação irão superar o problema da cavitação (BRIJKISHORE; KHARE; PRASAD, 2021; TÔN-THÂT, 2010).

2.2.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALÚRGICAS PARA RESISTÊNCIA À CAVITAÇÃO

Algumas das principais características de materiais metálicos relacionados a resistência à erosão por cavitação e tempo de incubação, são: alta dureza, resistência à tração, energia de deformação, resiliência, ductilidade, entre outras (RICHMAN; MCNAUGHTON, 1990). Especialmente, energia de falha de empilhamento (EFE), influência da microestrutura e oxidação das lamelas e tenacidade a fratura dos materiais (PUKASIEWICZ, 2008; SREEDHAR; ALBERT; PANDIT, 2015).

As imperfeições inerentes aos materiais também influenciam a resistência à erosão por cavitação, reduzindo o período de incubação relativo à erosão. Sendo que as propriedades mecânicas do material continuam desempenhando um papel dominante em relação a resistência à cavitação a longo prazo (WANG et al., 2021).

2.2.4 LIGA 316L

A liga 316L é um aço inoxidável austenítico, que pertence às ligas ferrosas de baixo carbono com no mínimo 12% de cromo. O cromo é um elemento indispensável para conferir resistência à corrosão ao aço inoxidável, formando uma camada passivante protetora sobre a superfície do material. Os aços inoxidáveis são classificados em quatro grupos, com base na microestrutura básica formada, sendo eles: martensíticos, ferríticos, austeníticos e duplex (CALLISTER; RETHWISCH, 2020).

No caso do aço inox 316L, a composição inclui cromo e níquel como elementos de liga essenciais. A adição de níquel causa uma mudança na estrutura metálica do material, estabilizando a fase austenítica, o que resulta em ligas com elevada resistência à corrosão, boa tenacidade e excelente soldabilidade (CALLISTER; RETHWISCH, 2020). O "L" em 316L indica que o aço possui baixo teor

de carbono, geralmente inferior a 0,03%, o que reduz a suscetibilidade à corrosão intergranular, problema comum em aços inoxidáveis com alto teor de carbono.

Apesar de suas excelentes propriedades, a soldagem do aço inox 316L requer cuidados especiais. Como o aço inoxidável austenítico é sensível a transformações de microestrutura durante a soldagem, é fundamental um controle rigoroso da temperatura de pré-aquecimento e da taxa de resfriamento. O pré-aquecimento do material antes da soldagem é essencial para evitar a formação de martensita, uma fase de alta dureza e fragilidade, que pode comprometer a resistência e a ductilidade do componente soldado. Além disso, o resfriamento rápido pós-soldagem pode induzir a formação de martensita na zona afetada pelo calor, causando fragilização no local.

Outro fator crítico na soldagem do aço inox 316L é a precipitação de carbonetos de cromo, que pode ocorrer em temperaturas de 425°C a 800°C, a chamada faixa de sensibilização (LANCASTER, 1999). A formação desses carbonetos resulta na diminuição da resistência à corrosão do material, pois o cromo presente no aço se combina com o carbono, formando partículas que consomem o cromo disponível para a formação da camada passivante (KOU, 2003).

Portanto, o correto controle do processo de soldagem, com a devida atenção à temperatura de pré-aquecimento e ao controle da taxa de resfriamento, é essencial para garantir as propriedades do aço inox 316L e sua longevidade em aplicações onde a resistência à corrosão é crítica.

2.2.5 RESISTÊNCIA À CAVITAÇÃO DE REVESTIMENTOS ASPERGIDOS

Uma revisão da literatura realizada por Brijkishore; Khare; Prasad, (2021) apresentou uma comparação de revestimentos obtidos por aspersão térmica utilizando o processo HVOF. Esse demonstrou melhor resistência a erosão a alta e baixa energia de impacto de partículas. Apresentando resultados melhores que nitreto de plasma 13Cr-4Ni e aço 12Cr.

A técnica de aspersão térmica foi utilizada em diversos estudos, como por exemplo, os desenvolvidos por Grewal; Agrawal; Singh (2013), (AMARENDRA et al., 2017), (BABU et al., 2019), de 2013 a 2019 (BRIJKISHORE; KHARE; PRASAD, 2021).

A erosão por cavitação em metais amorfos aspergidos por HVOF, segundo estudos conduzidos por (QIAO et al., 2023), iniciou-se nos defeitos dos revestimentos, como: poros, microfissuras ou interfaces de fase, propagando-se ao longo desses

defeitos. Resultados estes que corroboram a necessidade de microestruturas que possuem reduzidas porosidade e oxidação para se obter elevada resistência à cavitação.

Em relação as técnicas de aspersão térmica, (TAILLON et al., 2016) menciona que os revestimentos obtidos através do HVOF exibem baixa porosidade, alta dureza e alta propriedade de adesão (DING; CHEN; WANG, 2011; YUPING et al., 2007).

2.3 INFLUÊNCIA DA ESTEQUIOMETRIA NO PROCESSO HVOF SOBRE A POROSIDADE E MICRODUREZA DO REVESTIMENTO

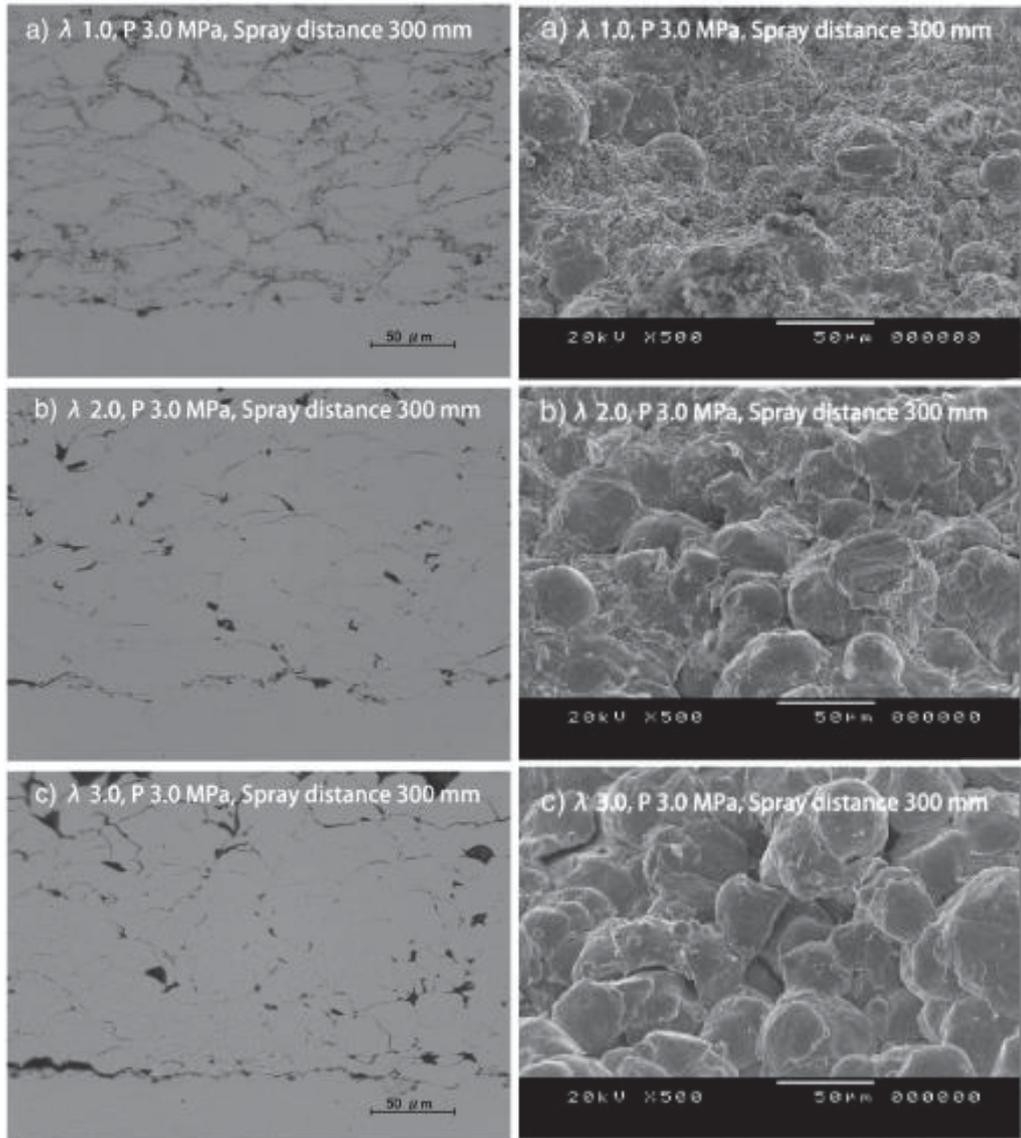
Na imagem abaixo (FIGURA 10) é possível visualizar a microestrutura de revestimento de 316L depositado por HVOF querosene, utilizando a pistola JP-5000 (SUN; FUKANUMA; OHNO, 2014). Nestas imagens é possível notar que foram utilizadas diferentes razões de oxigênio/ combustível, definidas como λ .

Para $\lambda= 1$, o revestimento apresenta microestrutura densa, mas com inclusões de óxidos entre as interfaces das partículas. Para $\lambda= 2$ e 3, as inclusões de óxidos foram reduzidas enquanto os poros nas interfaces das partículas apareceram no revestimento (SUN; FUKANUMA; OHNO, 2014).

As metalografias analisadas em MEV também indicam que quando $\lambda= 1$ a microestrutura apresenta partículas semiesféricas e fragmentadas, sugerindo que a maioria das partículas entram em estado de fusão antes de atingirem o substrato. Com o aumento da razão oxigênio/ combustível uma intensa deformação plástica ocorre, e a quantidade de partículas fragmentadas é reduzida significativamente, sendo assim pode-se aferir que muitas partículas não entram em estado de fusão durante o processo de aspersão. Para $\lambda=3$, os salpicos não são observados

Essas variações na microestrutura do revestimento podem ser atribuídas à deformação das partículas, como resultado da temperatura e velocidade em voo. Estando assim, diretamente relacionada a razão oxigênio/ combustível.

FIGURA 10 -MICROESTRUTURA DE REVESTIMENTO 316L COM DIFERENTES λ , TODAS AS AMOSTRAS UTILIZARAM 300MM COMO DISTÂNCIA DE DEPOSIÇÃO PARA HVOF QUEROSENE.



FONTE: Adaptado de (SUN; FUKANUMA; OHNO, 2014).

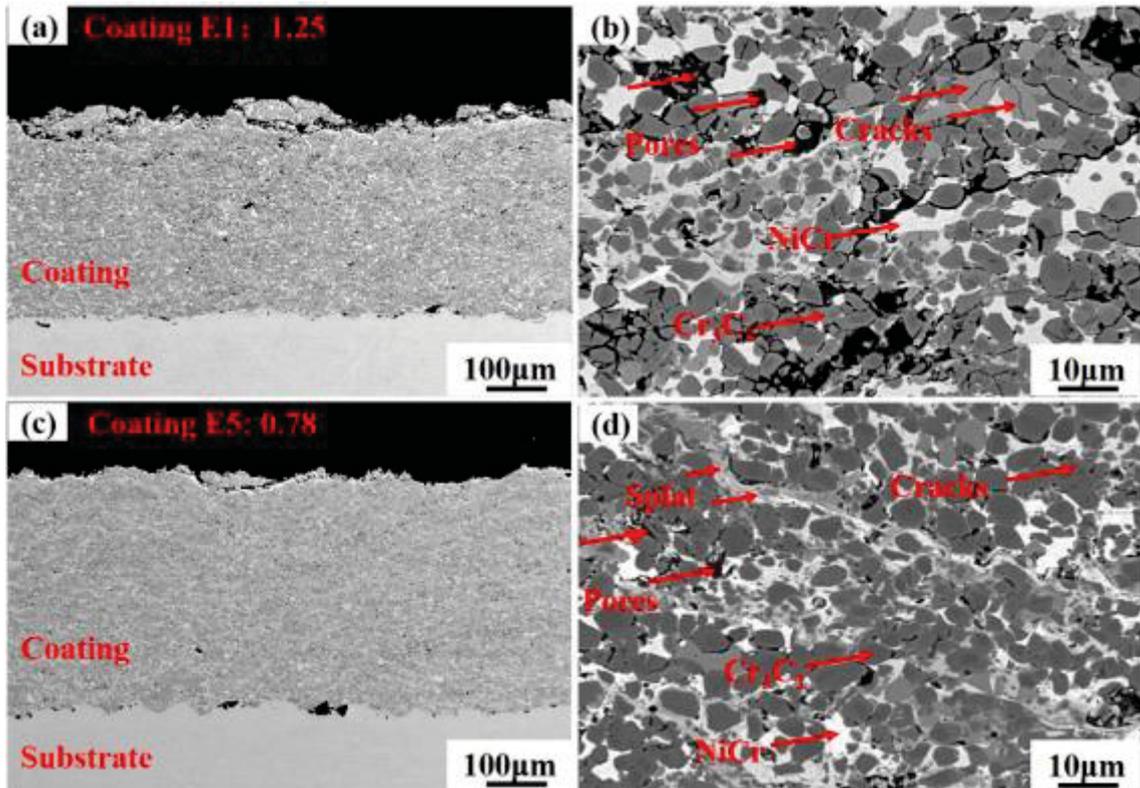
Comparativamente, para uma pistola de HVOF etanol, sendo aplicada com revestimento de $Cr_3C_2 - NiCr$, foi possível analisar que as diferentes razões oxigênio/combustível tiveram pouco efeito na composição da fase do revestimento através de análises feitas por DRX. Apesar de não ter uma influência direta na composição das fases, a razão oxigênio/combustível possui um impacto significativo na microestrutura (LIU et al., 2023).

Através do estudo desenvolvido por LIU et al. (2023) utilizando material Cr_3C_2-NiCr e apresentado na FIGURA 11, os resultados apresentados demonstram que o revestimento com $\lambda = 0,78$ é denso e menos poroso que o revestimento com λ

= 1,25. No qual o revestimento aplicado com $\lambda > 1$ apresenta excesso de oxigênio agindo como gás de resfriamento, resultando em uma diminuição da temperatura das partículas, influenciando o estado de fusão desse material. Para $\lambda < 1$, a combustão ocorre de forma incompleta, mas a temperatura das partículas pode ser maior, contribuindo para uma melhor fusão do material e resultando em uma microestrutura mais coesa. Apesar de o estudo ter sido realizado utilizando um material de revestimento diferente, os resultados da análise são relevantes para o presente trabalho, pois fornecem subsídios importantes para compreender a influência da λ na qualidade do revestimento aplicado (LIU et al., 2023).

Em fluxo de etanol mais elevado, a coesão entre as camadas é aprimorada, devido à maior temperatura e velocidade das partículas, aumentando a microdureza. Enquanto uma estequiometria maior que 1, com uma razão de oxigênio mais elevada, gera mais porosidade e conseqüentemente faz com que a microdureza seja reduzida (LIU et al., 2023).

FIGURA 11 – MICROESTRUTURA DE REVESTIMENTO $Cr_3C_2 - NiCr$ COM DIFERENTES λ APLICADOS POR HVOF ETANOL



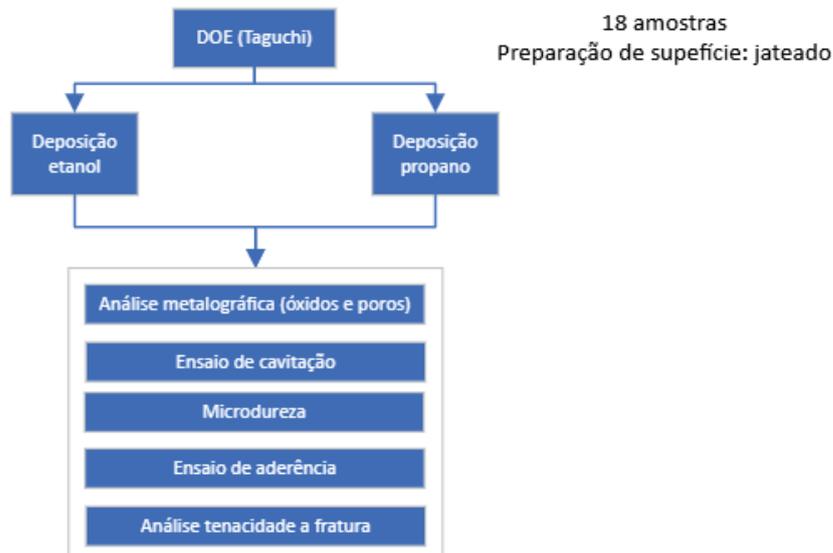
FONTE: LIU et al. (2023)

LEGENDA: A figura (a) apresenta o revestimento E1 que foi depositado utilizando λ de 1,25 no qual pode-se visualizar o revestimento e substrato, já na figura (b) o revestimento E5 foi depositado utilizando λ de 0,78. (c) e (d) apresentam o mesmo revestimento em uma escala 10x maior, onde são indicados alguns elementos formados, assim como poros e trincas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na FIGURA 12 está representada a metodologia experimental do trabalho, que consiste em aplicação de um planejamento de experimento utilizando a metodologia de Taguchi e ensaios de cavitação, análise da microestrutura do revestimento depositado, entre outros que serão abordados nesta seção.

FIGURA 12 – FLUXOGRAMA METODOLOGIA



FONTE: A autora (2024).

3.1 JANELA DE DEPOSIÇÃO

Para considerar os parâmetros das pistolas de HVOF e sua influência na microestrutura e resistência à cavitação dos revestimentos, foi necessário calcular a estequiometria das reações dos diferentes combustíveis aplicados no processo de aspersão térmica HVOF.

Esta estequiometria constitui uma análise acerca da combustão que ocorre na pistola, podendo apresentar valores variando de 0 a 2. Sendo 1, a razão ótima de oxigênio para a quantidade de combustível utilizada.

Permitindo uma análise mais assertiva quanto aos parâmetros utilizados e uma maior relação de oxigênio ou combustível e como isto afeta diretamente a

velocidade e temperatura das partículas em voo e, conseqüentemente, a microestrutura dos revestimentos.

A estequiometria, então, foi calculada com base no fluxo de oxigênio e propano para HVOF alimentado por propano, e no fluxo de oxigênio e etanol para HVOF alimentado por etanol.

A equação de estequiometria para o propano (C_3H_8) é:



Portanto, a relação estequiométrica entre oxigênio e propano é cinco. O volume molar correspondente ao volume ocupado pelo gás, nas condições NTP (temperatura e pressão normais), é igual a 22,4 L. Utilizando esse valor e multiplicando pelo número de moléculas da reação estequiométrica, obtemos o valor em litros. Como ambos são gases, a relação entre o fluxo de oxigênio e o fluxo de propano permanece cinco, para uma relação estequiométrica igual a um.

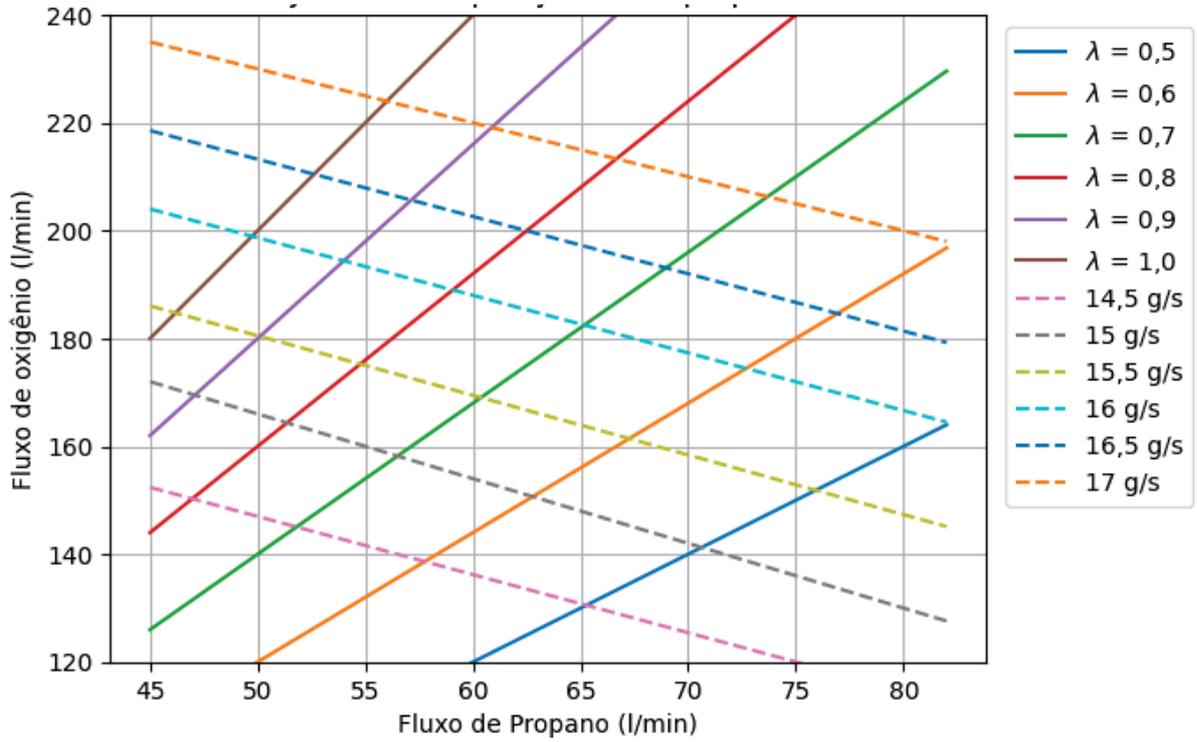
Para o etanol, a densidade do combustível utilizado foi de 789 kg/m³, e a massa molecular utilizada foi de 46g/mol. Portanto, obteve-se uma relação entre o fluxo de oxigênio e o fluxo de etanol de 1152.6, para uma relação estequiométrica igual a um. Para estequiometrias diferentes de um, foi aplicado um percentual às moléculas de oxigênio na reação química.

A equação de estequiometria para o etanol (C_2H_6O) é:



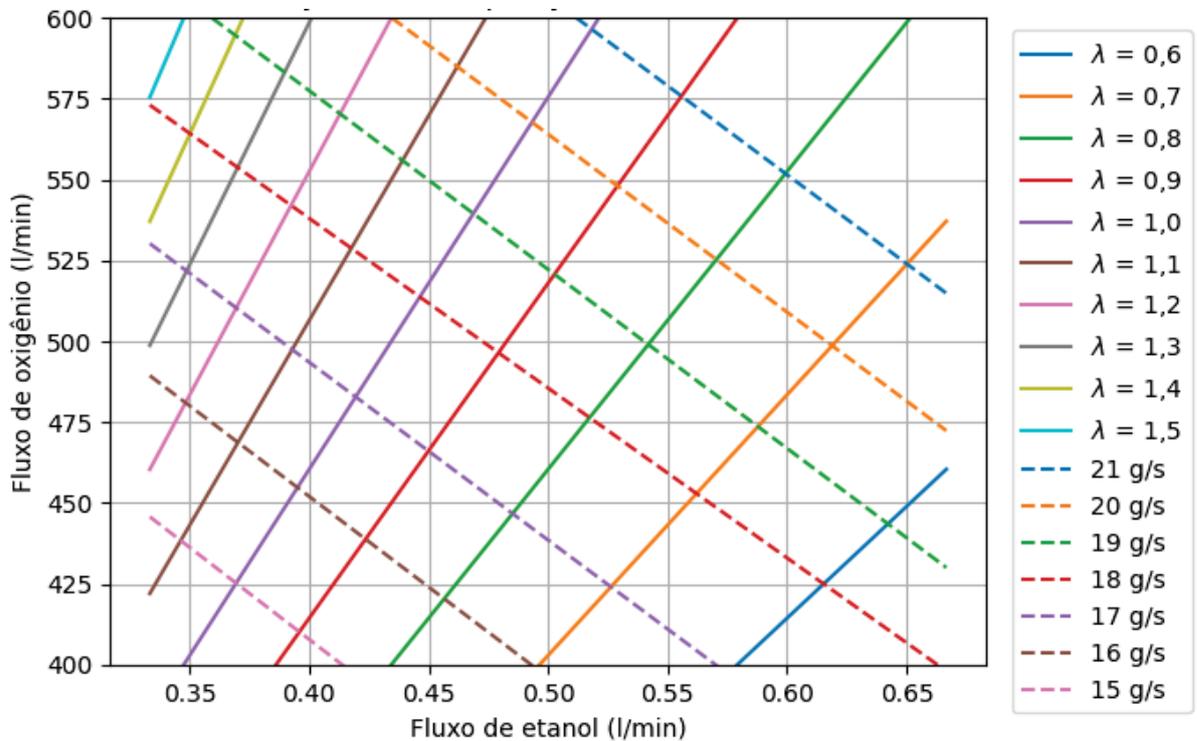
A estequiometria e o fluxo de massa foram calculados e utilizados para formar o GRÁFICO 2 e GRÁFICO 3, para relacionar a deposição com uma janela de deposição. A taxa de fluxo de massa foi determinada multiplicando as densidades de oxigênio e combustível pelas respectivas taxas de fluxo e somando-as.

GRÁFICO 2 – JANELA DE DEPOSIÇÃO HVOF PROPANO



FONTE: A autora (2024).

GRÁFICO 3 – JANELA DE DEPOSIÇÃO HVOF ETANOL



FONTE: A autora (2024).

3.2 SELEÇÃO DA MATÉRIA PRIMA

A matéria prima selecionada para os revestimentos deste estudo foi a liga comercial Diamalloy 1003, similar ao 316L, atomizada a gás (OERLIKON METCO, 2022). A composição química da liga é descrita na TABELA 1.

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA NOMINAL DA LIGA EM PESO (%)

Liga	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	C
Diamalloy 1003	Res	17	12	2,5	2,3	0,03

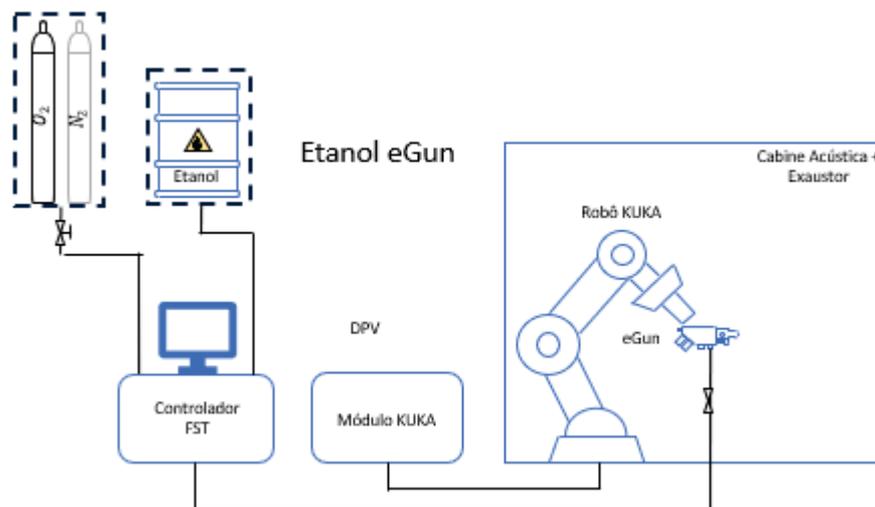
FONTE: A autora (2024).

A granulometria descrita pelo fabricante é de $-45 +11\mu\text{m}$. Previamente às deposições, o pó foi submetido a processo de secagem em estufa a 150°C pelo período de 24 horas e, adicionalmente, nas pistolas de etanol e querosene da FST o alimentador de pó mantém o pó aquecido a aproximadamente 50°C , garantindo assim uma secagem uniforme do volume de partículas.

3.3 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS EQUIPAMENTOS

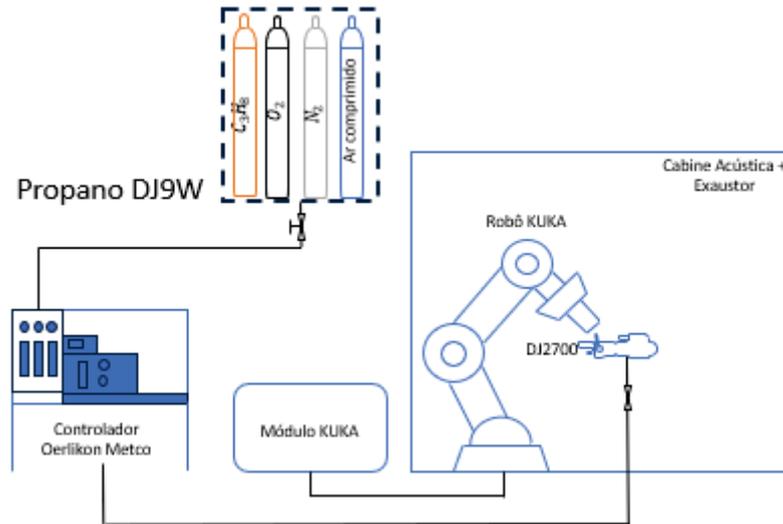
A seguir uma representação esquemática, FIGURA 13 e FIGURA 14, da configuração, equipamentos e insumos utilizados na deposição.

FIGURA 13 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA DEPOSIÇÃO.



FONTE: A autora (2024).

FIGURA 14 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA DEPOSIÇÃO.



FONTE: A autora (2024).

3.4 PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO

Nesta seção serão apresentados os processos de preparação de superfície e parâmetros dos processos de HVOF com diferentes combustíveis.

3.4.1 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE

Os substratos de aço carbono ABNT 1020, com dimensão de 150 x 30 x 3mm (Comprimento x Largura x Espessura), utilizados como amostras foram previamente preparados através de jateamento abrasivo. O jateamento foi realizado utilizando jateadora Blastibrás BUE7570, de acordo com a Norma Petrobras 2568 e os valores utilizados para a preparação da superfície estão definidos no QUADRO 1 abaixo.

QUADRO 1 – PARÂMETROS JATEAMENTO ABRASIVO

Parâmetro	Valores
Abrasivo	Óxido de Alumínio Branco
Método	Jateamento abrasivo por pressão
Pressão do ar (Bar)	6 a 7
Granulometria (mesh)	36
Distância de Jateamento (mm)	90
Rugosidade (Ra)	6
Ângulo de jateamento	90°

FONTE: A autora (2023).

A medição da rugosidade foi realizada através de um rugosímetro portátil marca Mitutoyo, modelo SJ210 4mN, com resolução de 360/ 0,02 μm .

3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL – DOE

Para um experimento exploratório justifica-se o uso de ferramentas estatísticas que auxiliem na tomada de decisão. Uma dessas ferramentas é o método de Taguchi.

O planejamento experimental de Taguchi é um método de desenho de experimentos que permite avaliar como diferentes parâmetros afetam a média e a variância de uma característica de desempenho do processo. O delineamento de experimentos proposto por Taguchi envolve o uso de matrizes ortogonais, para organizar os parâmetros que afetam o processo, e os níveis, que devem ser variados, permitindo a coleta de dados necessários para determinar quais fatores mais afetam a qualidade do produto, com uma quantidade mínima de experimentos, poupando assim, tempo e recursos (LIRA, 2012; TAGUCHI, 1990; ROY, 2001).

A análise da variância sobre os dados coletados, a partir do desenho de experimentos, pode ser usada para selecionar novos valores de parâmetros, ou seja, para otimizar a característica de desempenho (LIRA, 2012).

De uma forma geral, a análise dos resultados pode ser feita de duas maneiras diferentes. Uma delas é mediante uma série de gráficos e a outra, mediante a análise da variância.

As respostas dadas pelo planejamento de Taguchi permitem verificar, em forma de gráficos, a influência que todos os fatores estudados exercem sobre as médias, a intensidade dessa influência e qual nível influencia positivamente sua resposta. Já a análise da variância, resultante da comparação das médias das respostas do arranjo ortogonal, calculado sobre a soma das respostas para cada nível em cada fator, revela se existe significância nos fatores, permitindo assim haver uma validação estatística da interpretação dos gráficos de influência (LIRA, 2012; TAGUCHI, 1990).

Ou seja, é possível analisar cada fator independentemente para a mesma resposta, bem como qual o nível deste fator que produz o melhor resultado nesta resposta.

Entre os arranjos previstos pelo planejamento de Taguchi, o que se adapta ao interesse deste estudo é o arranjo ortogonal L9, que permite trabalhar com 4 fatores e 3 níveis cada. O

QUADRO 2 apresenta o modelo genérico para o arranjo L9.

QUADRO 2 – ARRANJO ORTOGONAL L9 DE TAGUCHI

Experimento	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

FONTE: A autora (2024).

Foram analisadas as características morfológicas dos revestimentos aspergidos, sendo esperado menor porosidade, menor teor de óxidos, maior microdureza, maior espessura, maior tensidade e menor taxa de erosão por cavitação como melhores condições.

A tomada de decisão sobre a significância e a influência destes parâmetros (fatores) sobre as características morfológicas e propriedades mecânicas foi baseada nas análises estatísticas deste arranjo ortogonal, bem como e a correlação destes resultados com as propriedades destes revestimentos.

O método utilizando o arranjo ortogonal de Taguchi também permite fazer um ranqueamento destes fatores, a fim de que seja possível identificar qual é o mais influente entre os que se mostram significativos, isto é possível através das diferenças entre as médias das respostas de cada nível para cada fator, ou seja, a diferença entre os efeitos de cada nível. Junto ao ranqueamento, as análises gráficas destes efeitos permitem que seja facilmente identificado qual o melhor nível de cada fator.

Então, após o resultado da análise de variância apresentar quais fatores foram significativos, o ranqueamento apresentou qual é o fator de maior influência para a minha resposta e a análise gráfica permitiu identificar qual é o melhor nível de cada

fator. Foi necessário ainda, identificar a diferença significativa entre estes níveis, ou seja, se existe diferença estatística entre os níveis. Para tanto realizou-se um teste de comparação entre níveis, sendo este chamado de teste de diferença honestamente significativa (*Honestly Significant Difference* - HSD) de Tukey ou simplesmente teste Tukey.

Todas as análises citadas foram realizadas com o auxílio de um software de análise estatística, o Minitab® 17.1.0, o qual permitiu realizar diretamente o planejamento de Taguchi, bem como facilitou a construção dos gráficos.

Os parâmetros de processo que foram determinados como fatores no estudo foram: distância, fluxo mássico dos gases de combustão, estequiometria da combustão e taxa de alimentação de pó. Outros parâmetros foram considerados baseados nas recomendações do fabricante de cada pistola.

Sendo assim, para cada processo de HVOF, foi definido uma matriz ortogonal L9, conforme apresentado nos subitens a seguir. As tabelas apresentam as combinações de fatores e níveis para um arranjo ortogonal L9.

Os valores de taxa de alimentação foram estipulados pelo parâmetro de máquina RPM, onde, para obter suas equivalências para cada material, foi levantado uma curva de calibração. Para isso foi coletada uma fração de pó, por um tempo predeterminado, para três valores de RPM diferentes, e após a pesagem desse pó, era estabelecido uma correlação entre RPM e g/min.

Também foi preciso estabelecer que todos os processos seriam robotizados, com a utilização de um robô KUKA modelo ME_30_60_50; garantindo constância e precisão nos valores de velocidade e distância e, principalmente, no caminho proposto como padrão de deposição.

Em todos os experimentos, seja para HVOF etanol ou propano, utilizou-se 1000 mm/s de velocidade de avanço no robô, o que caracteriza a velocidade de deposição. O padrão de deposição utilizado é ilustrado na FIGURA 15.

FIGURA 15 – CONFIGURAÇÃO UTILIZADA COMO PADRÃO PARA DEPOSIÇÃO EM TODAS AS AMOSTRAS



FONTE: A autora (2023).

Este padrão foi estabelecido para que, com um gap de 3 mm, fosse possível varrer toda a superfície da amostra.

3.5.1 ASPERSÃO TÉRMICA HVOF

Foi utilizada aspensão térmica a alta velocidade HVOF, para a deposição das ligas. Sendo elas, duas pistolas de HVOF diferentes: e-Gun, da FST a base de etanol e DJ2700, da Oerlikon Metco, a base de propano.

A deposição foi realizada com o auxílio de um robô KUKA KRC4, com um ângulo de 90° em relação à superfície. O resfriamento das pistolas foi feito com auxílio de um chiller Friotec TF09 AR, para pistola DJ2700 e TF 75 AR, para as pistolas JP500 e eGun. A definição dos parâmetros utilizados foi realizada a partir da Metodologia de Taguchi, através da definição de variáveis de influência e seus níveis. Os parâmetros variáveis considerados são identificados na TABELA 2 e os parâmetros fixos na TABELA 3.

TABELA 2 – PARÂMETROS DE PROCESSO VARIÁVEIS.

Processo	HVOF propano			HVOF etanol		
	DJ2700			e-Gun		
Pistola						
Distância de deposição (mm)	175	225	275	175	225	275
Estequiometria	0,5	0,7	0,9	0,8	1	1,2
Fluxo mássico dos gases (g/s)	14,5	15,5	16,5	16	18	20
Taxa de alimentação do pó (g/min)	40	60	80	60	80	100
Fluxo de combustível (l/min)	72	62	54	0,46	0,45	0,43
Fluxo de oxigênio (l/min)	175	215	245	420	515	600

FONTE: A autora (2024).

TABELA 3 – PARÂMETROS DE PROCESSO FIXOS.

Processo	HVOF propano	HVOF etanol
Pressão de oxigênio (Bar)	10,3	21
Pressão de combustível (Bar)	6,2	N/A
Fluxo gás de arraste (l/min)	12,5	10
Pressão de ar (Bar)	7,2	N/A
Velocidade de deposição (m/s)	1	1

FONTE: A autora (2024).

Os parâmetros calculados considerando o arranjo L9 de Taguchi e a janela de deposição são apresentados na TABELA 4 e TABELA 5, assim como também são apresentados os valores utilizados no equipamento como vazão de oxigênio, combustível e ar comprimido (obtidos através das curvas, relativas à estequiometria e vazão mássica).

TABELA 4 – DEPOSIÇÃO HVOF ETANOL (PISTOLA EGUN®)

Pré aquecimento: 2 passes com parâmetro de chama							
Valores calculados com base na janela de deposição					Regulagem do equipamento para atingir os valores calculados		
Exp.	Distância de deposição (mm)	Fluxo mássico dos gases (g/s)	λ	Taxa de alimentação de pó (g/min)	Vazão oxigênio (l/min)	Vazão etanol (l/h)	Alimentador de pó (rpm)
1	175	16	0,8	60	420	27,6	5,07
2	175	18	1	80	515	26,1	6,69
3	175	20	1,2	100	580	25,8	8,31
4	225	16	1	100	470	21,9	8,31
5	225	18	1,2	60	545	22,8	5,07
6	225	20	0,8	80	525	34,2	6,69
7	275	16	1,2	80	485	21	6,69
8	275	18	0,8	100	475	31,2	8,31
9	275	20	1	60	570	29,4	5,07

FONTE: A autora (2024).

TABELA 5 - DEPOSIÇÃO HVOF PROPANO (PISTOLA DJ2700®)

Pré aquecimento: 2 passes com parâmetro de chama							
Valores calculados					Valores utilizados no equipamento		
Exp.	Distância de deposição (mm)	Fluxo mássico dos gases (g/s)	λ	Taxa de alimentação de pó (g/min)	Vazão oxigênio (FMR)	Vazão Propano (FMR)	Vazão ar comprimido (FMR)
1	175	14.5	0.5	45	21	36	50
2	175	15.5	0.7	50	26	31	50
3	175	16.5	0.9	56	33	28	50
4	225	14.5	0.7	56	23	33	50
5	225	15.5	0.9	45	28,5	30	50
6	225	16.5	0.5	50	27	35	50
7	275	14.5	0.9	50	25	30	50
8	275	15.5	0.5	56	24	35	50
9	275	16.5	0.7	45	31	35	50

FONTE: A autora (2024).

A seguir serão apresentados os procedimentos para análise e ensaios realizados neste trabalho.

3.6 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS ASPERGIDOS

Para caracterização dos revestimentos e comparação entre os diferentes tipos de tecnologia associadas ao processo de HVOF, foi utilizada análise por microscopia óptica, microscopia eletrônica, microdureza Vickers, cálculos relativos a tenacidade à fratura e ensaio ultrassônico de cavitação acelerada.

3.6.1 MICROSCOPIA ÓPTICA

Os corpos de prova foram cortados para embutimento e posteriormente preparados metalograficamente, conforme método I sugerido na norma ASTM E1920-03 (2021). A caracterização por microscopia óptica foi realizada com auxílio de um microscópio BX51M. O corte transversal e utilização do microscópio vai ser realizado em cortadeira de precisão Arotec modelo Arocor 300 com disco abrasivo, realizado no Instituto de Pesquisa LACTEC, em Curitiba.

As amostras serão embutidas a quente utilizando baquelite em embutidora automática Arotec PRE30. No processo de lixamento e polimento será realizado utilizando uma Politriz Arotec Aropol-VV. O polimento será feito com suspensão de diamante policristalina Schneider Diapoly SGB de 3 μ m e suspensão de sílica coloidal de 0,05 μ m, rotação de 200 e 150 rpm. Realizado até obtenção de superfície uniforme e sem riscos. Na sequência, serão medidas das espessuras das camadas aspergidas.

3.6.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA, MEV

O MEV, modelo TESCAN VEGA 5 foi utilizado para caracterização da microestrutura dos revestimentos através da seção transversal das amostras e da microestrutura de pós para fabricação dos revestimentos, além de medição da fração da área de óxidos e poros. A técnica também será utilizada para análise dos mecanismos de desgaste das amostras submetidas aos ensaios de erosão e corrosão.

3.6.3 ANÁLISE DA FRAÇÃO DE ÁREA DE ÓXIDOS E POROS

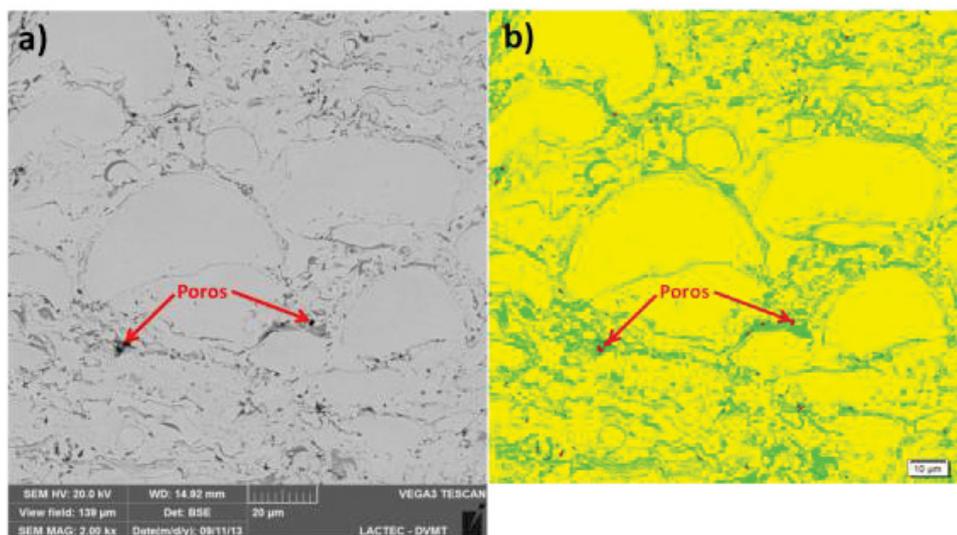
A análise de imagens para quantificar o percentual de poros e fração em área de óxidos foi realizada através da conversão das imagens de MEV de tons de cinza com 16 bits para 8 bits, ou imagens de microscopia ótica, em seguida convertida para três cores distintas: amarelo, verde e vermelho. Esta análise seguiu o método de teste B da norma (ASTM E2109-01, 2021).

Com a definição de cada microconstituente através da técnica de “treshold”, caracterizado pelos limites do tom de cinza dos poros, óxidos e fase metálica, calcula-se a fração em área de cada fase na imagem. Nesta técnica, utilizaram-se imagens da seção transversal e longitudinal.

A área relativa de cada cor foi então mensurada, definindo-se a fração em área de cada microconstituente. Para este procedimento foi utilizado o software de análise de imagens Analysis. Os valores foram medidos através da análise de 8 imagens para cada revestimento depositado.

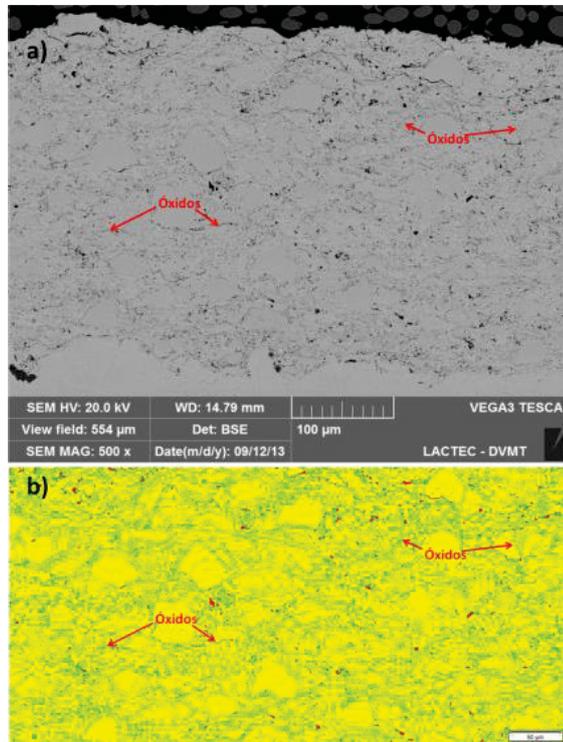
As FIGURA 16 e FIGURA 17 apresentam uma comparação esquemática de um dos revestimentos, do arranjo L9 de Taguchi, como um exemplo de aplicação da técnica de medição de porosidade e teor de óxidos por análise de imagem, onde amarelo representa a fase metálica, a cor verde os óxidos e vermelho os poros.

FIGURA 16 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MEDIÇÃO DE POROSIDADE POR ANÁLISE DE IMAGENS. EM A) IMAGENS POR MEV COM AMPLIAÇÃO DE 2000X; EM B) A MESMA IMAGEM APÓS ANÁLISE.



FONTE: (SUCHARSKI, 2016)

FIGURA 17 - EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MEDIÇÃO DE POROSIDADE POR ANÁLISE DE IMAGENS. EM A) IMAGENS POR MEV COM AMPLIAÇÃO DE 500X; EM B) ÁREA REFERENTE AO REVESTIMENTO DA MESMA IMAGENS APÓS ANÁLISE.



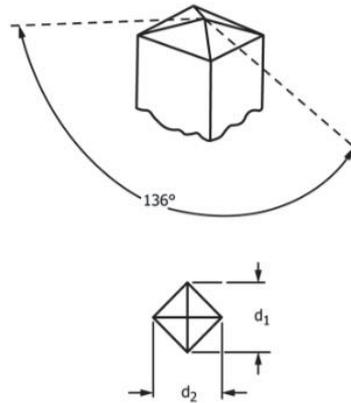
FONTE: (SUCHARSKI, 2016)

3.6.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

O ensaio de microdureza tem como objetivo analisar as propriedades físicas do revestimento aspergido, através da determinação da dureza. Sendo capaz de avaliar e quantificar as variações de dureza que ocorrem em pequenas distâncias. Os corpos de prova a serem utilizados são os mesmos utilizados para análise da microestrutura dos revestimentos.

Foram realizadas medições de microdureza Vickers, segundo norma (ASTM E384-22, 2022), utilizando equipamento Emcotest modelo DuraScan 20. Será utilizado um indentador de pirâmide de diamante base quadrada, com ângulos de face de 136° (FIGURA 18), com aplicação de carga de 300gf. A diagonal da indentação será medida com microscópio de luz após a remoção da carga.

FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA INDENTADOR VICKERS



FONTE: (ASTM E384-22, 2022)

A dureza Vickers é calculada através da seguinte equação:

$$HV = 10^3 \times F/A_s = 2 \times 10^3 \times F \operatorname{sen}(\alpha/2)/d^2 \quad (6)$$

ou

$$HV = 1854,4 \times F/d^2 \quad (7)$$

onde:

F = força (gf);

A_s = área superficial da penetração (μm^2);

d = comprimento principal da diagonal da penetração;

α = ângulo facial do indentador (136°).

Assume-se que a recuperação elástica não ocorre quando o penetrador é removido após o ciclo de carregamento.

Através da lente do equipamento é possível definir o início da medição de dureza através das diagonais da penetração. Em seguida, o penetrador é posicionado a uma distância de 0,1 do ponto anterior e o processo é repetido cinco vezes. Serão utilizadas seis posições diferentes para medição e, por fim, será obtida uma média e desvio padrão dos valores de dureza.

3.6.5 TENACIDADE À FRATURA

O ensaio de tenacidade à fratura foi realizado em amostras de seção transversal, e utilizando-se o durômetro Emcotest Modelo Durascan 20, em escala de

microdureza, pertencente aos Institutos LACTEC, sendo que uma carga de 10 Kgf foi aplicada, com o uso do indentador Vickers, com cinco indentações realizadas em cada revestimento. Este ensaio consiste na medição da trinca gerada pela indentação e posterior análise dos dados para obtenção do valor numérico da tenacidade à fraturada amostra. Para este caso, a Equação 1 proposta por EVANS; WILSHAW (1976), foi utilizada.

$$K_{IC} = 0.079 \left(\frac{P}{a^{\frac{3}{2}}} \right) \log \left(\frac{4.5a}{c} \right) \quad (8)$$

Onde:

P = carga aplicada (mN),

a = metade da diagonal da indentação ()

c = comprimento de trinca medido do centro da indentação ().

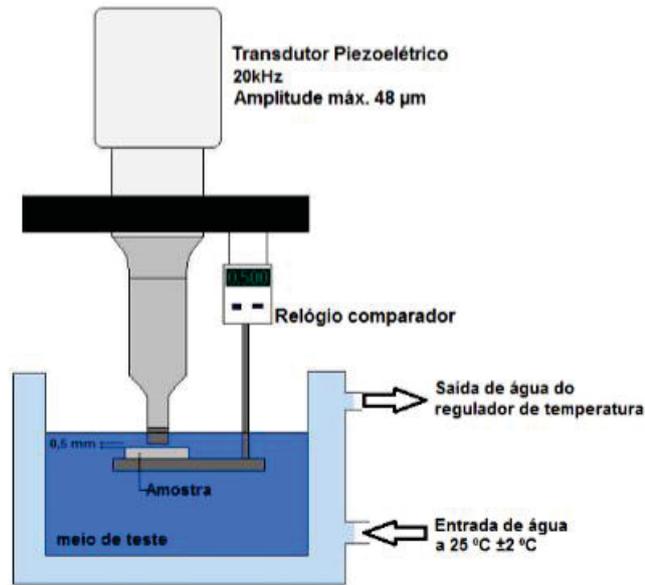
Esta equação somente é válida para o intervalo de $0.6 \leq c/a \leq 4.5$ e foi utilizada como um método alternativo ao cálculo da tenacidade, já que os métodos tradicionais costumam levar em conta a relação entre módulo de elasticidade e dureza. Este método foi utilizado em estudos na área de aspensão térmica de revestimentos, pela praticidade e precisão dos resultados obtidos.

3.6.6 ENSAIO DE EROSÃO POR CAVITAÇÃO

O ensaio de cavitação visa estimar a resistência relativa do revestimento ao processo erosivo por cavitação, através da taxa de perda de massa desses revestimentos. Os ensaios foram realizados no Instituto de Pesquisa LACTEC, em Curitiba. O equipamento a ser utilizado no ensaio de erosão por cavitação é o QSONICA SONICATOR modelo Q700, para o controle da temperatura da água será utilizado o banho termostático digital MQBMP-01 da MICROQUÍMICA.

O ensaio foi realizado com adaptações da norma ASTM G32-16E1 (2021), que especifica a frequência de vibração ($20 \pm 0,5$) kHz e amplitude de ($50 \pm 0,5\%$) μm pico a pico. Em que se avalia a cavitação indireta, facilitando o posicionamento do corpo de prova em relação ao sonotrodo. Na FIGURA 19 pode-se observar uma representação esquemática do ensaio de cavitação.

FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO DE CAVITAÇÃO

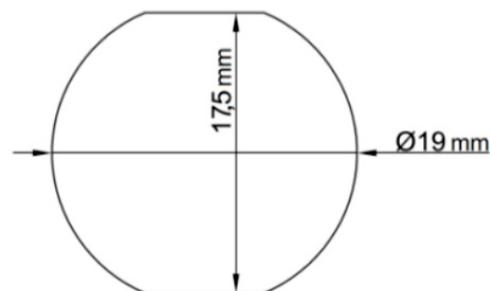


FONTE: (SUCHARSKI, 2016)

A ponteira de sacrifício do sonotrodo tem o formato e dimensão apresentada na FIGURA 20, com área superficial de $276,1 \text{ mm}^2$. A ponteira sugerida pela norma é 15,9 de diâmetro e área de $198,5 \text{ mm}^2$. Sendo as áreas cavitadas das ponteiras diferentes, os resultados de perda de massa não podem ser comparados diretamente. Portanto, é necessário utilizar taxa de perda de massa por área.

O ensaio foi realizado na bancada de ensaio do Laboratório de Revestimentos e Soldagem do LACTEC – REVSOLDA.

FIGURA 20 – GEOMETRIA DA PONTEIRA DE SACRIFÍCIO



FONTE: (SUCHARSKI, 2016)

As medições de massa dos corpos de prova foram realizadas ao longo do ensaio de cavitação, utilizando balança METTLER Todedo modelo AL204, com precisão de 0,1 mg. Para cada teste foram executas 5 medições.

Os parâmetros para realização do ensaio de cavitação considerados são apresentados no QUADRO 3.

QUADRO 3 – PARÂMETROS ENSAIO DE CAVITAÇÃO

Parâmetros	Valores
Meio de teste	Água deionizada
Intensidade de cavitação	80 %
Distância do sonotrodo à superfície	$500 \pm 10 \mu m$
Profundidade de imersão da amostra	45
Temperatura do meio	$25 \pm 2 \text{ } ^\circ C$

FONTE: A autora (2024).

O cálculo da taxa de erosão foi realizado com base na perda de massa registrada ao longo do ciclo. Com esses dados, foi gerada uma curva de perda de massa devido à erosão. Adicionalmente, foi realizada uma regressão linear nas regiões de estabilidade da curva, permitindo determinar o valor correspondente à taxa de erosão do revestimento causado pela cavitação.

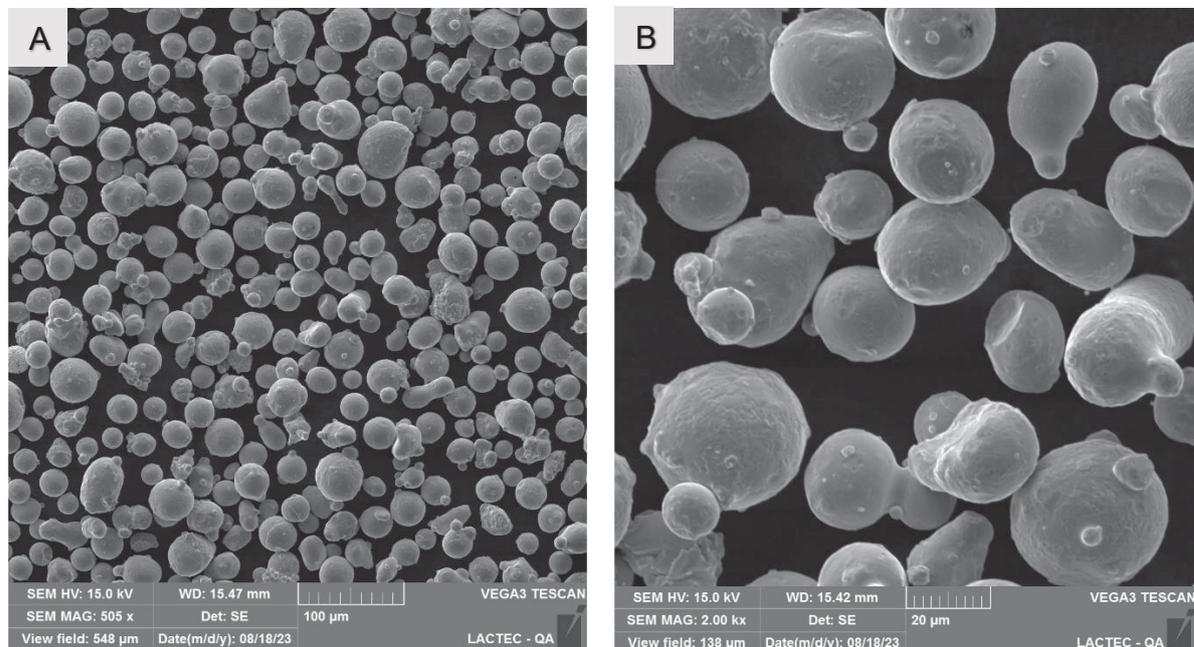
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados de caracterização das amostras, utilizando o método estatístico de Taguchi para elencar os parâmetros relevantes e com melhores resultados. Inicialmente, serão discutidos resultados referentes a deposições realizadas pela pistola de etanol e, posteriormente, referente a pistola de propano. Por fim, será apresentada uma análise comparativa os resultados obtidos por ambos os processos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PÓ

Avaliou-se o pó, em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) TESCAN VEGA 5 para análise de sua microestrutura, pois esta influencia diretamente a velocidade da partícula em voo, como apresentado por (FUKANUMA *et al.*, 2006). A FIGURA 21 apresenta a imagem das partículas analisadas no MEV.

FIGURA 21 - PARTÍCULAS DE 316L ANALISADAS NO MEV. A) 500X; B) 2000X.



FONTE: A autora, 2022

4.2 ETANOL: E-GUN®

A seguir são apresentados os resultados referentes a deposição utilizando pistola HVOF com combustível líquido etanol, e-Gun®.

Como todos os experimentos foram realizados dentro de um planejamento experimental (DOE), sendo adotado com ferramenta estatística de otimização de processos a metodologia de Taguchi L9, uma sequência de análises foi realizada, o QUADRO 4 apresenta uma descrição dessas informações.

QUADRO 4 – ANÁLISES ESTATÍSTICAS UTILIZADAS PARA AVALIAR OS RESULTADOS

Análise estatística	Descrição
1 - Quadro de resumo das análises	Não é de fato uma análise estatística, mas é apresentado logo no início de cada seção, pois reúne e compila todos os resultados, permitindo um panorama completo sobre aquele conjunto de análises.
2 - Análise da variância ou anova	Análise da variância permite, por meio de testes de hipóteses, identificar quais fatores são estatisticamente significativos. Ou seja, quais dos parâmetros estudados realmente influenciam em determinada resposta.
3 - Ranqueamento	Permite classificar a importância dos fatores, independente da sua influência ser significativa para determinada resposta. Ou seja, indica qual é a ordem de importância dos parâmetros estudados.
4 - Gráfico efeitos principais	Este gráfico permite identificar diretamente como os níveis de cada fator afetam a resposta. Ou seja, neste você identifica qual valor de cada parâmetro é responsável por produzir o melhor resultado.
5 - Gráficos de resíduos	Permite avaliar a distribuição e dispersão dos dados analisados, permitindo identificar aleatoriedade e validação do conjunto de dados.
6 - Teste Tukey de comparação de medias	Este teste permite entender qual correlação entre os níveis são significativamente diferentes entre si. Ou seja, por meio de comparações par a par, ele mostra quais são significativamente diferentes ou iguais.
OBS.: O nível de significância adotado para as análises foi o de 95% ($\alpha=0,05$). Isso se deve as características dos próprios processos, tanto de aplicação dos revestimentos, como as técnicas de caracterização, em apresentar uma repetibilidade com certa variabilidade e ainda, dependentes de ação e definição humana.	

FONTE: A autora (2024).

4.2.1 Características dos revestimentos aspedidos

Segundo LIU et al. (2023), diferentes fatores de estequiometria possuem pequeno efeito nas fases do material, no entanto, possuem grande impacto na microestrutura do revestimento e propriedades como as analisadas nesse capítulo.

Com o objetivo de realizar essa análise morfológica, foram revestidas nove amostras através do processo HVOF, com variação da estequiometria das reações de combustão na câmara interna da pistola eGun. Dessa forma, variou-se o fluxo de

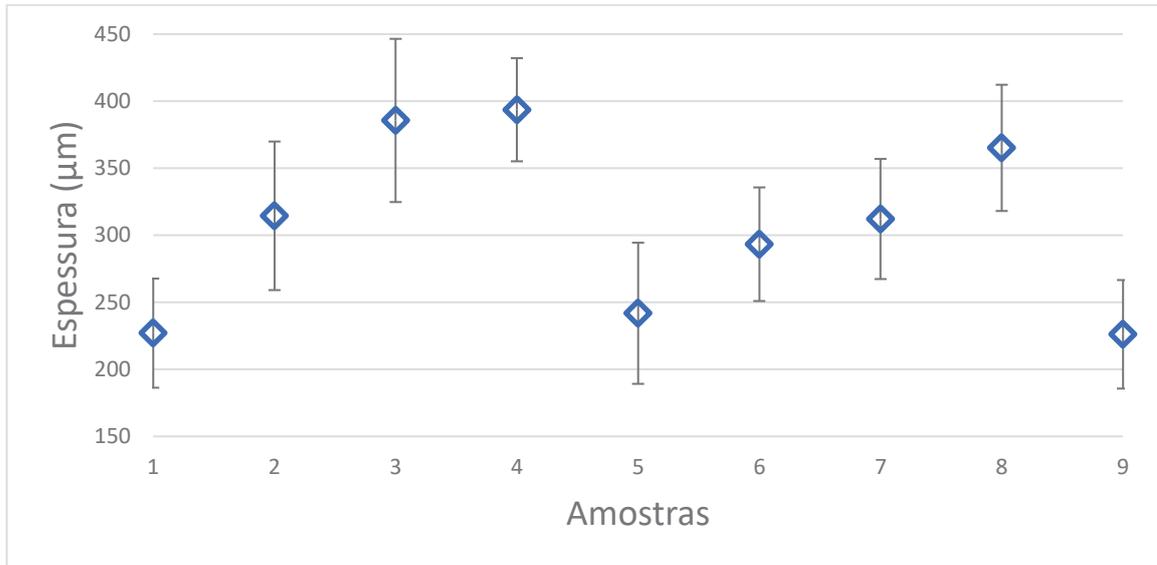
oxigênio e combustível, assim como a pressão resultante na câmara. Além disso, outros parâmetros variáveis foram a taxa de alimentação e distância de deposição.

Observou-se a partir da análise metalográfica que as espessuras variaram de 110 a 360 μm . Através das análises foi possível visualizar uma microestrutura característica de revestimentos depositados por HVOF, com estruturas achatadas, presença de poros (ou vazios) nas áreas mais escuras e óxidos interlamelares (pequenas áreas em cinza claro). Sendo possível ainda perceber a interface substrato/revestimento, sem presença de um filme de óxidos.

Os revestimentos apresentaram diferenças significativas de espessuras, sendo que as menores espessuras, de valores entre 110 e 225 μm , decorreram da menor taxa de alimentação de 40g/min. O que é corroborado por outros trabalhos que apresentaram a mesma relação taxa de alimentação espessura do revestimento. (SUCHARSKI, 2016)]

Através do GRÁFICO 4, pode-se perceber que os resultados variaram de 200 μm a 400 μm , mas esse dado pode estar relacionado à quantidade de passes da deposição. Assim como depende da taxa de alimentação do pó utilizada na deposição, como fator principal, seguido da variação na distância. Esses fatores são corroborados na literatura, assim como nas análises estatísticas realizadas e presentes no Apêndice 1.

Esses valores de espessura são comumente encontrados na literatura. No entanto, é esperada a obtenção de espessuras superiores a cerca de 300 μm , para que os efeitos desejados dessa camada possam apresentar melhores características mecânicas. No caso dessa pesquisa, a resistência à cavitação é desejada.

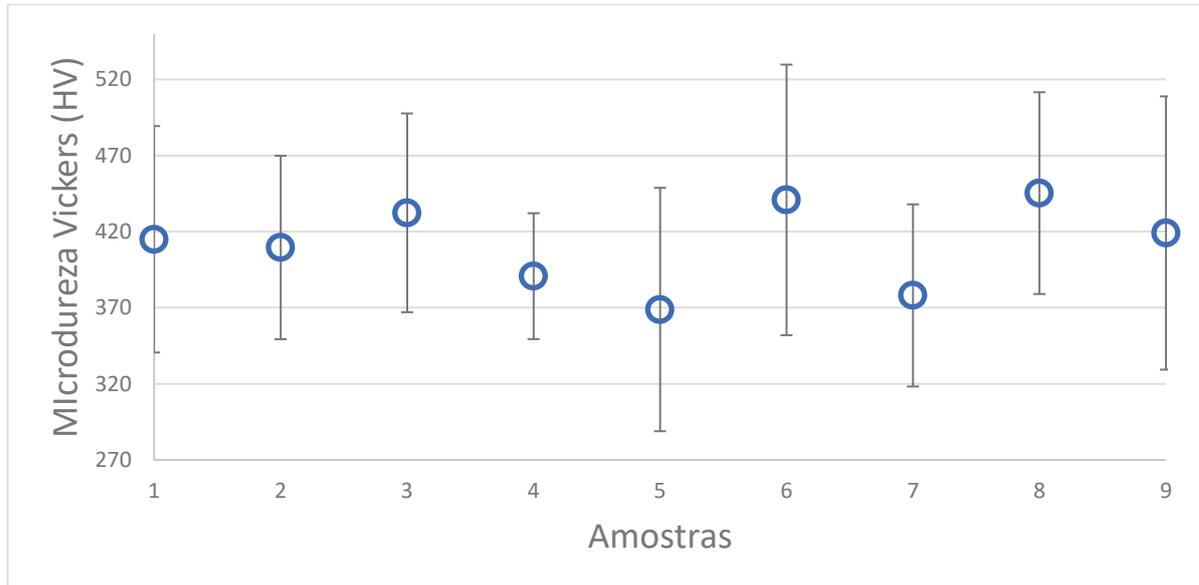
GRÁFICO 4 - ESPESSURA DAS AMOSTRAS (μm), PISTOLA ETANOL.

FONTE: A autora (2024).

A microdureza apresentada pelo fornecedor do material 316L utilizado neste experimento para pistolas de HVOF é de 320 a 390 HV para parâmetros definidos pela Oerlikon Metco. ("DSM-0269.2-Type 316L Austenitic Stainless Steel Powders", 2022). Este parâmetro aproxima-se dos valores encontrados nas microdurezas dos revestimentos analisados, conforme demonstra o GRÁFICO 5.

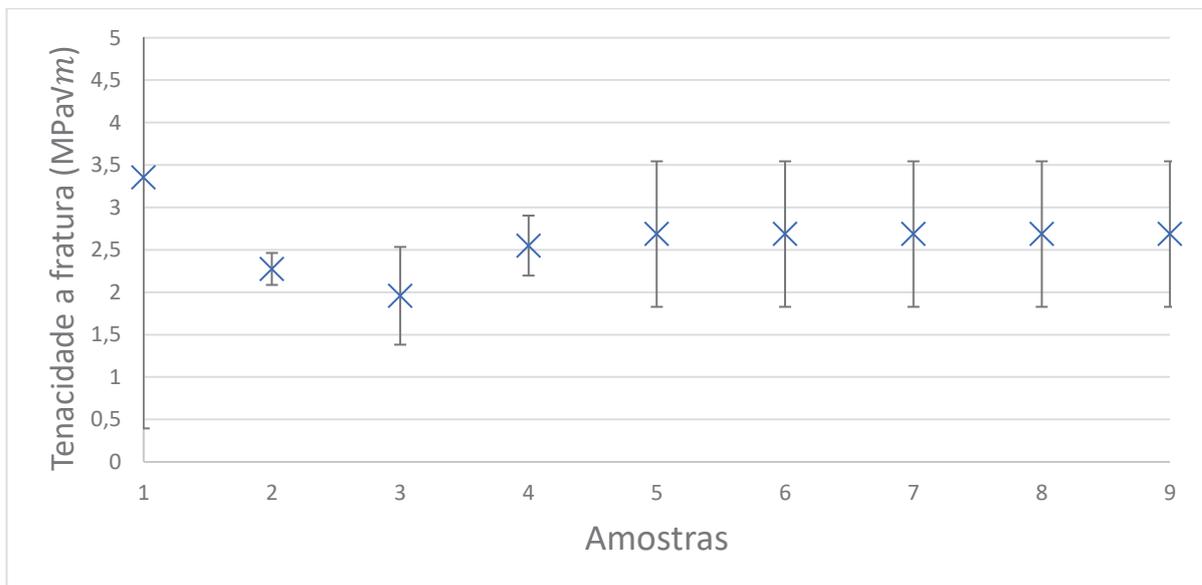
Os resultados de microdureza apresentados estão entre 350 e 450 HV, similar aos valores mencionados pelo fornecedor, mas ainda um pouco acima deste resultado. O que apresenta uma característica relevante para o estudo.

GRÁFICO 5 - MICRODUREZA DAS AMOSTRAS (HV), PISTOLA ETANOL



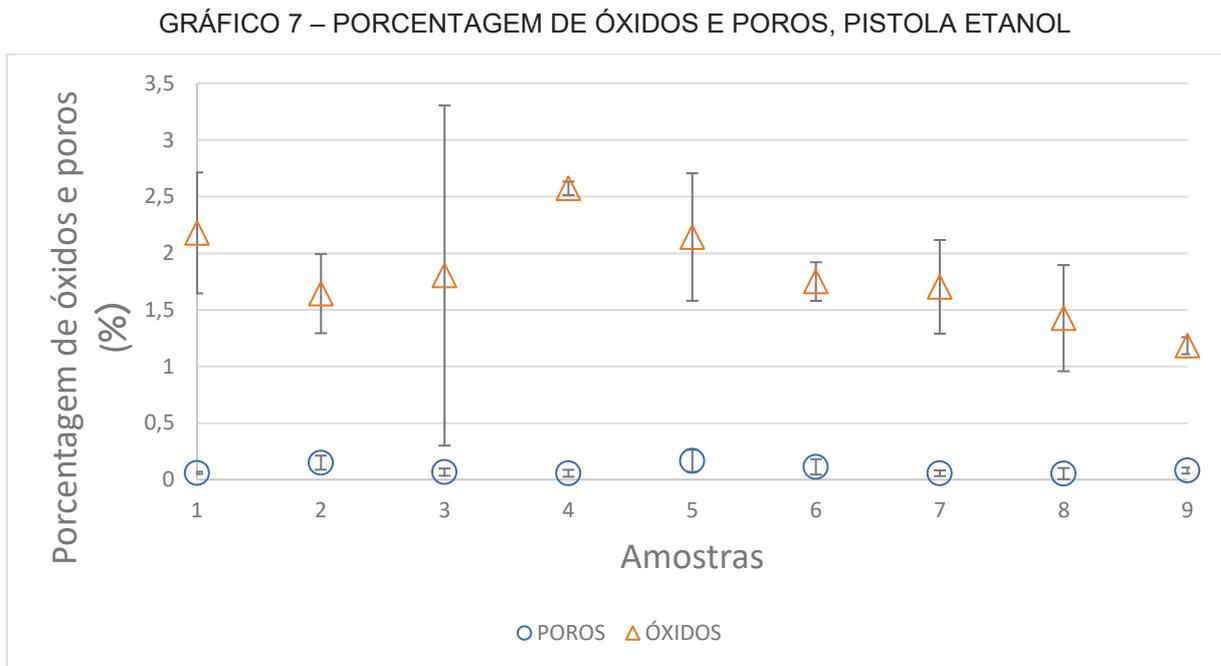
FONTE: A autora (2024).

Quanto à tenacidade a fratura, associada a capacidade do revestimento em resistir à propagação de uma trinca, os dados apresentaram uma pequena variação. Esta variação ocorreu entre valores de K_{1C} entre 2 e 3,5. Como pode ser analisado no GRÁFICO 6 abaixo. Com os resultados das amostras 5 a 9 apresentando resultados similares.

GRÁFICO 6 – TENACIDADE A FRATURA ($\text{MPa}\sqrt{m}$), PISTOLA ETANOL

FONTE: A autora (2024).

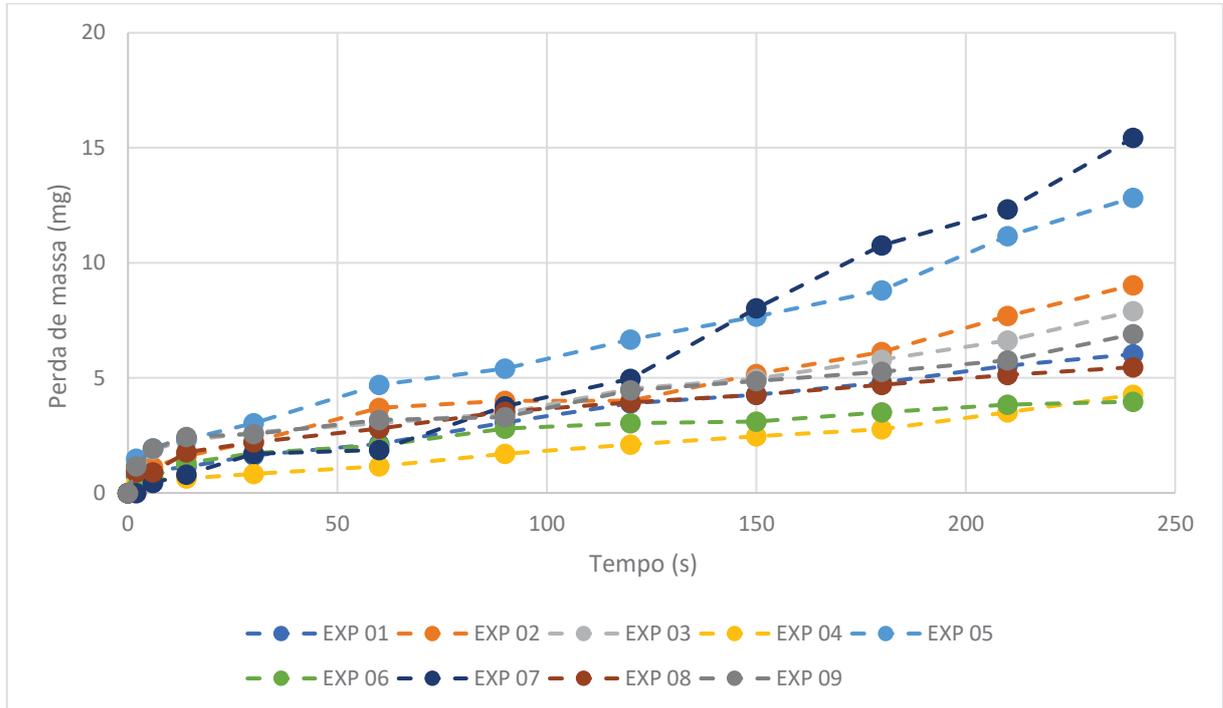
Referente a porcentagem de óxidos e poros dos revestimentos, GRÁFICO 7, é possível notar que a porcentagem de óxidos varia de 1 a 2,5%, enquanto a porcentagem de poros não atinge 0,5%, o que é um resultado muito acima do esperado, se comparando revestimentos HVOF propano, por exemplo.



FONTE: A autora (2024).

No GRÁFICO 8 é possível analisar a perda de massa por cavitação ao longo do tempo para deposição utilizando a pistola de etanol. Onde cada curva representa uma amostra. Assim, ao longo de 250 min, o maior valor de perda de massa obtido foi de 15 mg e o menor foi abaixo de 5 mg.

GRÁFICO 8 – CURVA RELATIVA À PERDA DE MASSA POR CAVITAÇÃO AO LONGO DO TEMPO, PARA CADA AMOSTRA



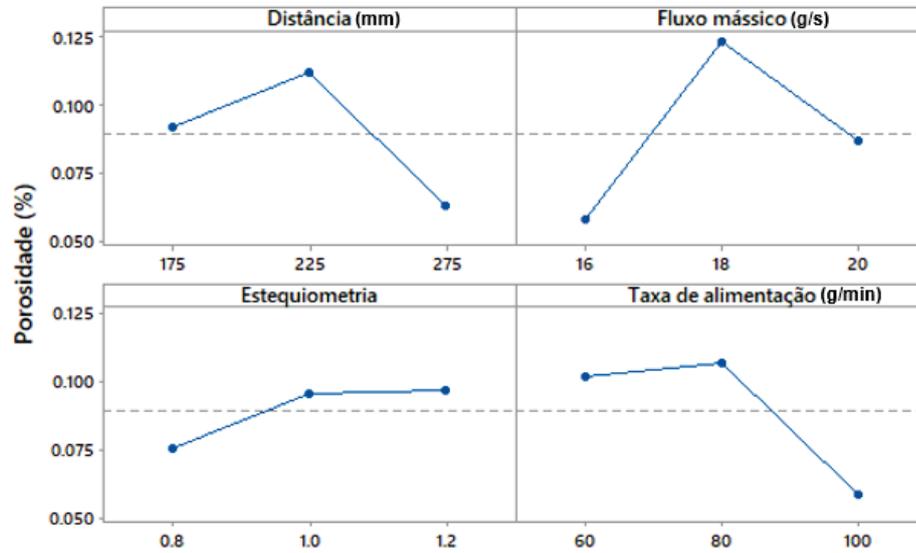
FONTE: A autora (2024).

4.2.2 Gráfico de efeitos principais

Através dos gráficos de efeitos principais, foi possível relacionar os parâmetros utilizados na deposição com os resultados obtidos. E, por meio disso identificar uma possível relação direta entre esses fatores.

Em relação a porosidade foi possível identificar através da ANOVA e estratégia de ranqueamento por meio do método de Taguchi, que a porosidade está diretamente ligada ao fluxo mássico da deposição. Dessa forma, quanto menor o fluxo mássico total da aspensão, menor deve ser a porosidade do revestimento final. A influência do fluxo mássico na porosidade para este processo também pode ser percebida através do GRÁFICO 9. LIU et al. (2021) encontraram resultados similares quanto à porosidade e relacionaram o aumento do fluxo mássico a um aumento na pressão na câmara interna da pistola, resultando em velocidades elevadas e assim, menores porcentagens relativas à porosidade.

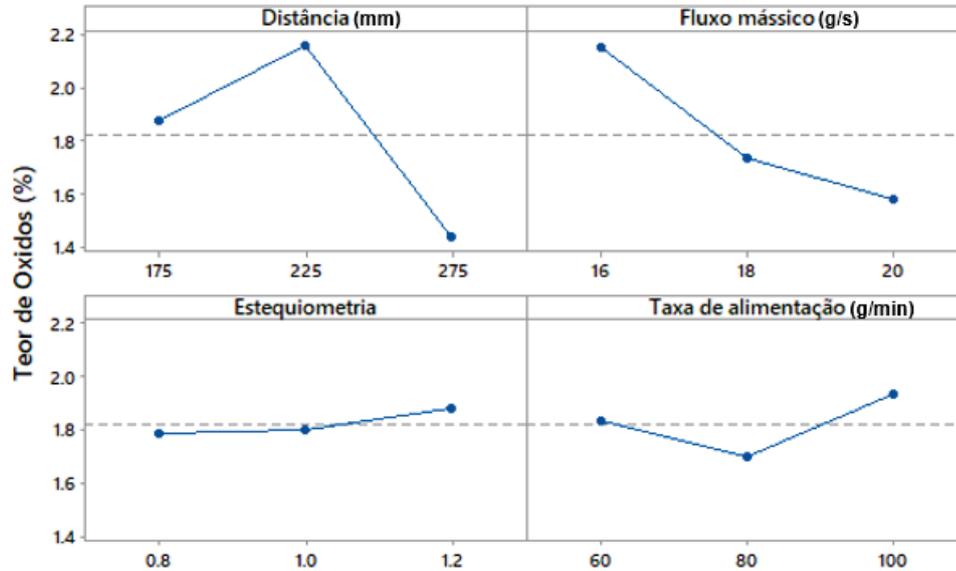
GRÁFICO 9 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À POROSIDADE, DEPOSITADO POR ETANOL



FONTE: A autora (2024).

Relativo ao teor de óxidos, através da ANOVA, nenhum fator apresentou valor significativo exercendo influência sobre os resultados. No entanto, alguns fatores exerceram algum nível de relação, como a distância e o fluxo mássico que pode ser identificado através do ranqueamento, por meio do método de Taguchi. Em relação ao GRÁFICO 10 dos efeitos principais, é possível perceber a variação do teor de óxidos decorrente dos mesmos parâmetros.

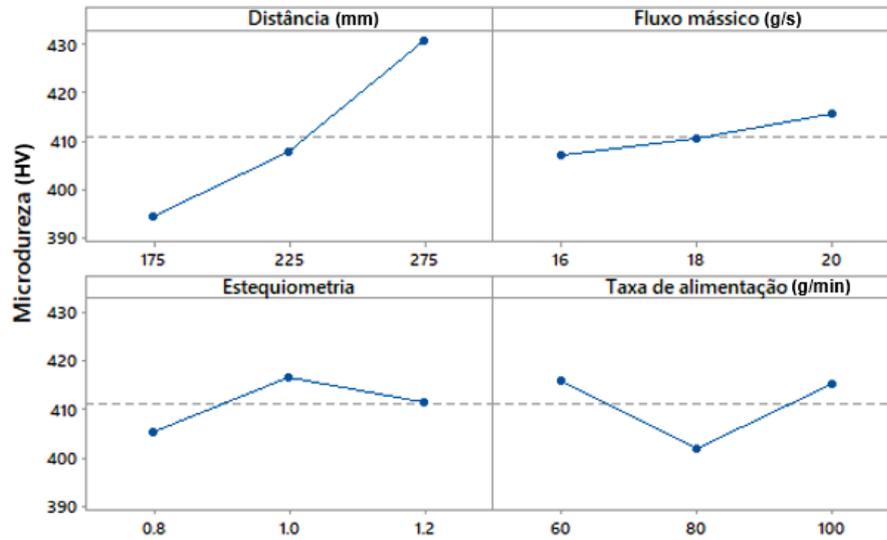
GRÁFICO 10 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO AO TEOR DE ÓXIDOS, DEPOSITADO POR ETANOL.



FONTE: A autora (2024).

Quanto à microdureza Vickers, as análises estatísticas (Apêndice 1) indicam uma relação direta da microdureza com a distância de aplicação do revestimento, por meio do processo HVOF etanol. Através do GRÁFICO 11 também é possível visualizar uma relação direta dos dois fatores, de forma que quanto maior a distância de aplicação, maior a microdureza do revestimento. Essa relação pode estar relacionada à deformação plástica da partícula, pois quanto mais a distância, maior a energia cinética e conseqüentemente mais deformada a partícula encontrará o substrato. LIU (2022) também estudou o efeito do fluxo e estequiometria na microdureza do revestimento e encontrou uma relação direta com a temperatura. Esse efeito deve-se a uma relação com a baixa porosidade, favorecendo coesões inter e intra-lamelares. Essa correlação da porosidade e microdureza também foi encontrada por PALANISAMY; GANGOLU; MANGALAM ANTONY (2022).

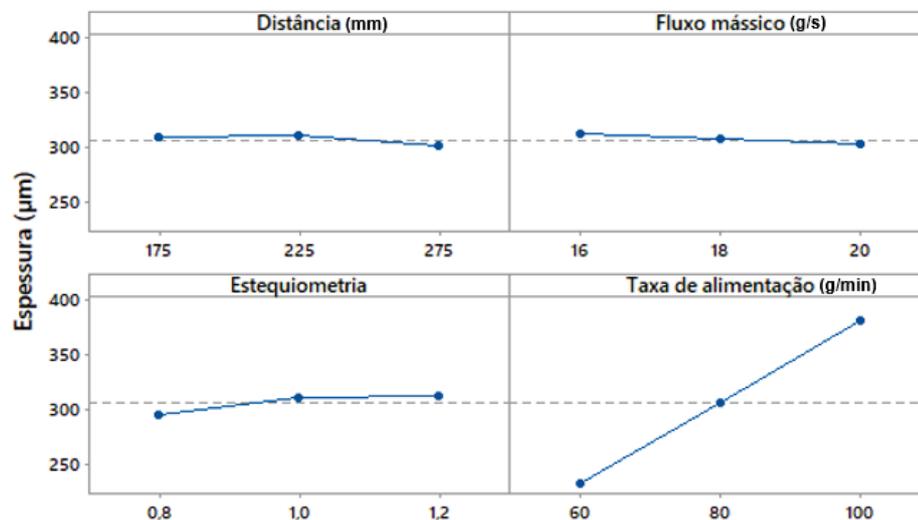
GRÁFICO 11 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À MICRODUREZA VICKERS, DEPOSITADO POR ETANOL.



FONTE: A autora (2024).

O GRÁFICO 12 apresenta a relação dos efeitos principais para médias, relacionando a espessuras com os parâmetros selecionados no experimento. Através desse gráfico e de análises estatísticas presentes no Apêndice 1 é possível perceber uma relação direta da espessura com a taxa de alimentação utilizada na deposição. Assim, quanto maior a taxa de alimentação, maior a espessura encontrada no revestimento, já que uma maior taxa de partículas por segundo reflete em uma maior quantidade a ser ancorada mecanicamente no substrato.

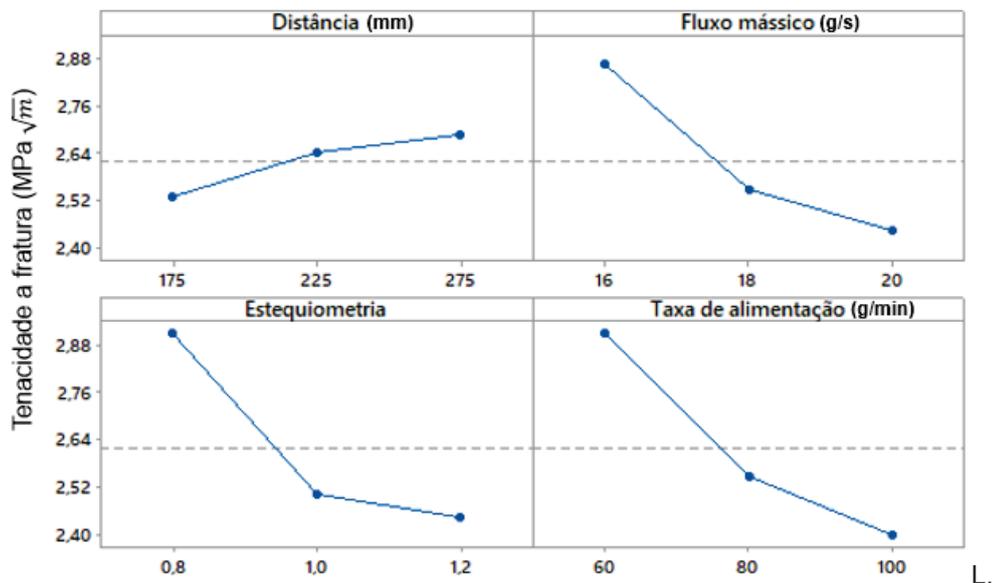
GRÁFICO 12 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À ESPESSURA, DEPOSITADO POR ETANOL.



FONTE: A autora (2024).

A relação dos efeitos principais para médias em relação à tenacidade pode ser visualizada no GRÁFICO 13 nenhum fator apresentou valor significativo exercendo influência sobre os resultados nas análises estatísticas no Apêndice 1. Porém, alguns fatores exercem algum nível de interação, como é possível notar no gráfico abaixo. LIU et al. (2021) mencionam a tenacidade a fratura como um fator que é alterado de forma inversa à porosidade, dessa forma, quanto maior a porosidade, menor a tenacidade, provavelmente devido a presença dos poros atuantes como concentrador de tensão para propagação de trincas.

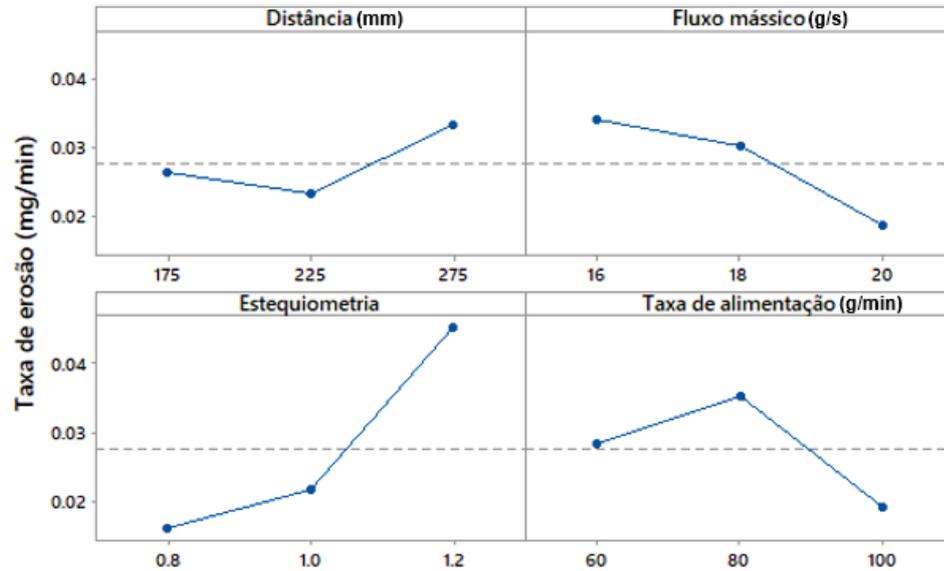
GRÁFICO 13 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À TENACIDADE, DEPOSITADO POR ETANOL



FONTE: A autora (2024).

A taxa de erosão por cavitação, GRÁFICO 14, apresenta uma relação direta com a estequiometria da relação. Essa relação pôde ser identificada através das análises estatísticas, assim como através do gráfico abaixo. A estequiometria está atrelada à espessura da amostra e, pode por consequência, estar relacionada também à cavitação.

GRÁFICO 14 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À TAXA DE EROSÃO POR CAVITAÇÃO, DEPOSITADO POR ETANOL



FONTE: A autora (2024).

4.2.3 Parâmetros otimizados

Para interpretar as tabelas de “parâmetros otimizados”, que contém um resumo das análises, segue na FIGURA 22 uma legenda explicativa.

FIGURA 22 - LEGENDA PARA AS TABELAS DE “PARÂMETROS OTIMIZADOS”.

ETANOL 1003	DISTÂNCIA	FLUXO MÁSSICO	ESTEQUIOMETRIA	TAXA DE ALIMENTAÇÃO
Porosidade	NS / 2	S / 1	NS / 4	NS / 3
	175 / 225 / 275	16 / 18 / 20	0.8 / 1.0 / 1.2	60 / 80 / 100

S – Significativo
NS – Não Significativo

Posição no ranqueamento

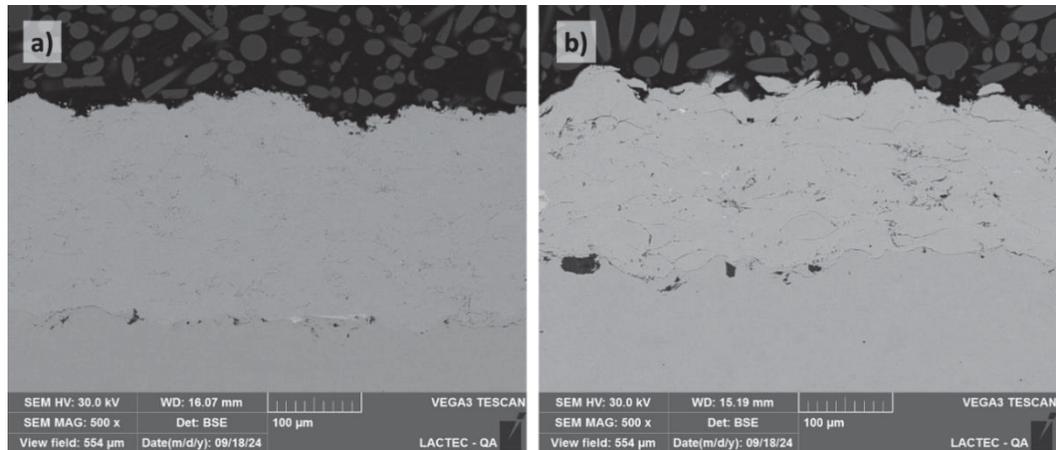
Conjunto de níveis

Negrito e vermelho = Melhor nível, favorece o melhor resultado.
 Não taxados = Não há diferença significativa, não prejudica o resultado.
 Taxados = Há diferença significativa e prejudica o resultado.

FONTE: A autora (2024).

A FIGURA 23 apresenta a microestrutura da seção transversal dos revestimentos de Diamalloy 1003® depositados por HVOF Etanol, sendo em (a) o melhor resultado, com parâmetros mais próximos do otimizado e (b) o resultado menos satisfatório.

FIGURA 23 - MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO DE HVOF ETANOL. (A) EXP 9 MELHOR RESULTADO, (B) EXP 5 MENOS SATISFATÓRIO.



FONTE: A autora (2024).

O QUADRO 5 reúne todos os resultados estatísticos da otimização de parâmetros, auxiliando na tomada de decisão de quais níveis favorecem de forma geral a obtenção do melhor revestimento.

Nos subitens abaixo são apresentadas as análises estatísticas do planejamento experimental de Taguchi, com arranjo ortogonal L9.

QUADRO 5 – PARÂMEROS OTIMIZADOS

HVOF Etanol	Distância	Fluxo mássico	Estequiometria	Taxa de alimentação
Porosidade	NS / 2 175 / 225 / 275	S / 1 16 / 18 / 20	NS / 4 0.8 / 1.0 / 1.2	NS / 3 60 / 80 / 100
Óxidos	NS / 1 175 / 225 / 275	NS / 16 / 18 / 20	NS / 4 0.8 / 1.0 / 1.2	NS / 3 60 / 80 / 100
Microdureza	S / 1 175 / 225 / 275	NS / 4 16 / 18 / 20	NS / 3 0.8 / 1.0 / 1.2	NS / 2 60 / 80 / 100
Espessura	NS / 4 175 / 225 / 275	NS / 3 16 / 18 / 20	S / 2 0.8 / 1.0 / 1.2	S / 1 60 / 80 / 100
Tenacidade	NS / 4 175 / 225 / 275	NS / 3 16 / 18 / 20	NS / 2 0.8 / 1.0 / 1.2	NS / 1 60 / 80 / 100
Taxa de Erosão por cavitação	4 175 / 225 / 275	3 16 / 18 / 20	1 0.8 / 1.0 / 1.2	2 60 / 80 / 100
Parâmetro otimizado	225 ~ 275	20	0,8 ~ 1,0	100

FONTE: A autora (2024).

Estes resultados mostram que pequenas variações de distância e estequiometria não afetam significativamente o resultado. Os parâmetros otimizados não foram aplicados em uma amostra específica, mas os experimentos 06 e 08 são os que mais se aproximam do recomendado.

4.2.4 Comparação sugestão de parâmetros do fornecedor

Para material 316L de granulometria $-53\mu\text{m} +20\mu\text{m}$, utilizando uma pistola E-GUN®, foram sugeridos alguns parâmetros, apresentado no QUADRO 6.

Comparativamente aos resultados otimizados conduzidos neste trabalho, podemos notar que a distância sugerida é muito similar à distância otimizada através da análise estatística de Taguchi. O fluxo mássico otimizado foi um pouco maior que o sugerido pelo fabricante. Mas a estequiometria apresentou também valores muito similares ao proposto pelo fabricante e, por fim, a taxa de alimentação do pó otimizada ficou 25g/min acima da taxa sugerida pelo fabricante.

De maneira geral, os parâmetros ótimos se aproximaram bastante do sugerido, no entanto, pode-se atribuir essa diferença principalmente a variações

decorrentes do combustível (fórmula química), assim como, pressões na câmara de combustão que não foram medidas e fluxo de gás inerte, entre diversos outros fatores que podem vir a influenciar o processo de deposição por HVOF como um todo. Também, deve-se levar em conta que a caracterização do próprio revestimento, não foi único fator relevante para a otimização de parâmetros, pois foi considerada também a tenacidade e taxa de erosão do revestimento como objetivos do nosso estudo.

QUADRO 6 – PARÂMETROS SUGERIDOS PELO FORNECEDOR

Parâmetros	Valores sugeridos
Distância de deposição	270
Fluxo de oxigênio	463 l/min
Fluxo de etanol	26,2 l/h
Fluxo de gás inerte (Nitrogênio)	7,55 l/min
Taxa de alimentação do pó	75 g/min
Estequiometria (calculada)	0,9
Fluxo mássico (calculado)	16,5 g/s

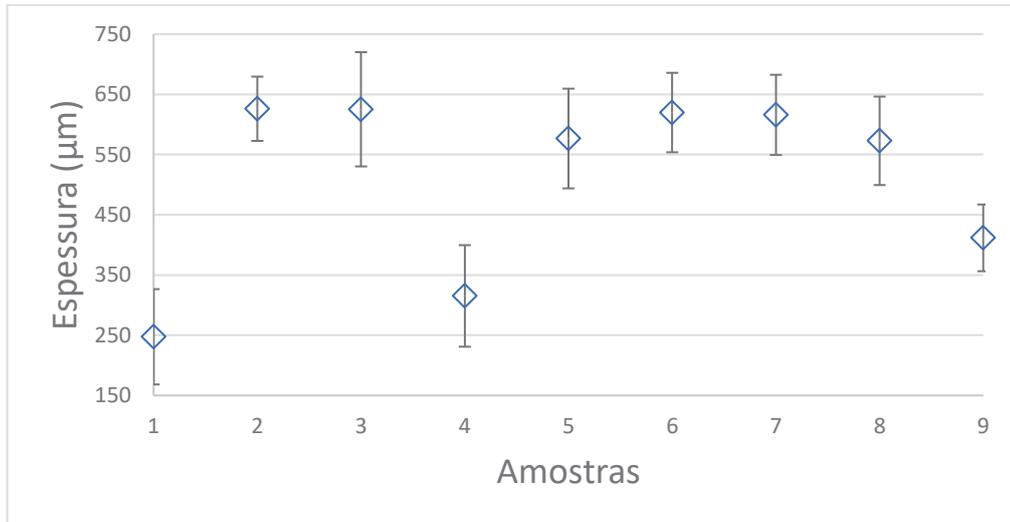
FONTE: A autora (2024).

4.3 PROPANO: DJ2700®

A seguir são apresentados os resultados referentes a deposição utilizando pistola HVOF com combustível gasoso propano, DJ2700®.

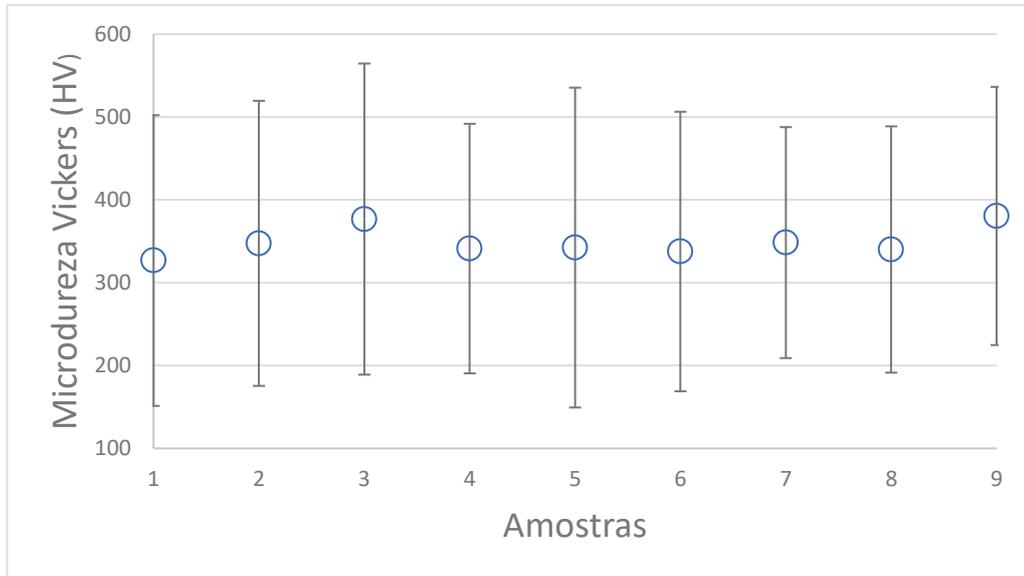
4.3.1 Características dos revestimentos aspergidos

No GRÁFICO 15 podemos visualizar a diferença relativa à espessura dos revestimentos depositados. É possível notar uma grande discrepância, cerca de 200µm, das amostras 01 e 04 em relação as demais. Essas amostras foram depositadas com 04 passes de deposição, apresentando uma divergência quanto a espessura final.

GRÁFICO 15 - ESPESSURA DAS AMOSTRAS (μm), PISTOLA PROPANO.

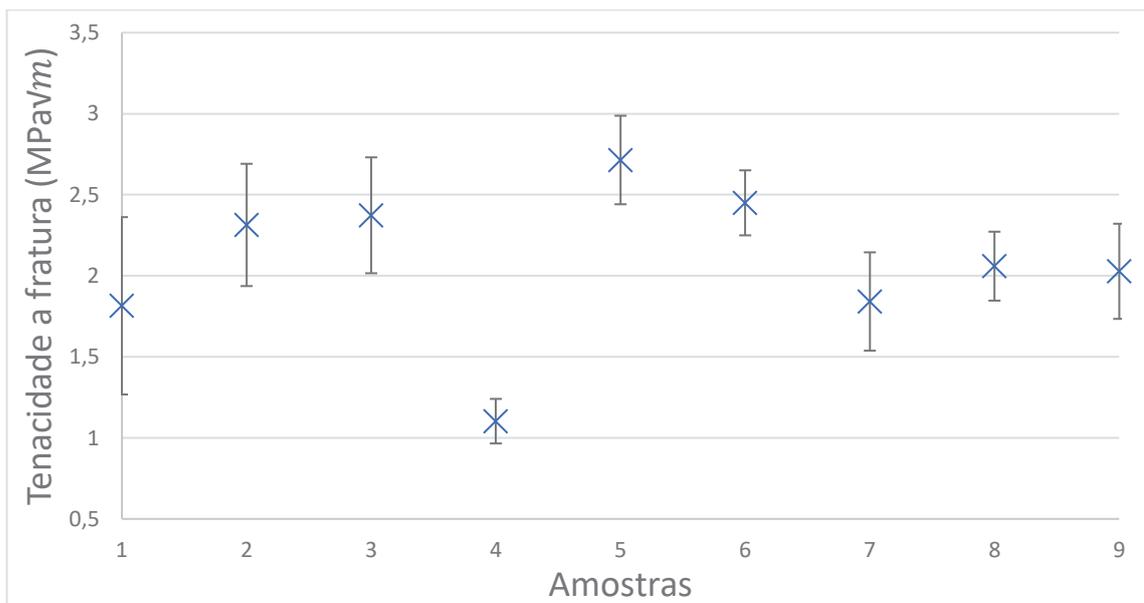
FONTE: A autora (2024).

O GRÁFICO 16 apresenta a microdureza média das amostras, estes valores apresentaram um desvio padrão elevado, devido a diferenças de dureza em diferentes localidades do próprio revestimento ocasionado devido a diferentes espessuras das amostras. Mas o que pode ser percebido é que a média das durezas se manteve similar, com valores entre 300 e 400 HV. Como mencionado anteriormente, os valores de microdureza definidos pelo fornecedor são de 320 a 390HV, definidos pela Oerlikon Metco. (“DSM-0269.2-Type 316L Austenitic Stainless Steel Powders”, 2022). Esse parâmetro está mais diretamente ligado às propriedades mecânicas do próprio material e não possui muita influência do processo de deposição.

GRÁFICO 16 - MICRODUREZA DAS AMOSTRAS (μm), PISTOLA PROPANO.

FONTE: A autora (2024).

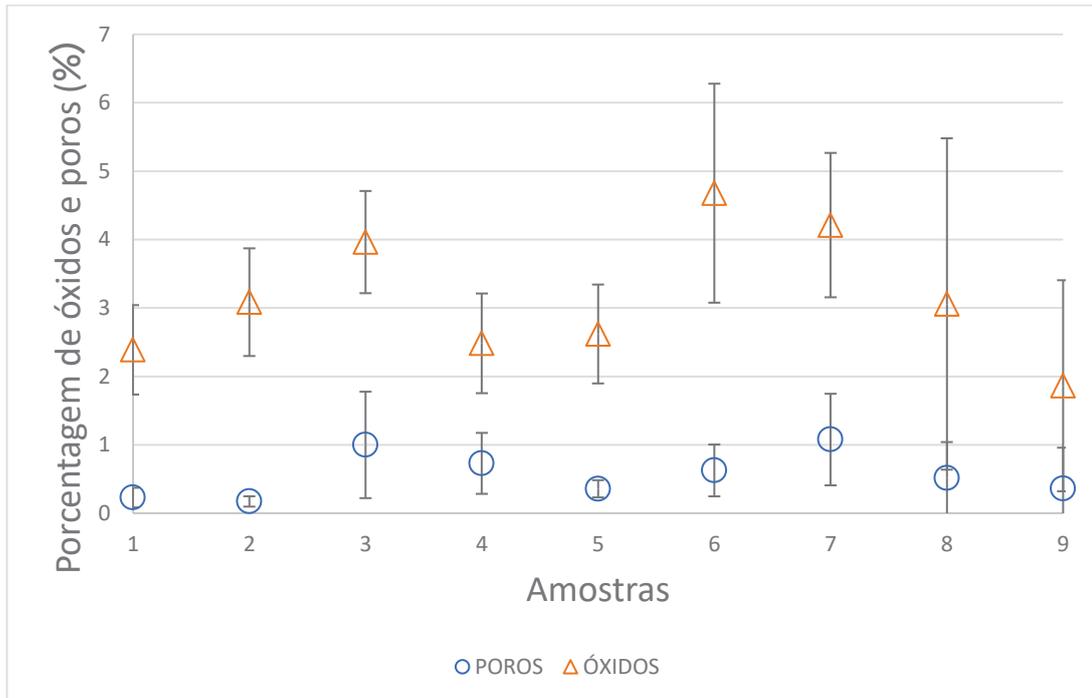
A tenacidade à fratura, GRÁFICO 17, dos revestimentos foi similar aos valores encontrados nos revestimentos de etanol, no entanto, é possível perceber uma discrepância as amostras 01 e 04, justamente as que apresentaram menor quantidade de passes de deposição e, conseqüentemente, menor espessura de camada.

GRÁFICO 17 - TENACIDADE A FRATURA ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$), PISTOLA PROPANO

FONTE: A autora (2024).

Quanto a porcentagem de óxidos e poros, é possível visualizar através do GRÁFICO 18 que os teores de óxidos variaram de 2 a 5%, aproximadamente. Enquanto a quantificação de poros variou de 0 a 1%.

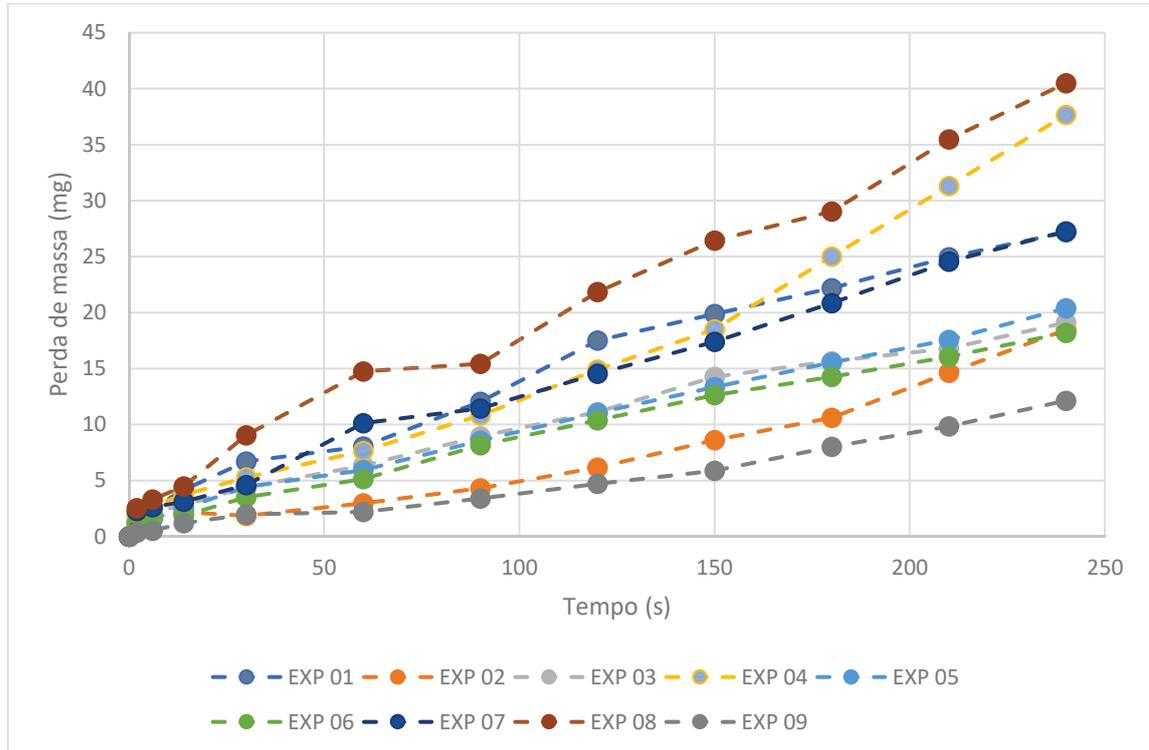
GRÁFICO 18 - PORCENTAGEM DE ÓXIDOS E POROS, PISTOLA PROPANO.



FONTE: A autora (2024).

Através do GRÁFICO 19 é possível analisar a perda de massa por cavitação ao longo do tempo para deposição utilizando a pistola de propano. No qual cada curva representa uma amostra. Assim, ao longo de 250 min, o maior valor de perda de massa obtido foi de 40 mg e o menor foi acima de 10 mg.

GRÁFICO 19 - CURVA RELATIVA À PERDA DE MASSA POR CAVITAÇÃO AO LONGO DO TEMPO, PARA CADA AMOSTRA



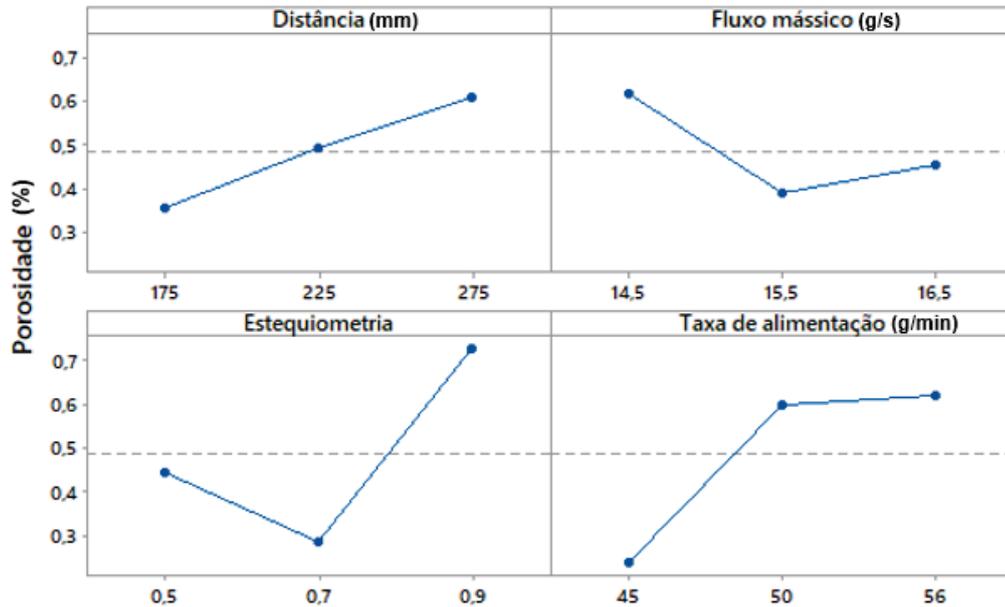
FONTE: A autora (2024).

4.3.2 Gráfico de efeitos principais

Através dos gráficos de efeitos principais, aliados com as análises estatísticas conduzidas pela análise de variância, ranqueamento de Taguchi e teste de Tukey foi possível estabelecer relações dos parâmetros utilizados com os resultados de caracterizações e ensaios dos revestimentos.

A porosidade foi identificada como relacionada a estequiometria da reação e taxa de alimentação do pó metálico, estes dados foram obtidos através da análise de variância (ANOVA) e o método de Taguchi. O GRÁFICO 20 evidencia que taxas de alimentação de pó mais altas também resultam em maior porosidade, possivelmente devido à dificuldade do sistema em transferir calor suficiente para uma fusão eficiente de um maior volume de partículas, fazendo com que as partículas não se deformem com facilidade. Em contraste, os gráficos relativos ao etanol demonstraram uma baixa influência desses parâmetros na porosidade, refletindo uma maior velocidade de deposição, gerando uma ancoragem com maior influência da energia cinética da partícula.

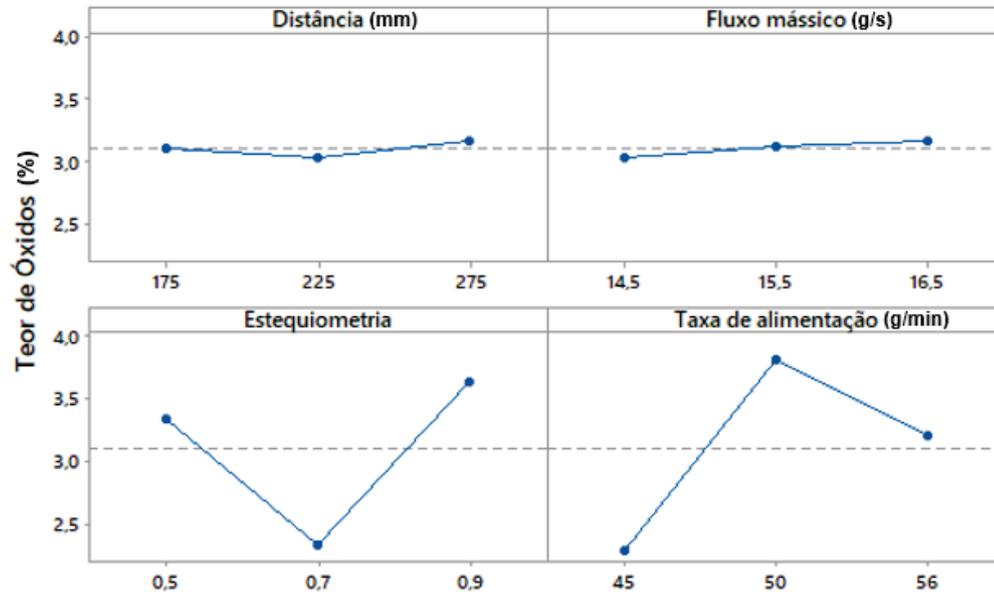
GRÁFICO 20 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À POROSIDADE, DEPOSITADO POR PROPANO.



FONTE: A autora (2024).

O teor de óxidos apresentou a taxa de alimentação e estequiometria como parâmetros de influência, e através do GRÁFICO 21 foi possível analisar que a estequiometria desempenhou papel crítico, pois com razões de oxigênio mais elevados promoveu-se uma maior oxidação do revestimento final. A alta taxa de alimentação de pó também aumentou o teor de óxidos, possivelmente devido ao excesso de material que dificultou o controle da combustão, já que a ignição da pistola ocorre na frente da pistola, após o pó ser misturado aos gases.

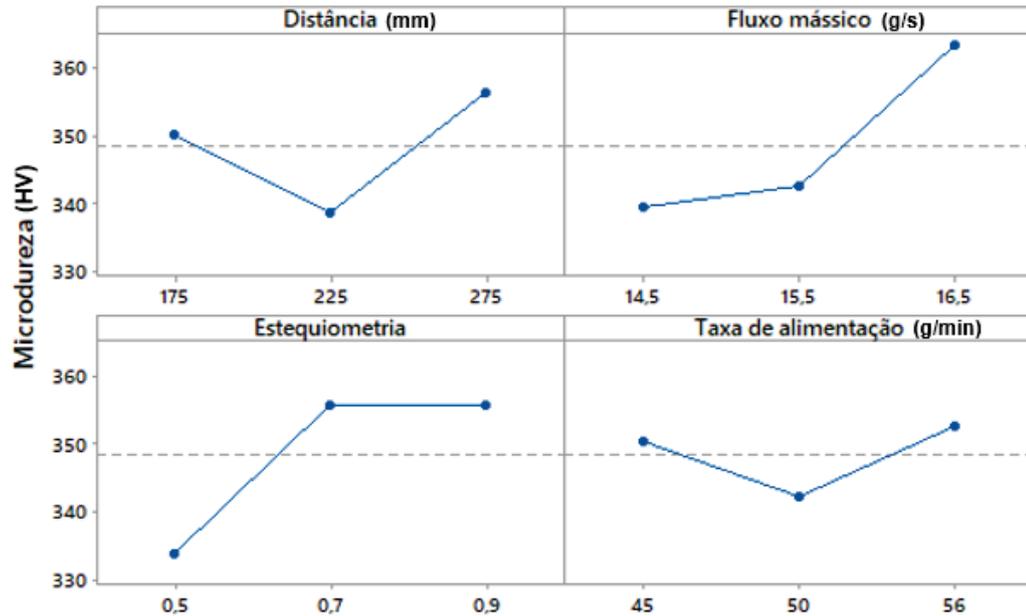
GRÁFICO 21 – EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO AO TEOR DE ÓXIDOS, DEPOSITADO POR PROPANO.



FONTE: A autora (2024).

Nos gráficos de efeitos principais para os revestimentos depositados com propano, a microdureza Vickers foi influenciada de maneira significativa pelo fluxo mássico da reação e pela estequiometria, com valores de p menores que 0,05 indicando relevância estatística. Observou-se que fluxos mássicos mais elevados resultaram em partículas com maior energia cinética, melhorando a deformação e a ancoragem no substrato, o que elevou a dureza do revestimento. Estequiometrias próximas ao valor ideal proporcionaram uma combustão completa, com transferência de calor suficiente para fundir as partículas, enquanto relações excessivamente ricas ou pobres em oxigênio reduziram a dureza devido a partículas mais rígidas, que não amoleceram devido à baixa temperatura, ou à formação de óxidos no revestimento.

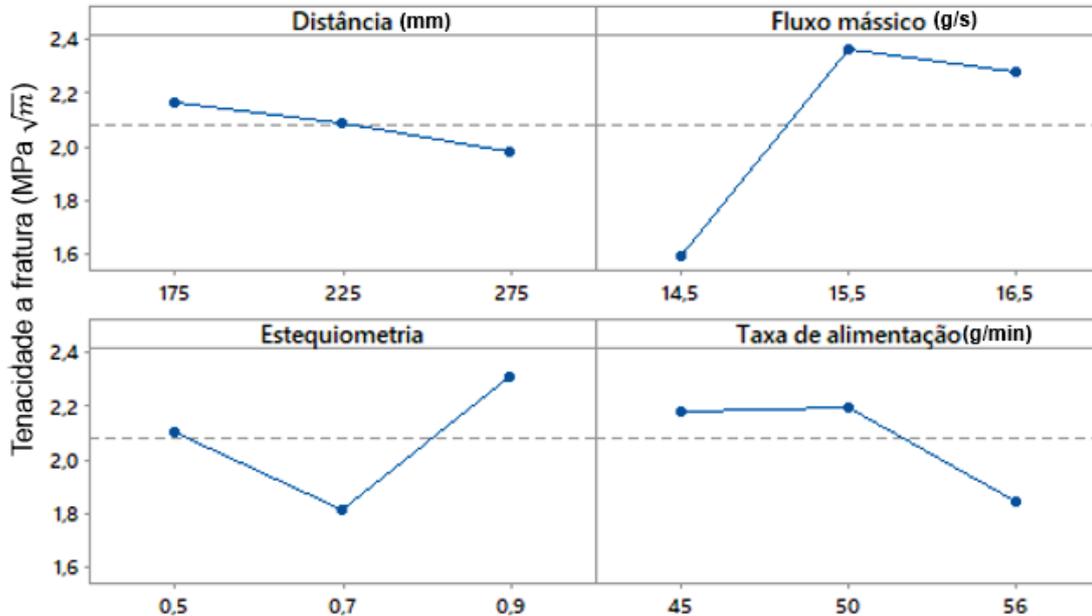
GRÁFICO 22 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À MICRODUREZA VICKERS, DEPOSITADO POR PROPANO.



FONTE: A autora (2024).

Através da análise do GRÁFICO 23 e itens no Apêndice 1, foi possível perceber que fluxos mássicos mais elevados contribuíram para revestimentos mais coesos e resistentes, devido à maior energia cinética das partículas, promovendo uma deformação mais uniforme e melhor ancoragem no substrato, elevando a tenacidade do revestimento. Já a estequiometria também apresentou um grau de significância, quando próxima do valor ideal, também favoreceu a tenacidade ao assegurar uma combustão completa, garantindo partículas amolecidas e reduzindo a formação de óxidos e poros.

GRÁFICO 23 – EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À TENACIDADE, DEPOSITADO POR PROPANO.

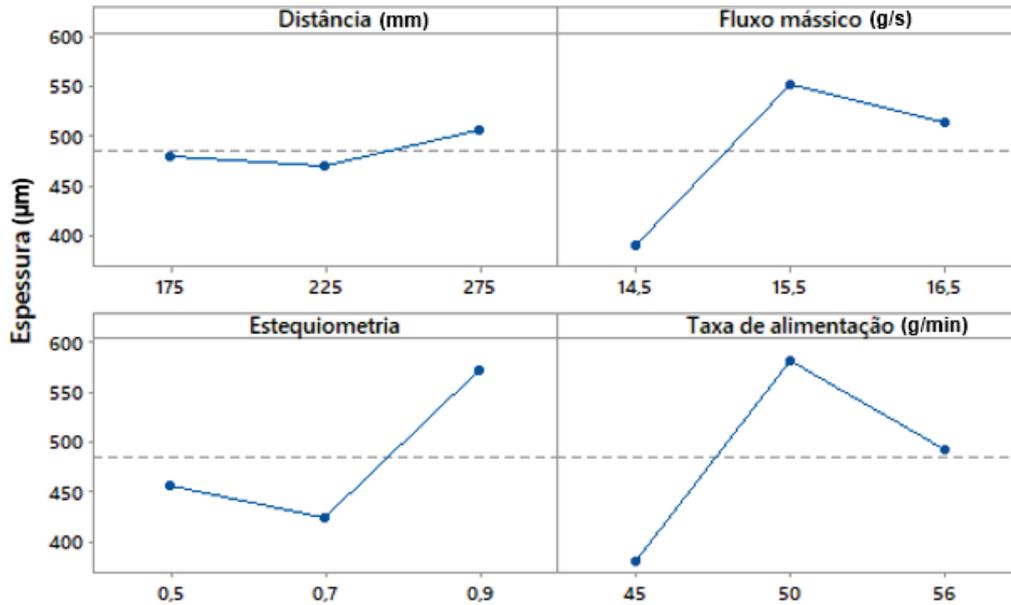


FONTE: A autora (2024).

A espessura dos revestimentos depositados com propano foi significativamente influenciada pela taxa de alimentação de pó, pelo fluxo mássico da reação, pela distância de deposição e pela estequiometria, com valores de p menores que 0,05 para todos esses fatores, conforme indicado nas análises estatísticas presentes no Apêndice e GRÁFICO 24. Taxas de alimentação mais altas resultaram em revestimentos mais espessos devido ao maior volume de material disponibilizado para deposição.

O fluxo mássico da reação também teve um impacto positivo na espessura, pois fluxos maiores aumentaram a energia cinética das partículas, favorecendo sua adesão ao substrato. A distância de deposição apresentou uma relação inversa com a espessura: distâncias maiores fazem com que haja uma certa perda de material em razão da área a ser depositada. Já a estequiometria próxima do ideal (1) garantiu uma combustão balanceada, otimizando a fusão e deposição das partículas, enquanto desvios dessa relação resultaram em revestimentos menos consistentes, com espessura irregular e potencialmente mais defeitos estruturais.

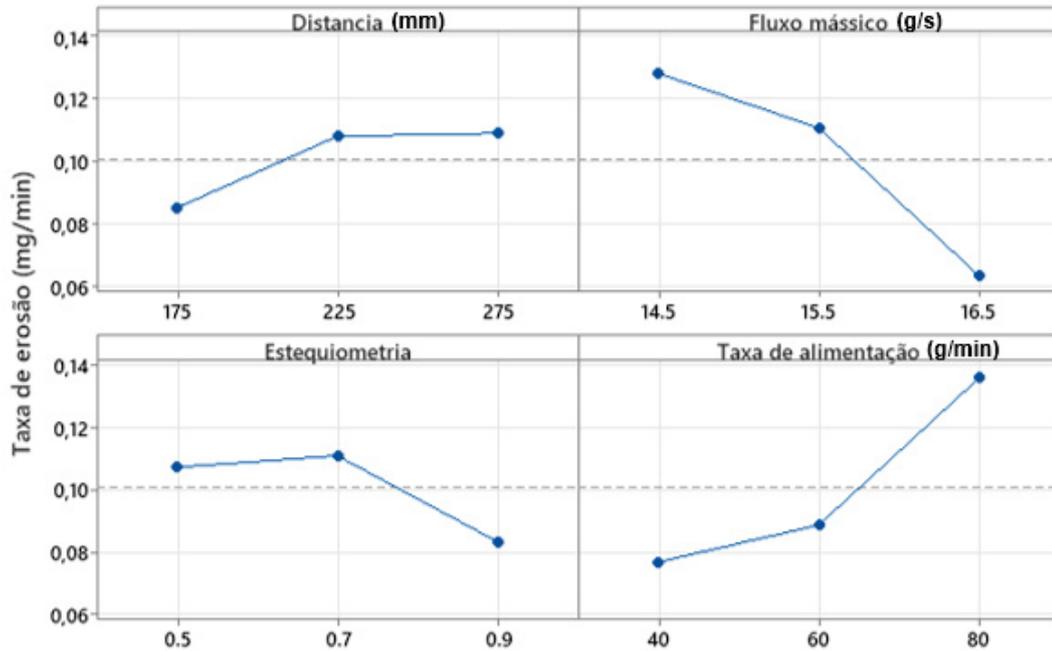
GRÁFICO 24 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À ESPESSURA, DEPOSITADO POR PROPANO.



FONTE: A autora (2024).

A taxa de erosão por cavitação nos revestimentos de propano foi altamente dependente do fluxo mássico da reação, conforme evidenciado pelos gráficos de efeitos principais. Fluxos mássicos elevados também contribuíram para uma maior resistência à cavitação, desde que associados a parâmetros otimizados de combustão e deposição.

GRÁFICO 25 - EFEITOS PRINCIPAIS PARA MÉDIAS EM RELAÇÃO À TAXA DE EROSÃO, DEPOSITADO POR PROPANO.

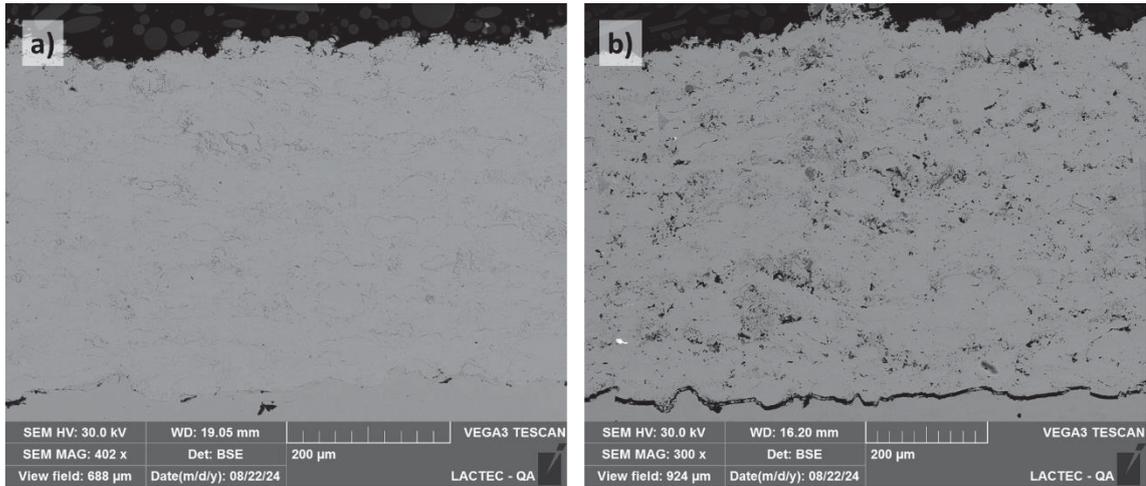


FONTE: A autora (2024).

4.3.3 Parâmetros otimizados

A FIGURA 24 apresenta a microestrutura da seção transversal dos revestimentos de 1003 depositados por HVOF Propano, sendo em (a) o melhor resultado, com parâmetros mais próximos do otimizado e (b) o resultado menos satisfatório

FIGURA 24 - MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO DE 1003 HVOF PROPANO. (A) EXP 09 MELHOR RESULTADO, (B) EXP 03 MENOS SATISFATÓRIO.



FONTE: A autora (2024).

O QUADRO 7 reúne todos os resultados estatísticos da otimização de parâmetros, auxiliando na tomada de decisão de quais níveis favorecem de forma geral a obtenção do melhor revestimento.

Nos subitens abaixo são apresentadas as análises estatísticas do planejamento experimental de Taguchi, com arranjo ortogonal L9.

QUADRO 7 – PARÂMETROS OTIMIZADOS

HVOF Propano	Distância	Fluxo mássico	Estequiometria	Taxa de alimentação
Porosidade	NS / 4 175 / 225/ 275	NS / 2 14,5/ 15,5 / 16,5	S / 3 0,5 / 0,7 / 0,9	S / 1 45 / 50 / 56
Óxidos	NS / 4 175 / 225 / 275	NS / 2 14,5 / 15,5 / 16,5	S / 1 0,5 / 0,7 / 0,9	S / 3 45 / 50 / 56
Microdureza	NS / 1 175/ 225 / 275	S / 3 44,5/ 15,5/ 16,5	S / 2 0,5 / 0,7 / 0,9	NS / 4 45 / 50 / 56
Espessura	S / 3 175/ 225/ 275	S / 2 44,5/ 15,5 / 16,5	S / 4 0,5 / 0,7 / 0,9	S / 1 45 / 50 / 56
Tenacidade	NS / 2 175 / 225/ 275	S / 4 44,5/ 15,5 / 16,5	S / 3 0,5 / 0,7 / 0,9	S / 1 45 / 50 / 56
Parâmetro otimizado	225 - 275	15,5	0,9	45

FONTE: A autora (2024).

Estes resultados mostram que pequenas variações de distância não afetam significativamente o resultado. É importante também salientar que o experimento otimizado resultante da análise estatística de Taguchi foi aspergido, e se refere ao experimento 05.

4.3.4 Comparação sugestão de parâmetros do fornecedor

Para material 316L de granulometria $-53\mu\text{m} +20\mu\text{m}$, utilizando uma pistola DJ2700®, foram sugeridos alguns parâmetros, apresentados no QUADRO 8.

Em relação aos resultados apresentados como otimizados através da análise estatística de Taguchi é possível notar que os dados foram similares quando comparamos a distância de deposição, fluxo mássico e a taxa de alimentação de pó otimizada também ficou dentro da faixa estabelecida como sugestão do fabricante. No entanto, um valor que apareceu bem destoante foi a estequiometria sugerida, ou seja, a razão de combustível e oxigênio ótima para os parâmetros estudados foram diferentes das sugeridas, mas o fluxo mássico total foi o mesmo.

QUADRO 8 - PARÂMETROS SUGERIDOS PELO FORNECEDOR

Parâmetros	Valores sugeridos
Distância de deposição	225 - 300
Fluxo de oxigênio	152 l/min
Fluxo de propano	72 l/min
Fluxo de gás inerte (Nitrogênio)	12,5 l/min
Fluxo de ar comprimido	399 l/min
Taxa de alimentação do pó	38 - 150 g/min
Estequiometria (calculada)	0,5
Fluxo mássico (calculado)	15 g/s

FONTE: A autora (2024).

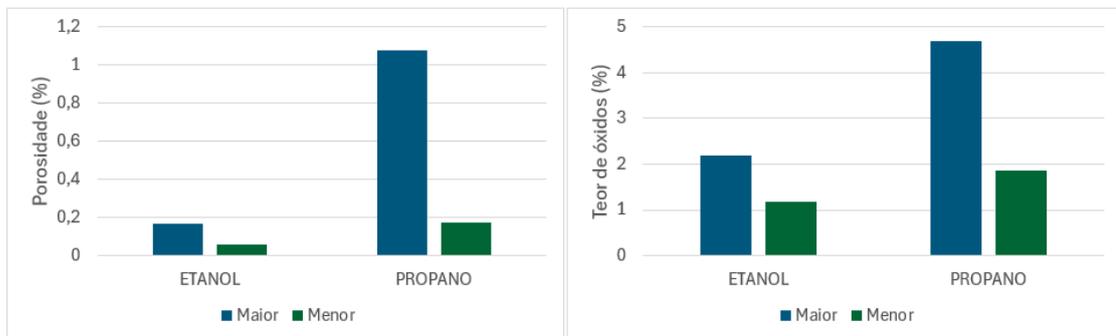
4.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE AMBOS OS PROCESSOS

Os resultados apresentados pelo **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, GRÁFICO 27 e GRÁFICO 28 permitem uma análise detalhada das diferenças entre os revestimentos depositados utilizando etanol e propano como combustíveis no processo HVOF. Essa análise considera os parâmetros avaliados, incluindo porosidade, teor de óxidos, microdureza, espessura, tenacidade e taxa de erosão por cavitação.

- Porosidade e Teor de Óxidos

Nos gráficos superiores, observa-se que os revestimentos depositados com propano apresentam uma porosidade significativamente maior em comparação ao etanol, atingindo valores superiores a 1%, enquanto o etanol mantém níveis próximos a 0,2%. Essa diferença reflete o impacto do controle da combustão: o etanol proporciona uma combustão com temperaturas reduzidas com alta velocidade, favorecendo a formação de revestimentos mais densos.

GRÁFICO 26 - COMPARAÇÃO PARÂMETROS POROSIDADE E TEOR DE ÓXIDOS DE HVOF POR ETANOL E PROPANO



FONTE: A autora (2024).

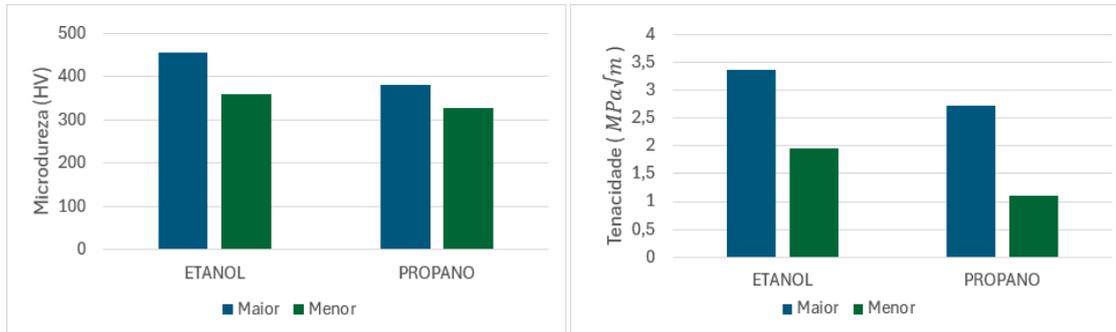
- Microdureza

No parâmetro de microdureza, os revestimentos de etanol apresentam valores consistentemente superiores aos de propano, com média acima de 450 HV. Esse resultado está diretamente ligado à menor porosidade e ao menor teor de óxidos, que contribuem para a coesão estrutural do revestimento. Por outro lado, o propano, apesar de fornecer revestimentos com microdureza significativa, atinge valores inferiores, mostrando-se mais suscetível a imperfeições estruturais que afetam a dureza.

- Tenacidade à Fratura

A tenacidade à fratura foi maior para os revestimentos depositados com etanol, como evidenciado nos gráficos. Essa superioridade está associada à menor porosidade e maior uniformidade estrutural. Revestimentos com propano, embora mais espessos, apresentaram menor resistência à propagação de trincas devido à presença de maiores índices de defeitos estruturais, como inclusões de óxidos e porosidade.

GRÁFICO 27 - COMPARAÇÃO PARÂMETROS MICROUREZA E TENACIDADE DE HVOF POR ETANOL E PROPANO



FONTE: A autora (2024).

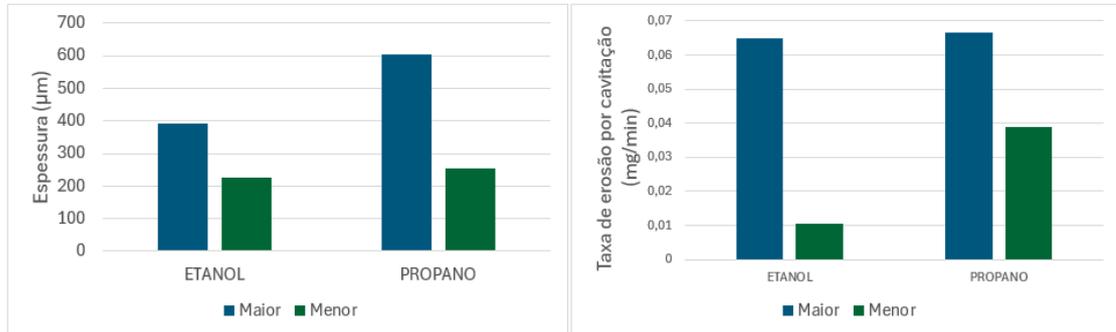
- Espessura

Os gráficos também destacam que os revestimentos de propano possuem espessura significativamente maior, com valores médios acima de 600 μm , enquanto o etanol atinge cerca de 400 μm . Essa maior espessura pode ser atribuída ao aquecimento das partículas, de forma que os revestimentos de etanol se aqueçam menos, especialmente as partículas maiores. Com base nessa observação, proponho que ocorra o processo de peening, onde as partículas recuariam, ao invés de se ancorarem mecanicamente, como tradicionalmente esperado. No entanto, esta hipótese ainda carece de validação experimental, uma vez que são necessários estudos mais detalhados para confirmar essa dinâmica. A necessidade de experimentos adicionais e a utilização de tecnologias mais avançadas para medir com precisão esses comportamentos tornam-se cruciais para validar ou refutar essa teoria.

- Taxa de Erosão por Cavitação

A taxa de erosão por cavitação foi consideravelmente menor nos revestimentos de etanol, conforme indicado nos gráficos comparativos. Isso se deve à combinação de menor porosidade, menor teor de óxidos e maior dureza, que proporcionam maior resistência ao desgaste. Os revestimentos de propano apresentaram maior taxa de erosão, indicando maior suscetibilidade à degradação sob condições de cavitação, mesmo com sua maior espessura.

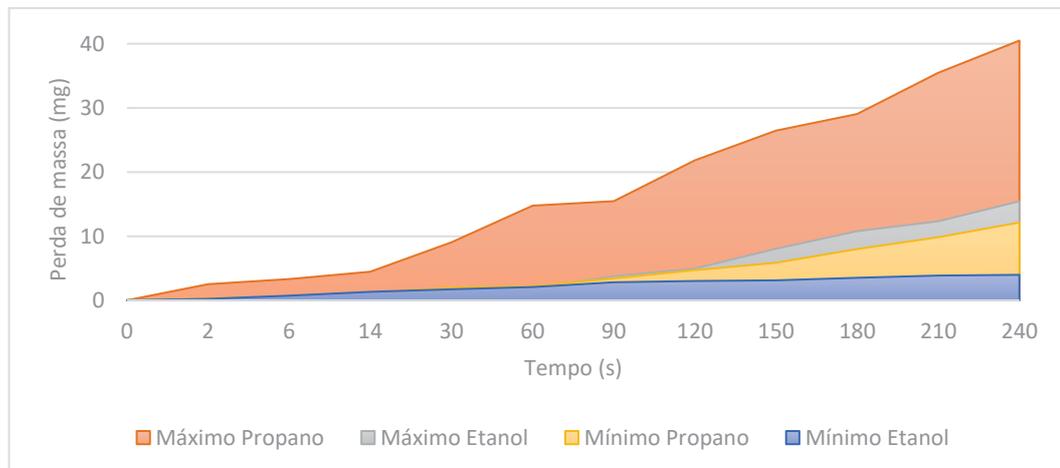
GRÁFICO 28 - COMPARAÇÃO PARÂMETROS ESPESSURA E CAVITAÇÃO DE HVOF POR ETANOL E PROPANO



FONTE: A autora (2024).

O GRÁFICO 29 apresenta a perda de massa por cavitação com limites máximos e mínimos. No qual os revestimentos depositados com propano apresentam uma maior variação nos valores de perda de massa, indicando menor estabilidade no comportamento do revestimento sob condições de cavitação. Por outro lado, os revestimentos obtidos com etanol exibem um intervalo mais estreito entre os limites máximo e mínimo, evidenciando maior consistência e repetibilidade no processo de deposição, bem como um desempenho mais uniforme contra a cavitação. Essa diferença reflete a maior densidade e qualidade estrutural dos revestimentos de etanol, enquanto os de propano são mais suscetíveis à presença de defeitos que impactam sua resistência ao desgaste erosivo.

GRÁFICO 29 – COMPARAÇÃO DE PERDA DE MASSA POR CAVITAÇÃO DE HVOF ETANOL E PROPANO



FONTE: A autora (2024).

Em conclusão, o processo com etanol destacou-se na qualidade estrutural e resistência mecânica dos revestimentos, sendo ideal para aplicações que demandam alta durabilidade e resistência à cavitação. Já o propano, apesar de proporcionar maior espessura, é mais suscetível a defeitos estruturais e desgaste erosivo, sendo mais adequado para aplicações que priorizam o volume de deposição sobre a densidade e uniformidade do revestimento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo desenvolvido analisou a influência dos combustíveis etanol e propano nos revestimentos de aço inoxidável austenítico 316L produzidos pelo processo de aspersão térmica HVOF, utilizando a janela de deposição de modo a comparar estequiometrias e fluxos mássicos para diferentes combustíveis de pistolas de HVOF.

Foram analisados os parâmetros dos revestimentos obtidos, considerando porosidade, teor de óxidos, microdureza, espessura, tenacidade à fratura e resistência à erosão por cavitação. A velocidade das partículas para pistola de etanol é maior que as partículas aceleradas pela pistola de propano, acarretando uma densidade maior do revestimento, com menor teor de poros e óxidos, elevando também a microdureza e tenacidade à fratura.

O fluxo mássico da combustão também apresentou um impacto significativo nas características dos revestimentos, de modo que com um fluxo mássico elevado é possível obter maior pressão interna na câmara de combustão, elevando a velocidade das partículas.

A espessura dos revestimentos também está ligada diretamente à taxa de alimentação do pó metálico. Assim como a distância de deposição também influencia diretamente nessa espessura.

Os revestimentos produzidos com etanol destacaram-se pela menor porosidade, podendo chegar a 0,2% em relação a 1% para pistola de propano e menor teor de óxidos, podendo chegar a 2% em relação aos 4,5% de propano, resultando em maior dureza (450 em relação a 400HV), tenacidade (3,5 em relação a 2,5 MPa√m), e resistência à erosão por cavitação (0,01mg/min comparado a 0,04mg/min), mesmo com espessuras mais finas. Assim, o etanol mostrou-se mais adequado para aplicações que exigem alta resistência mecânica, uniformidade e durabilidade em condições severas de operação.

Por outro lado, os revestimentos obtidos com propano apresentaram maior espessura, o que pode ser vantajoso em aplicações que priorizam proteção volumétrica, como barreiras contra desgaste superficial em ambientes menos críticos. No entanto, a maior porosidade e o elevado teor de óxidos observados comprometem sua resistência mecânica e à cavitação. Esses resultados indicam que, para

maximizar o desempenho do revestimento com propano, ajustes nos parâmetros de deposição, como estequiometria, taxa de alimentação e fluxo mássico, são cruciais.

Outro ponto relevante foi o uso da metodologia de Taguchi, que se mostrou eficaz para otimizar os parâmetros de deposição e reduzir a variabilidade dos resultados. Essa abordagem facilitou a identificação dos fatores críticos que impactam a qualidade dos revestimentos, como a estequiometria e o fluxo mássico, fornecendo uma base para futuras aplicações e estudos.

Portanto, a escolha entre etanol e propano como combustível no processo HVOF deve ser feita com base nas demandas específicas da aplicação. O etanol é recomendado para aplicações que exigem revestimentos de alta qualidade estrutural e resistência a desgaste, enquanto o propano pode ser mais econômico e eficiente em aplicações que priorizam maior espessura e volume de material. Essa pesquisa contribui para o avanço do entendimento das influências dos combustíveis na qualidade de revestimentos e destaca a importância do controle rigoroso dos parâmetros de processo para atingir propriedades otimizadas.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudo comparativo de efeito dos parâmetros na resposta do revestimento, utilizando uma pistola à querosene.
- Inclusão de análise da corrosão para variação dos parâmetros e a influência das diferentes tecnologias de pistolas em relação a esse fenômeno.
- Relação das diferentes pistolas com as partículas em voo, através de um equipamento tipo DPV, podendo compreender a relação da cinética e térmica das partículas e sua influência nos resultados encontrados nos revestimentos.
- Análise de deposição utilizando pistola de querosene, considerando as altas temperaturas resultantes da combustão, verificar possibilidade de difusão de carbono no inox através de DRX.

REFERÊNCIAS

AMARENDRA, H. J. *et al.* Combined Slurry and Cavitation Erosion Resistance of HVOF Thermal Spray Coated Stainless Steel. 2017, [S.l.: s.n.], 2017. p. 465–470. Disponível em: <www.sciencedirect.com/www.materialstoday.com/proceedings>.

AMERICAN WELDING SOCIETY INC. *Thermal Spraying - Practice, Theory and Application*. Miami, Florida: [s.n.], 1985.

ANEEL. *Primeiro semestre de 2023 tem crescimento de 5,1 GW na matriz elétrica brasileira*. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/primeiro-semester-de-2023-tem-crescimento-de-5-1-gw-na-matriz-eletrica-brasileira>>. Acesso em: 30 jul. 2023.

ASTM E384-22. *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. . [S.l.: s.n.], 2022

ASTM E1920-03. *Standard Guide for Metallographic Preparation of Thermal Sprayed Coatings*. . [S.l.: s.n.], 2021

ASTM E2109-01. *Standard Test Methods for Determining Area Percentage Porosity in Thermal Sprayed Coatings*. . [S.l.: s.n.], 2021

ASTM G32-16E1. *Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus*. . [S.l.: s.n.], 2021

Aviation Fuels: Technical Review. [S.l.]: Chevron Products Company, 2007.

AYLI, E. Cavitation in hydraulic turbines. *International Journal of Heat and Technology*, v. 37, n. 1, p. 334–344, 1 mar. 2019.

BABU, A. *et al.* Microwave synthesized composite claddings with enhanced cavitation erosion resistance. *Wear*, v. 422–423, p. 242–251, 15 mar. 2019.

BECKER, A. *Resistência à cavitação e erosão por jato de lama de revestimentos binários de WC/ Cr3C2 depositados por chama de alta velocidade*. 2021. 123 f. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2021.

BRENNEN, C. E. (CHRISTOPHER E. *Fundamentals of multiphase flow*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.

BRIJKISHORE; KHARE, R.; PRASAD, V. *Prediction of cavitation and its mitigation techniques in hydraulic turbines - A review. Ocean Engineering*. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 1 fev. 2021

CAI, S. Q. Cavitation occurring in capillary tubes. *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, v. 383, n. 6, p. 509–513, 28 jan. 2019.

CALLISTER, W. D. JR.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução*. 10. ed. [S.l.: s.n.], 2020.

CORTÉS P. R. *Estudo de revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspersão térmica para a proteção do aço contra a corrosão marinha*. 1998. 1998.

DEMIREL, G. *et al.* Experimental Determination of Cavitation Characteristics of Hydraulic Turbines. 2015, [S.l.: s.n.], 2015.

DING, Z. X.; CHEN, W.; WANG, Q. Resistance of cavitation erosion of multimodal WC-12Co coatings sprayed by HVOF. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, v. 21, n. 10, p. 2231–2236, out. 2011.

DSM-0269.2-Type 316L Austenitic Stainless Steel Powders. . [S.l.: s.n.], 2022.

ESCALER, X. *et al.* Detection of cavitation in hydraulic turbines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 20, n. 4, p. 983–1007, maio 2006.

ESPITIA, L. A.; TORO, A. Cavitation resistance, microstructure and surface topography of materials used for hydraulic components. *Tribology International*, v. 43, n. 11, p. 2037–2045, nov. 2010.

EVANS, A. G.; WILSHAW, T. R. QUASI-STATIC SOLID PARTICLE DAMAGE IN BRITTLE SOLIDS-I. OBSERVATIONS, ANALYSIS AND IMPLICATIONS. 1976.

FAUCHAIS, P. L.; HEBERLEIN, J. V. R.; BOULOS, M. I. *Thermal Spray Fundamentals*. [S.l.: s.n.], 2014.

FST. *e-Gun HVOF ethanol*. . [S.l.: s.n.], 2005

FST. *JP-5000 HVOF kerosene*. . [S.l.: s.n.], 2016

FUKANUMA, H. *et al.* In-flight particle velocity measurements with DPV-2000 in cold spray. *Surface and Coatings Technology*, v. 201, n. 5, p. 1935–1941, 25 out. 2006.

Global Energy Review 2021 – Analysis - IEA. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>>. Acesso em: 6 ago. 2023.

GREWAL, H. S.; AGRAWAL, A.; SINGH, H. Slurry erosion performance of Ni-Al₂O₃ based composite coatings. *Tribology International*, v. 66, p. 296–306, 2013.

KAMNIS, S.; GU, S. Numerical modelling of propane combustion in a high velocity oxygen-fuel thermal spray gun. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 45, n. 4, p. 246–253, abr. 2006.

KOU, S. *WELDING METALLURGY SECOND EDITION*. [S.l: s.n.], 2003. Disponível em: www.copyright.com>.

LANCASTER, J. F. Metallurgy of Welding. *Metallurgy of Welding*. [S.l.]: Elsevier, 1999. p. 1–39.

LIU, S. *et al.* Effect of stoichiometry conditions on the erosion and sliding wear behaviors of Cr₃C₂-NiCr coatings deposited by a novel ethanol-fueled HVOF process. *Surface and Coatings Technology*, v. 454, 15 fev. 2023.

LIU, S. *et al.* Novel liquid fuel HVOF torches fueled with ethanol: Relationships between in-flight particle characteristics and properties of WC-10Co-4Cr coatings. *Surface and Coatings Technology*, v. 408, 25 fev. 2021.

LIU, S. *Optimization and Improvement of a Novel HVOF Process Fueled with Ethanol*. 2022. 2022.

MARTIN, P. M. *Deposition technologies for films and coatings*. [S.l: s.n.], 2005.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. 4. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2002.

MOTYCAK, L.; SKOTAK, A.; KUPCIK, R. Kaplan turbine tip vortex cavitation-analysis and prevention. 2012, [S.l: s.n.], 2012.

OERLIKON METCO. *DSM-0269.2-Type 316L Austenitic Stainless Steel Powders*. [S.l: s.n.], 2022.

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, 2015.

PALANISAMY, K.; GANGOLU, S.; MANGALAM ANTONY, J. Effects of HVOF spray parameters on porosity and hardness of 316L SS coated Mg AZ80 alloy. *Surface and Coatings Technology*, v. 448, p. 128898, out. 2022.

PAWŁOWSKI, LECH. *The science and engineering of thermal spray coatings*. [S.l.]: Wiley, 2008.

PUKASIEWICZ, A. G. M. *Desenvolvimento de revestimentos de Fe-Mn-Cr-Si-Ni resistentes à cavitação depositadas por aspersão ASP*. 2008. 1–192 f. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

QIAO, L. *et al.* Influence of annealing on microstructure and cavitation erosion resistance of iron-based metallic glass coatings synthesized by HVOF thermal spraying. *Intermetallics*, v. 161, 1 out. 2023.

RICHMAN, R. H.; MCNAUGHTON, W. P. *Correlation of cavitation erosion behavior with mechanical properties of metals*. *Wear*. [S.l.: s.n.], 1990.

RUSCH, W. *Comparison of Operating Characteristics for Gas and Liquid Fuel HVOF Torches*. *Combustion*. [S.l.: s.n.], 2007

SILVA, S. A. *et al.* Influence on the use of kerosene and propane as fuels on characteristics of in-flight particles deposited by thermal spray HVOF. 2025, [S.l.]: ABCM, 2025.

SILVEIRA, L. L. *Resistência à corrosão e cavitação de revestimentos FeMnCrSi depositados por processos de aspersão térmica de alta velocidade*. 2018. Technological University of Parana, Ponta Grossa, 2018.

SREEDHAR, B. K.; ALBERT, S. K.; PANDIT, A. B. Improving cavitation erosion resistance of austenitic stainless steel in liquid sodium by hardfacing - comparison of Ni and Co based deposits. *Wear*, v. 342–343, p. 92–99, 15 nov. 2015.

SUCHARSKI, G. B. *Estudo da erosão por cavitação sobre diferentes morfologias de revestimentos de FeMnCrSiB aplicados por aspersão térmica chama FS e HVOF com tratamento de shot peening*. 2016. 148 f. 2016.

SUCHARSKI, G. B. *UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ*. [S.l: s.n.], [S.d.].

SUDAPRASERT, T.; SHIPWAY, P. H.; MCCARTNEY, D. G. Sliding wear behaviour of HVOF sprayed WC-Co coatings deposited with both gas-fuelled and liquid-fuelled systems. *Wear*, v. 255, n. 7–12, p. 943–949, 2003.

SUN, B.; FUKANUMA, H.; OHNO, N. Study on stainless steel 316L coatings sprayed by a novel high pressure HVOF. *Surface and Coatings Technology*, v. 239, p. 58–64, 25 jan. 2014.

TAILLON, G. *et al.* Cavitation erosion mechanisms in stainless steels and in composite metal–ceramic HVOF coatings. *Wear*, v. 364–365, p. 201–210, 15 out. 2016.

THAKUR, L.; VASUDEV, H. *Thermal Spray Coatings*. [S.l: s.n.], 2022.

TÔN-THẬT, L. Experimental comparison of cavitation erosion rates of different steels used in hydraulic turbines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 12, p. 012052, 1 ago. 2010.

WANG, Y. *et al.* Effects of microstructure and mechanical properties on cavitation erosion resistance of NiCrWMoCuCBFe coatings. *Applied Surface Science*, v. 547, 1 maio 2021.

What is valve cavitation? Disponível em: <<https://www.slurryflo.com/cavitation>>. Acesso em: 4 set. 2023.

XU, R. *et al.* A global-scale framework for hydropower development incorporating strict environmental constraints. *Nature Water*, v. 1, n. 1, p. 113–122, 16 jan. 2023.

YUPING, W. *et al.* Cavitation erosion characteristics of a Fe-Cr-Si-B-Mn coating fabricated by high velocity oxy-fuel (HVOF) thermal spray. *Materials Letters*, v. 61, n. 8–9, p. 1867–1872, abr. 2007.

APÊNDICE 1 – ANÁLISE ESTATÍSTICA

- ETANOL
 - ANOVA

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Distância	2	0.010874	0.005437	2.06	0.157
Fluxo mássico	2	0.019430	0.009715	3.67	0.046
Estequiometria	2	0.002541	0.001270	0.48	0.626
Taxa de alimentação	2	0.012541	0.006270	2.37	0.122
Erro	18	0.047600	0.002644		
Total	26	0.092985			

Quadro da ANOVA depositado por etanol – POROSIDADE.

Valor-P<5% (0.05) - Somente fluxo mássico exerce influência significativa sobre os resultados de porosidade.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Distância	2	2.3558	1.17788	3.11	0.069
Fluxo mássico	2	1.5772	0.78858	2.08	0.154
Estequiometria	2	0.0501	0.02507	0.07	0.936
Taxa de alimentação	2	0.2518	0.12591	0.33	0.722
Erro	18	6.8215	0.37897		
Total	26	11.0564			

Quadro da ANOVA depositado por etanol -ÓXIDOS.

Valor-P<5% (0.05) - Nenhum fator exerce influência significativa sobre os resultados de fração de óxidos.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Distância	2	6022.4	3011.2	3.63	0.047
Fluxo mássico	2	335.8	167.9	0.20	0.818
Estequiometria	2	573.4	286.7	0.35	0.712
Taxa de alimentação	2	1161.2	580.6	0.70	0.509
Erro	18	14921.0	828.9		
Total	26	23013.9			

Quadro da ANOVA depositado por etanol -MICRODUREZA VICKERS.

Valor-P<5% (0.05) - Somente a distância exerce influência significativa sobre os resultados de microdureza.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Distância	2	501	250,3	1,01	0,377
Fluxo mássico	2	510	255,2	1,03	0,370
Estequiometria	2	2298	1149,0	4,65	0,018
Taxa de alimentação	2	134675	67337,5	272,51	0,000
Erro	27	6672	247,1		
Total	35	144656			

Quadro da ANOVA depositado por etanol -ESPESSURA.

Valor-P<5% (0.05) - Estequiometria e Taxa de alimentação exercem influência significativa sobre os resultados de espessura.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Distância	2	0,1174	0,05869	0,04	0,960
Fluxo mássico	2	0,8592	0,42961	0,30	0,745
Estequiometria	2	1,1521	0,57604	0,40	0,675
Taxa de alimentação	2	1,2380	0,61899	0,43	0,656
Erro	18	25,8425	1,43569		
Total	26	29,2092			

Quadro da ANOVA depositado por etanol -TENACIDADE.

Valor-P<5% (0.05) - Nenhum fator exerce influência significativa sobre os resultados de tenacidade.

○ RANQUEAMENTO

Nível	Distância	Fluxo mássico	Estequiometria	Taxa de alimentação
1	0.09222	0.05778	0.07556	0.10222
2	0.11222	0.12333	0.09556	0.10667
3	0.06333	0.08667	0.09667	0.05889
Delta	0.04889	0.06556	0.02111	0.04778
Atribuir postos	2	1	4	3

Ranqueamento do revestimento depositado com etanol – POROSIDADE.

Nível	Distância	Fluxo mássico	Estequiometria	Taxa de alimentação
1	1.876	2.152	1.786	1.836
2	2.156	1.738	1.800	1.699
3	1.438	1.579	1.883	1.934
Delta	0.718	0.573	0.098	0.236
Atribuir postos	1	2	4	3

Ranqueamento do revestimento depositado com etanol – ÓXIDOS.

Nível	Distância	Fluxo mássico	Estequiometria	Taxa de alimentação
1	394.6	407.0	405.2	416.0
2	407.9	410.6	416.5	401.8
3	430.7	415.6	411.5	415.4
Delta	36.2	8.6	11.3	14.2
Atribuir postos	1	4	3	2

Ranqueamento do revestimento depositado com etanol -MICRODUREZA VICKERS.

Nível	Distância	Fluxo mássico	Estequiometria	Taxa de alimentação
1	308,4	310,9	295,2	231,7
2	309,6	306,5	310,8	306,0
3	301,2	301,7	313,2	381,5
Delta	8,4	9,2	18,0	149,8
Atribuir postos	4	3	2	1

Ranqueamento do revestimento depositado com etanol -ESPESSURA.

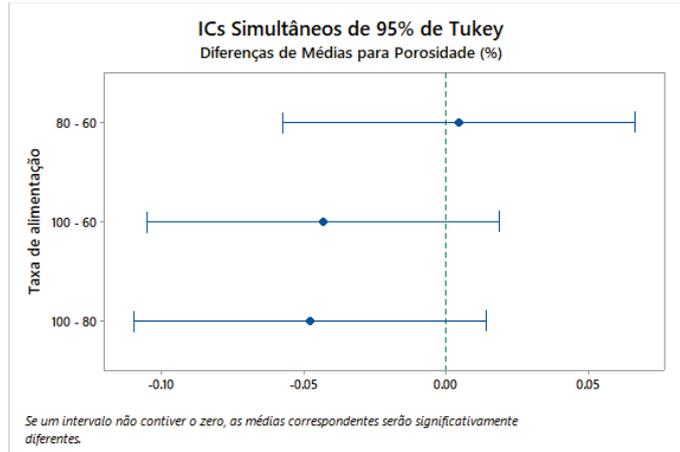
Nível	Distância	Fluxo mássico	Estequiometria	Taxa de alimentação
1	2,529	2,863	2,908	2,908
2	2,640	2,549	2,503	2,549
3	2,686	2,443	2,443	2,398
Delta	0,157	0,420	0,465	0,510
Atribuir postos	4	3	2	1

Ranqueamento do revestimento depositado com etanol -TENACIDADE.

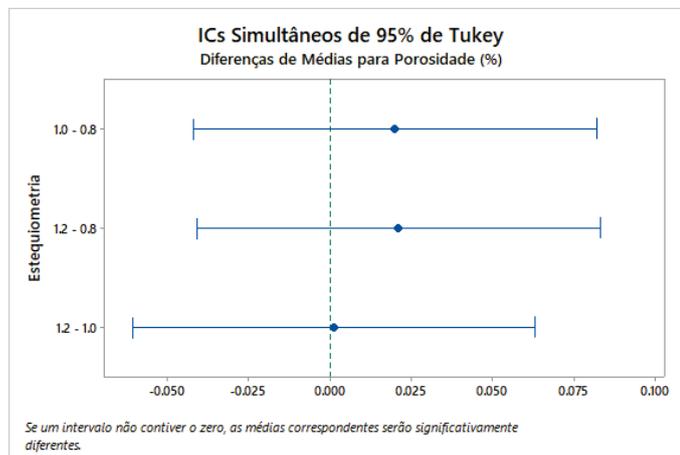
Nível	Distância	Fluxo mássico	Estequiometria	Taxa de alimentação
1	0.02627	0.03390	0.01613	0.02830
2	0.02330	0.03030	0.02167	0.03537
3	0.03333	0.01870	0.04510	0.01923
Delta	0.01003	0.01520	0.02897	0.01613
Atribuir postos	4	3	1	2

Ranqueamento do revestimento depositado com etanol -TAXA DE EROÇÃO POR CAVITAÇÃO.

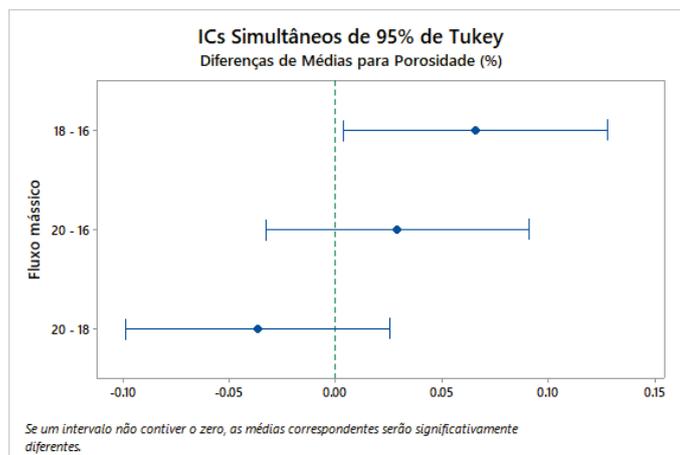
- COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE TUKEY



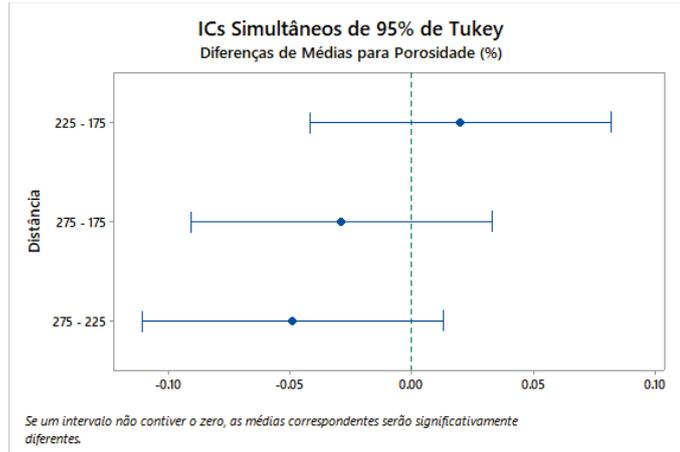
Teste de comparação de médias de Tukey para taxa de alimentação – POROSIDADE.



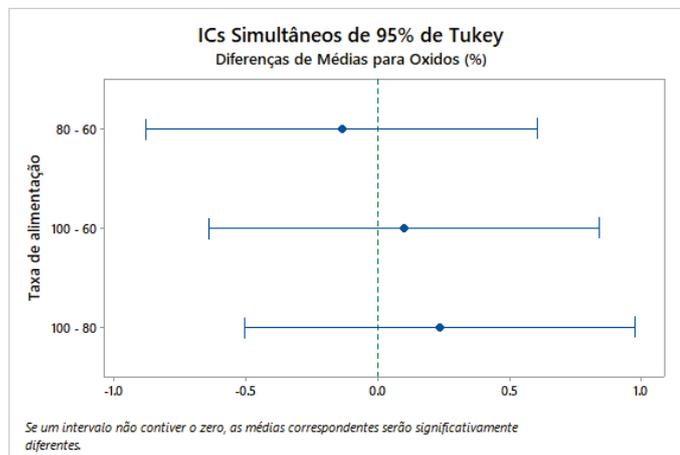
Teste de comparação de médias de Tukey para estequiometria – POROSIDADE.



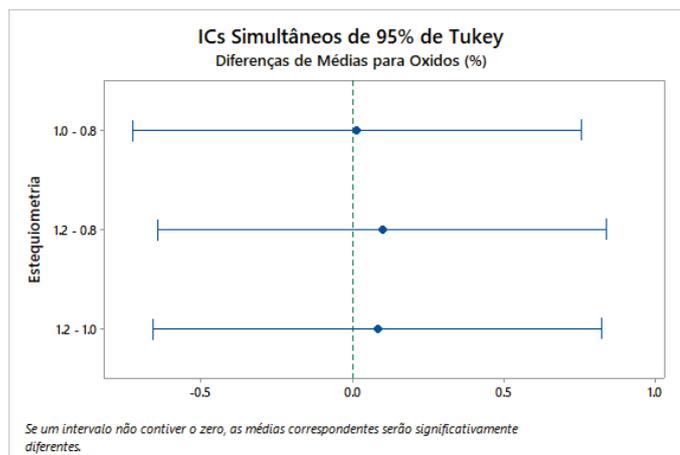
Teste de comparação de médias de Tukey para fluxo mássico – POROSIDADE.



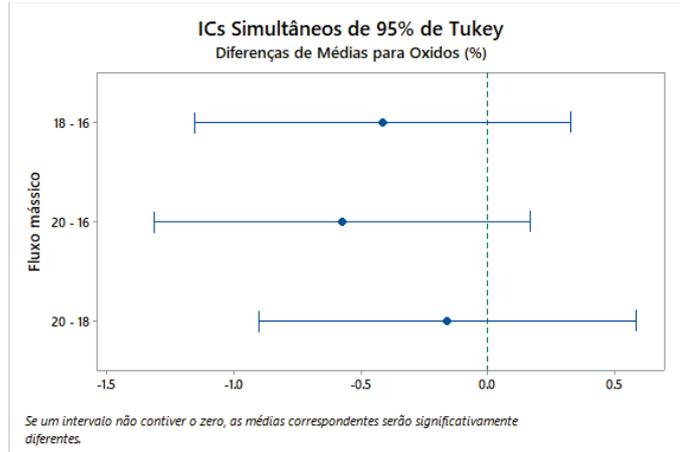
Teste de comparação de médias de Tukey para distância – POROSIDADE.



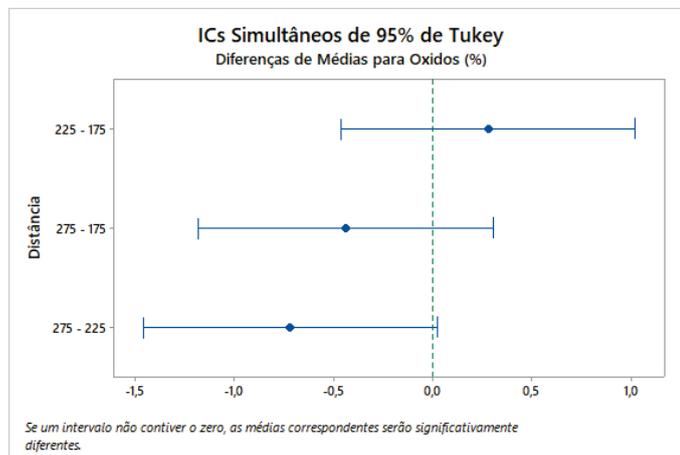
Teste de comparação de médias de Tukey para taxa de alimentação – ÓXIDOS.



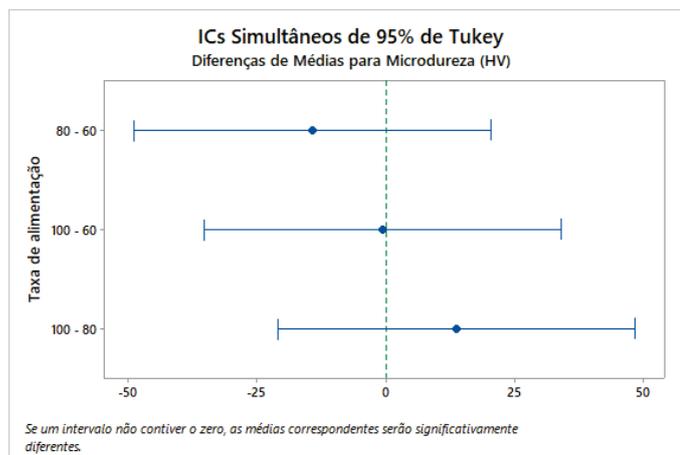
Teste de comparação de médias de Tukey para estequiometria – ÓXIDOS.



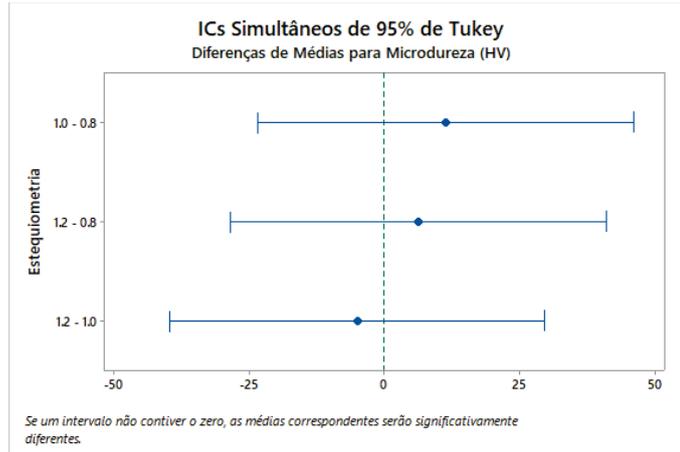
Teste de comparação de médias de Tukey para fluxo mássico – ÓXIDOS.



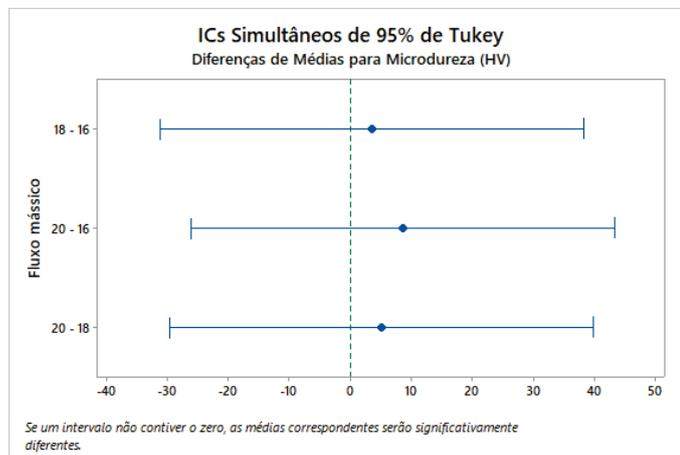
Teste de comparação de médias de Tukey para distância – ÓXIDOS.



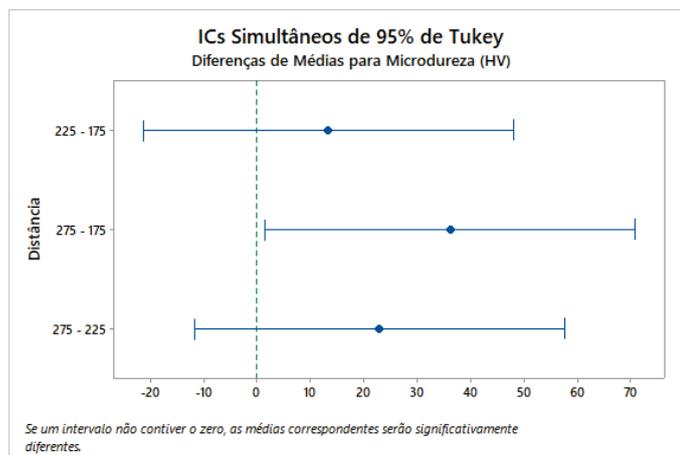
Teste de comparação de médias de Tukey para taxa de alimentação – MICRODUREZA VICKERS.



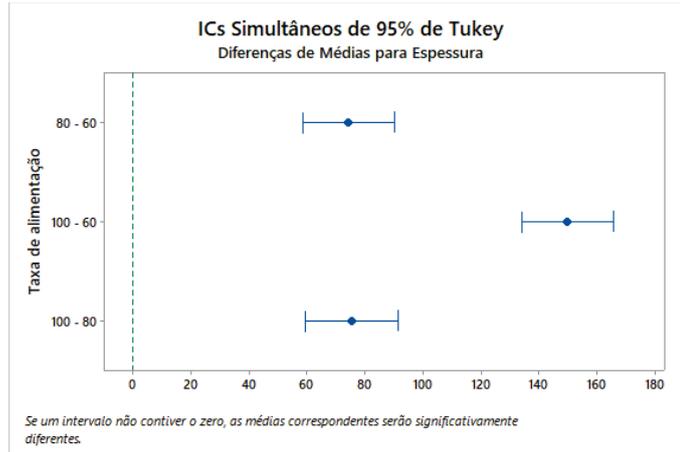
Teste de comparação de médias de Tukey para estequiometria – MICRODUREZA VICKERS.



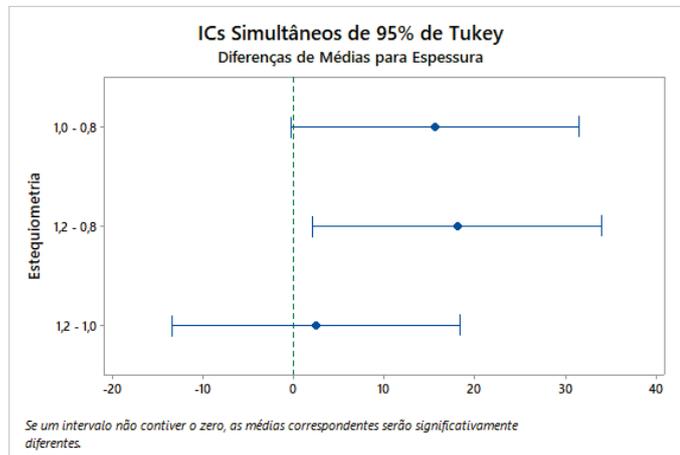
Teste de comparação de médias de Tukey para fluxo mássico– MICRODUREZA VICKERS.



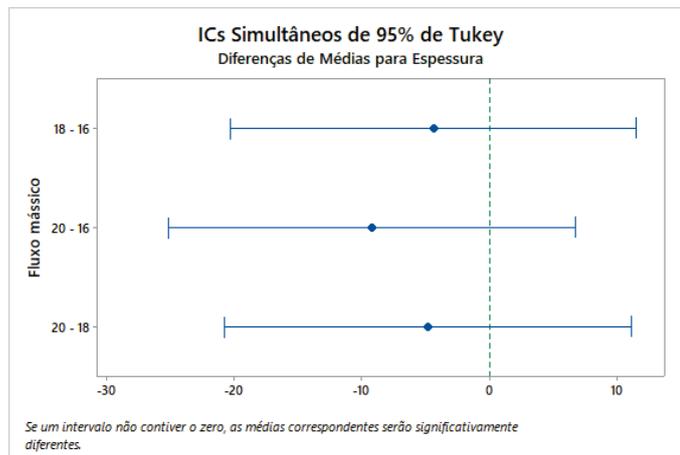
Teste de comparação de médias de Tukey para distância– MICRODUREZA VICKERS.



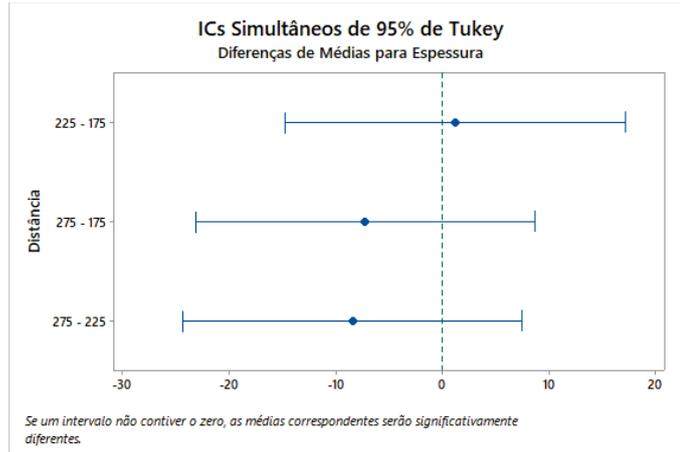
Teste de comparação de médias de Tukey para taxa de alimentação– ESPESSURA.



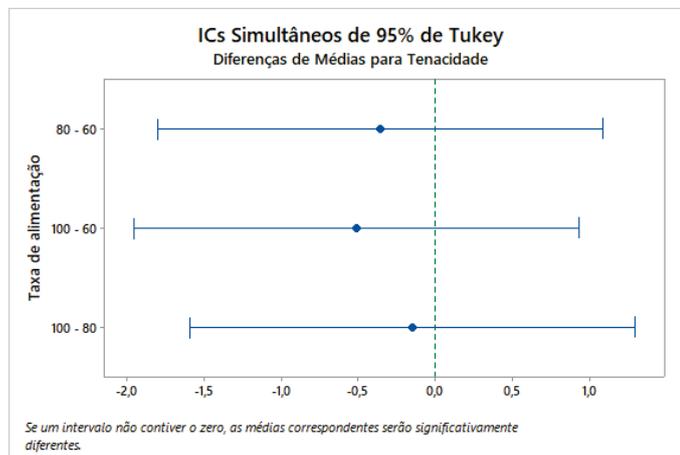
Teste de comparação de médias de Tukey para estequiometria– ESPESSURA.



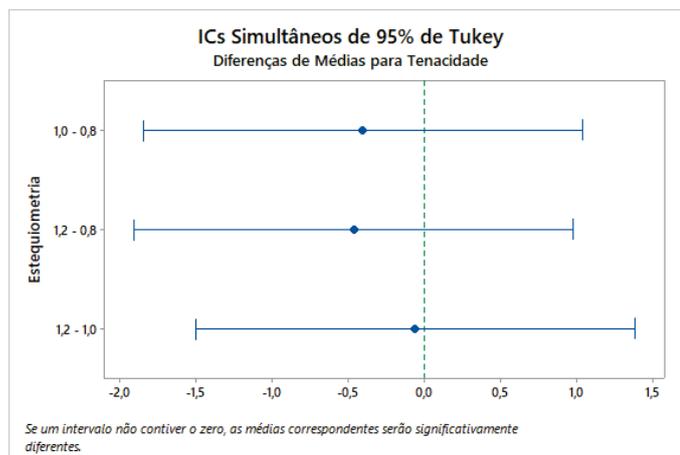
Teste de comparação de médias de Tukey para fluxo mássico– ESPESSURA.



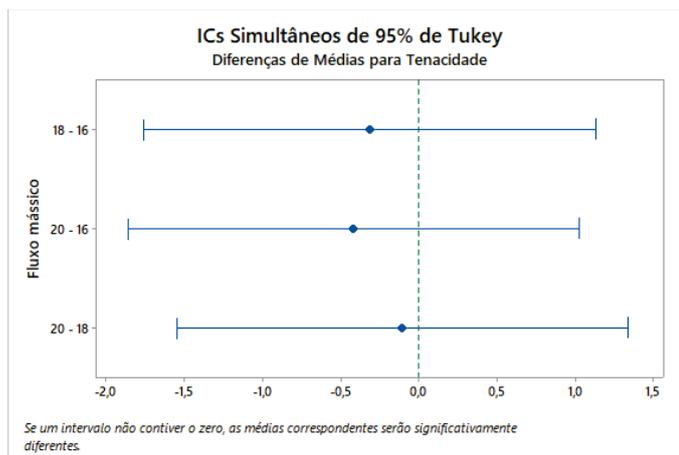
Teste de comparação de médias de Tukey para distância– ESPESSURA.



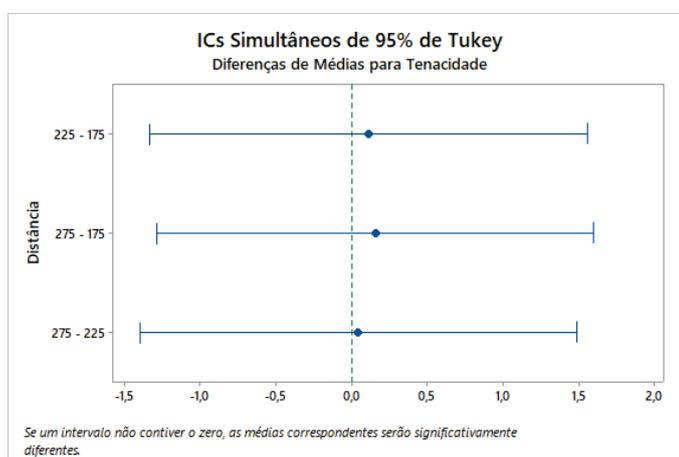
Teste de comparação de médias de Tukey para taxa de alimentação– TENACIDADE.



Teste de comparação de médias de Tukey para estequiometria– TENACIDADE.

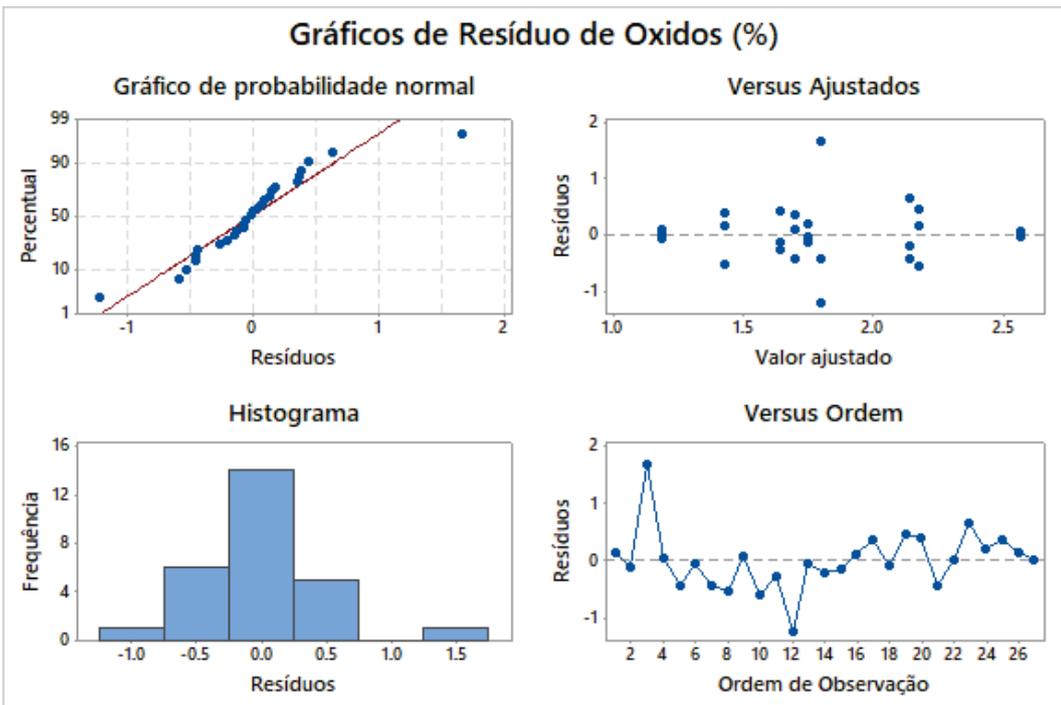
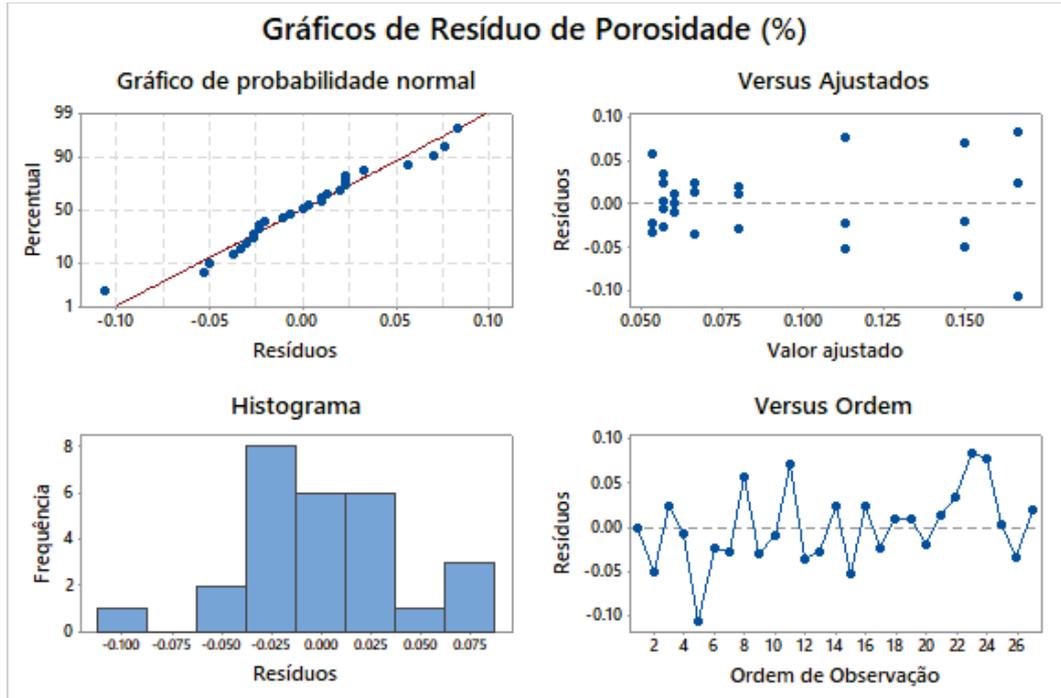


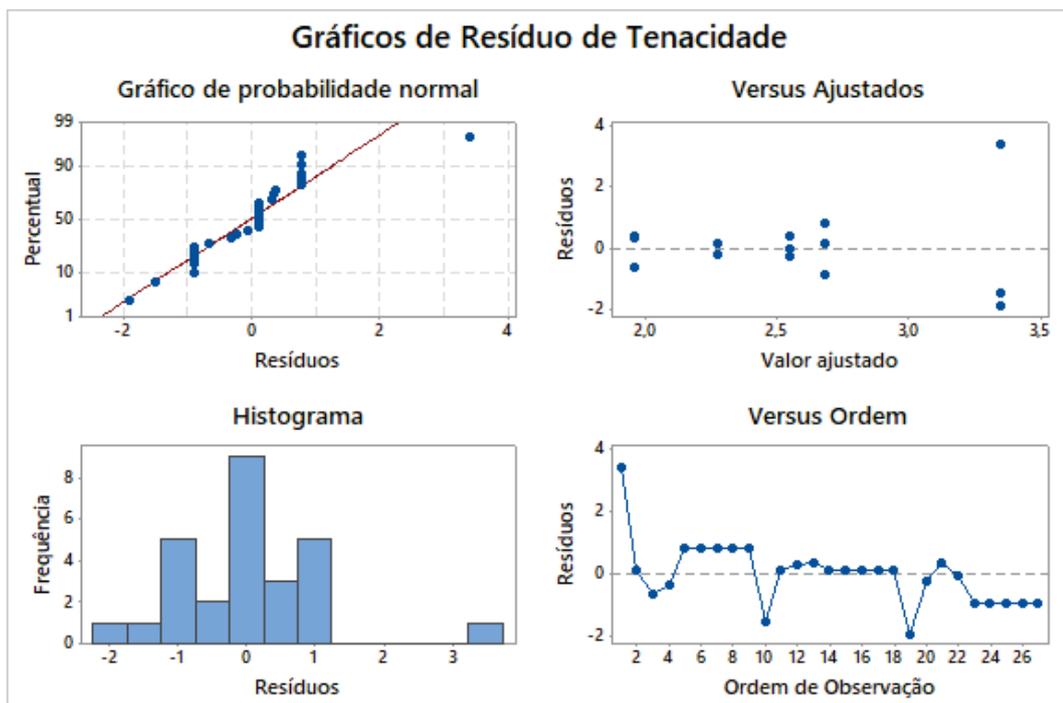
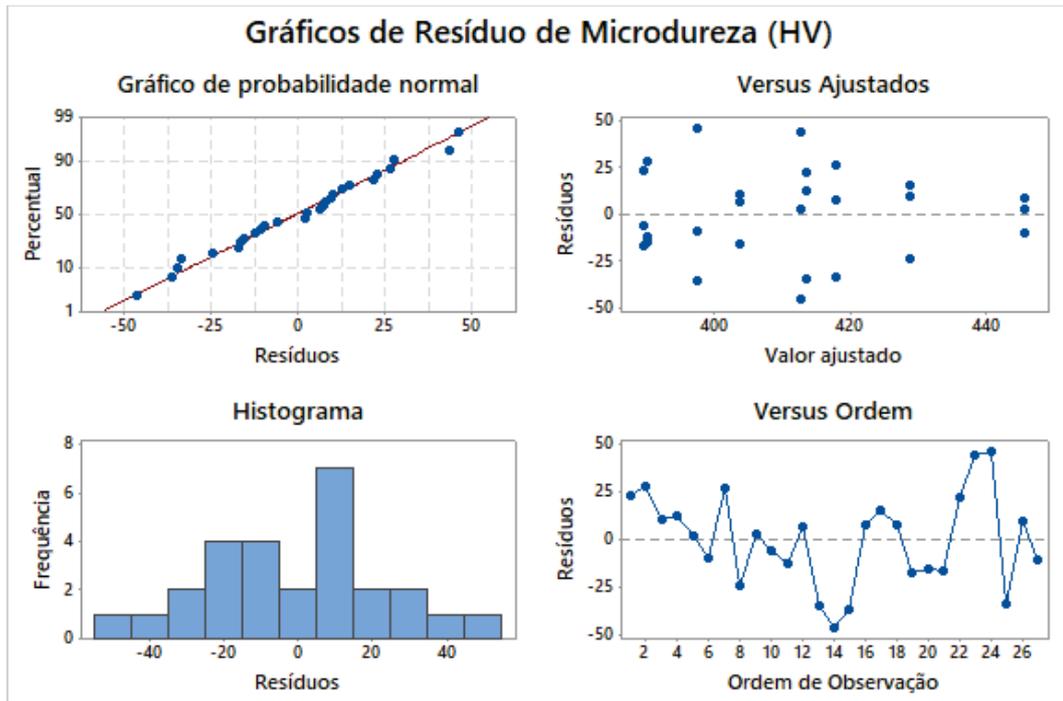
Teste de comparação de médias de Tukey para fluxo mássico– TENACIDADE.



Teste de comparação de médias de Tukey para distância– TENACIDADE.

- GRÁFICO DE RESÍDUOS





- PROPANO
 - ANOVA

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Distância	2	0,4796	0,2398	1,88	0,168
Fluxo mássico	2	0,4071	0,2035	1,59	0,217
Estequiometria	2	1,4754	0,7377	5,77	0,007
Taxa de alimentação	2	1,3796	0,6898	5,40	0,009
Erro	36	4,5994	0,1278		
Total	44	8,3411			

Quadro da ANOVA depositado por propano– POROSIDADE.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Distância	2	0,1250	0,06249	0,04	0,956
Fluxo mássico	2	0,1473	0,07365	0,05	0,949
Estequiometria	2	13,8940	6,94701	4,97	0,012
Taxa de alimentação	2	17,5416	8,77082	6,28	0,005
Erro	36	50,2896	1,39693		
Total	44	81,9975			

Quadro da ANOVA depositado por propano– ÓXIDOS.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Distância	2	1433,8	716,9	2,20	0,140
Fluxo mássico	2	3047,4	1523,7	4,68	0,023
Estequiometria	2	2914,1	1457,0	4,47	0,027
Taxa de alimentação	2	541,8	270,9	0,83	0,452
Erro	18	5865,0	325,8		
Total	26	13802,1			

Quadro da ANOVA depositado por propano– MICRODUREZA.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Distância	2	0,1663	0,08315	0,81	0,461
Fluxo mássico	2	3,2841	1,64203	15,95	0,000
Estequiometria	2	1,1147	0,55734	5,41	0,014
Taxa de alimentação	2	0,7298	0,36489	3,54	0,050
Erro	18	1,8530	0,10295		
Total	26	7,1479			

Quadro da ANOVA depositado por propano– TENACIDADE.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Distância	2	6138	3068,9	7,32	0,005
Fluxo mássico	2	128138	64069,0	152,73	0,000
Estequiometria	2	109659	54829,4	130,71	0,000
Taxa de alimentação	2	181610	90805,0	216,47	0,000
Erro	18	7551	419,5		
Total	26	433096			

Quadro da ANOVA depositado por propano– ESPESSURA.

○ RANQUEAMENTO

Nível	Distância	Fluxo mássico	Estequiometria	Taxa de alimentação
1	0,3567	0,6153	0,4433	0,2387
2	0,4920	0,3893	0,2887	0,5993
3	0,6093	0,4533	0,7260	0,6200
Delta	0,2527	0,2260	0,4373	0,3813
Atribuir postos	3	4	1	2

Ranqueamento do revestimento depositado com propano -POROSIDADE.

Nível	Distância	Fluxo mássico	Estequiometria	Taxa de alimentação
1	3,111	3,031	3,339	2,292
2	3,037	3,113	2,338	3,810
3	3,166	3,170	3,637	3,212
Delta	0,129	0,139	1,299	1,518
Atribuir postos	4	3	2	1

Ranqueamento do revestimento depositado com propano -ÓXIDOS.

Nível	Distância	Fluxo mássico	Estequiometria	Taxa de alimentação
1	350,3	339,4	333,8	350,5
2	338,8	342,7	355,8	342,3
3	356,4	363,4	355,9	352,7
Delta	17,6	24,0	22,1	10,4
Atribuir postos	3	1	2	4

Ranqueamento do revestimento depositado com propano -MICRODUREZA.

Nível	Distância	Fluxo mássico	Estequiometria	Taxa de alimentação
1	2,167	1,586	2,108	2,186
2	2,089	2,362	1,815	2,202
3	1,976	2,284	2,310	1,845
Delta	0,191	0,776	0,495	0,356
Atribuir postos	4	1	2	3

Ranqueamento do revestimento depositado com propano - TENACIDADE.

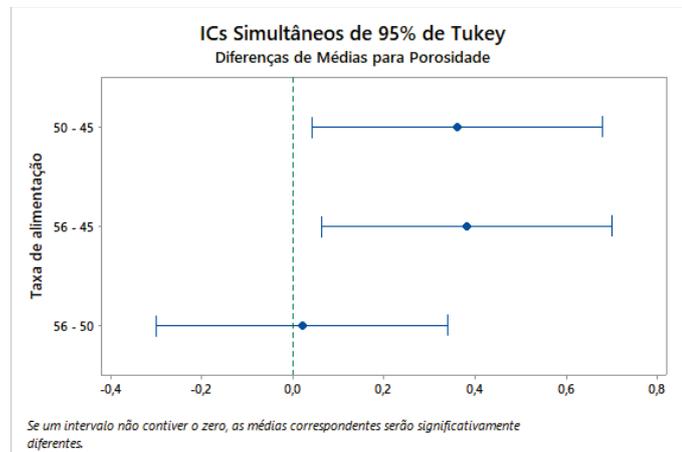
Nível	Distância	Fluxo mássico	Estequiometria	Taxa de alimentação
1	479,5	389,9	456,8	381,0
2	469,8	551,0	424,9	581,5
3	505,5	514,0	573,2	492,3
Delta	35,7	161,1	148,3	200,5
Atribuir postos	4	2	3	1

Ranqueamento do revestimento depositado com propano - ESPESSURA.

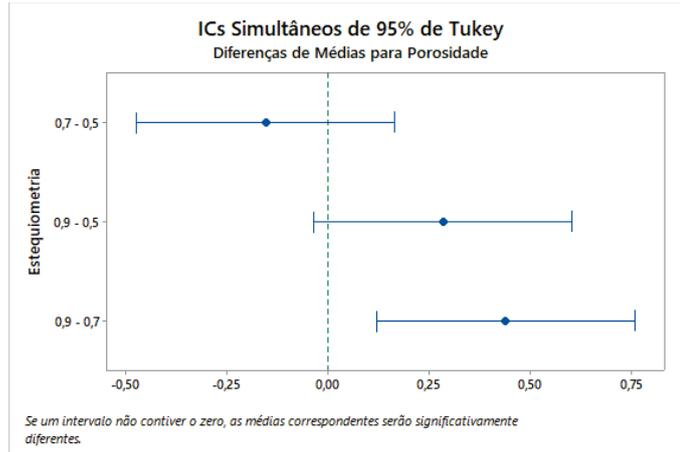
Nível	Distancia	Fluxo mássico	Estequiometria	Taxa de alimentação
1	0,08500	0,12797	0,10733	0,07700
2	0,10790	0,11050	0,11097	0,08883
3	0,10880	0,06323	0,08340	0,13587
Delta	0,02380	0,06473	0,02757	0,05887
Posto	4	1	3	2

Ranqueamento do revestimento depositado com propano – TAXA DE EROSÃO POR CAVITAÇÃO.

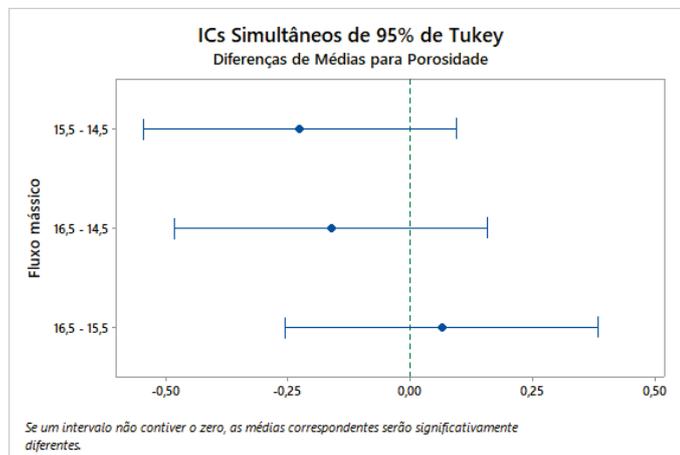
○ COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE TUKEY



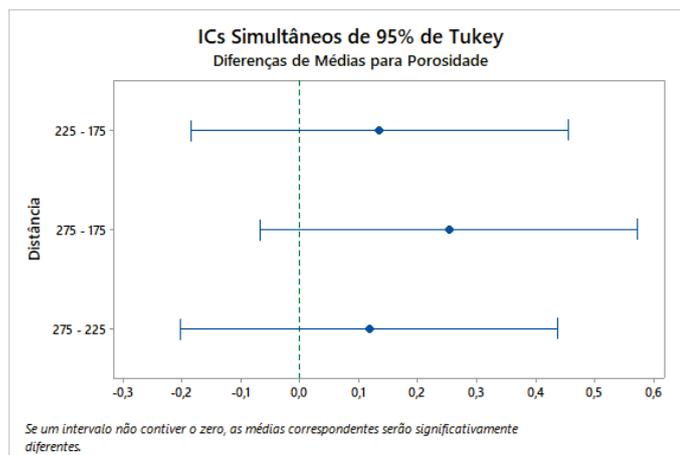
Teste de comparação de médias de Tukey para taxa de alimentação – POROSIDADE



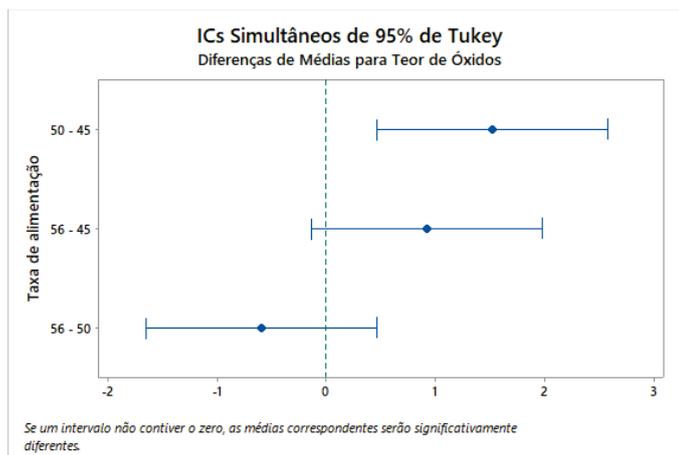
Teste de comparação de médias de Tukey para estequiometria– POROSIDADE



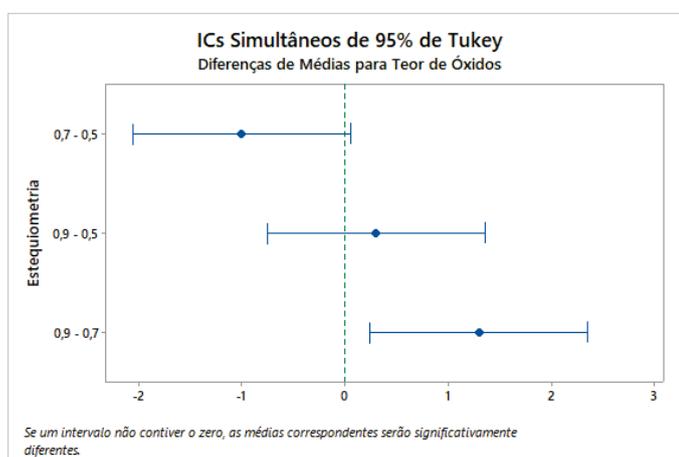
Teste de comparação de médias de Tukey para fluxo mássico– POROSIDADE



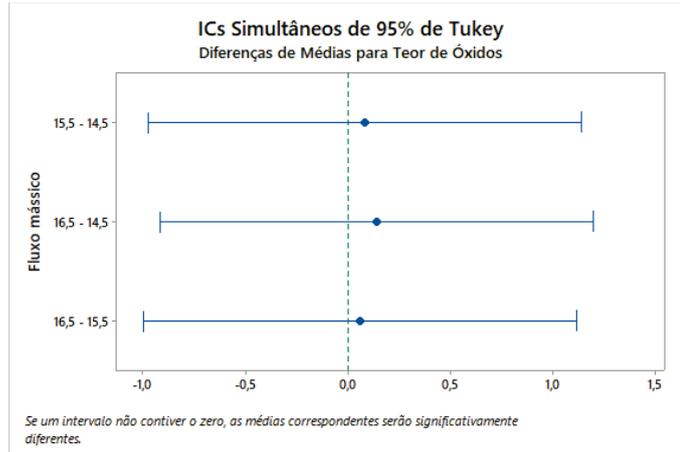
Teste de comparação de médias de Tukey para distância– POROSIDADE



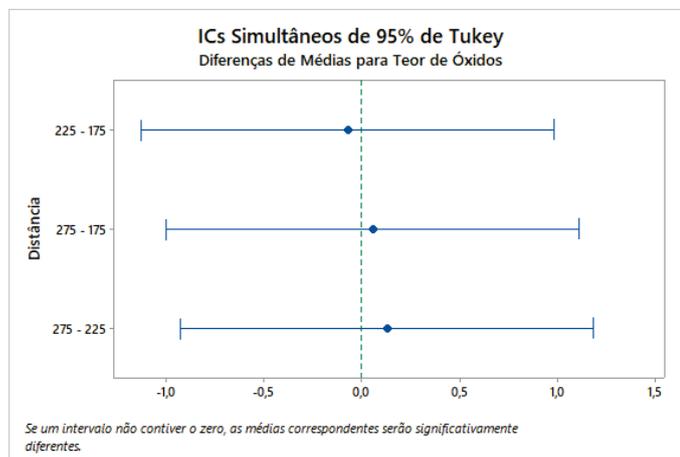
Teste de comparação de médias de Tukey para taxa de alimentação– ÓXIDOS



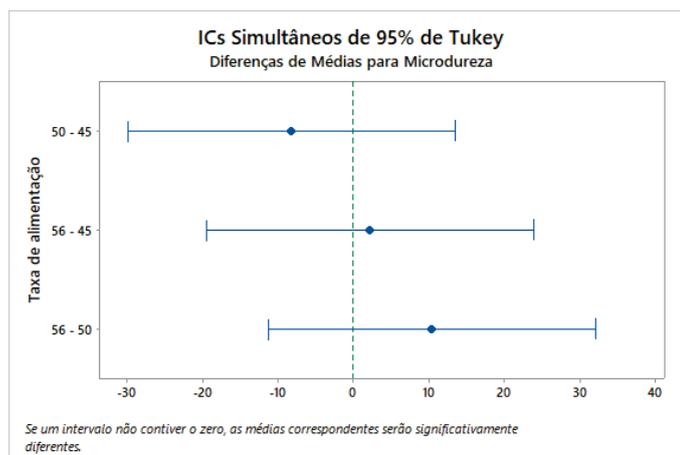
Teste de comparação de médias de Tukey para estequiometria– ÓXIDOS



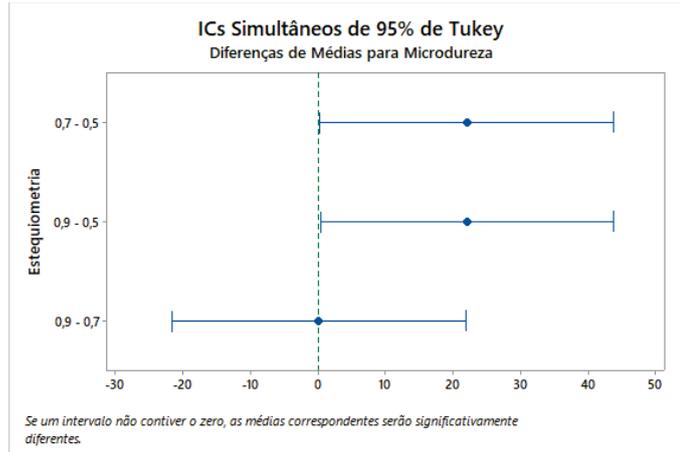
Teste de comparação de médias de Tukey para fluxo mássico– ÓXIDOS



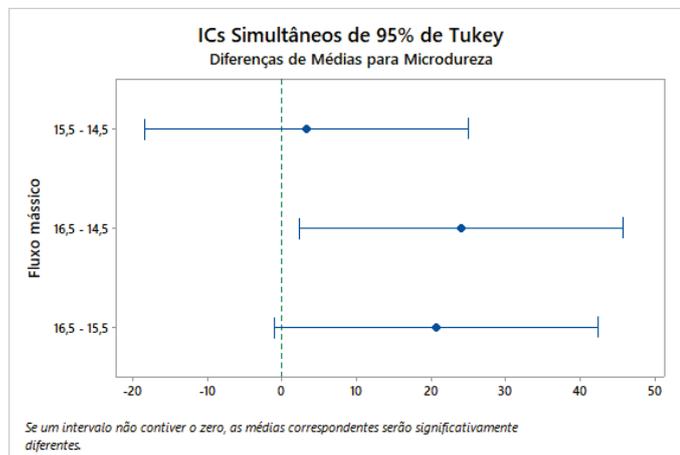
Teste de comparação de médias de Tukey para distância– ÓXIDOS



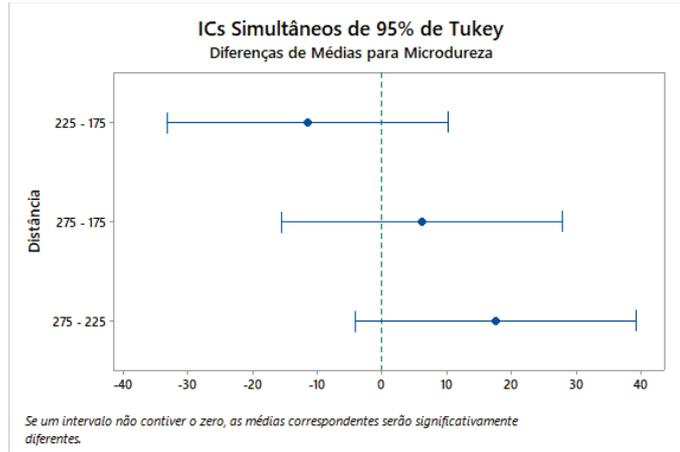
Teste de comparação de médias de Tukey para taxa de alimentação– MICRODUREZA



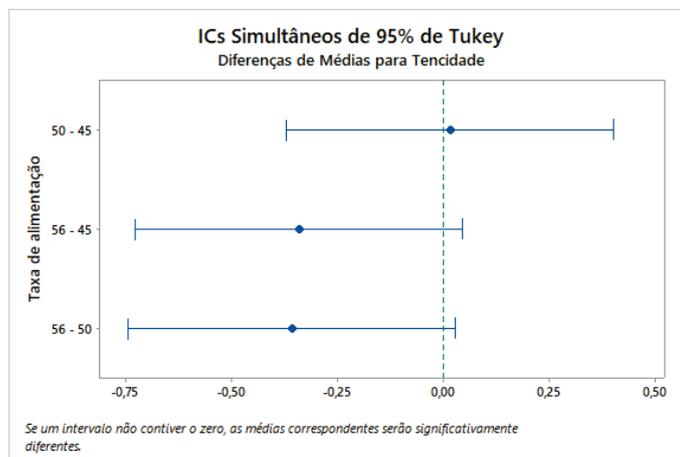
Teste de comparação de médias de Tukey para estequiometria– MICRODUREZA



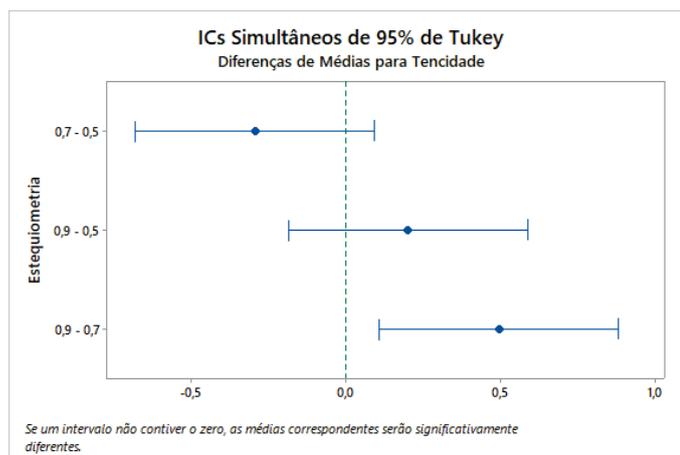
Teste de comparação de médias de Tukey para fluxo mássico– MICRODUREZA



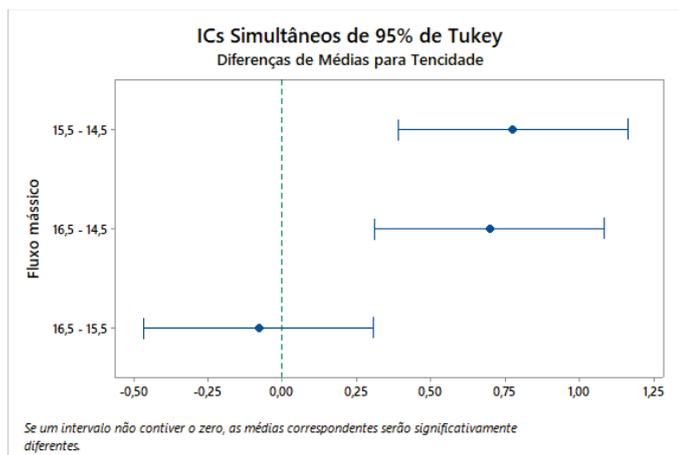
Teste de comparação de médias de Tukey para distância– MICRODUREZA



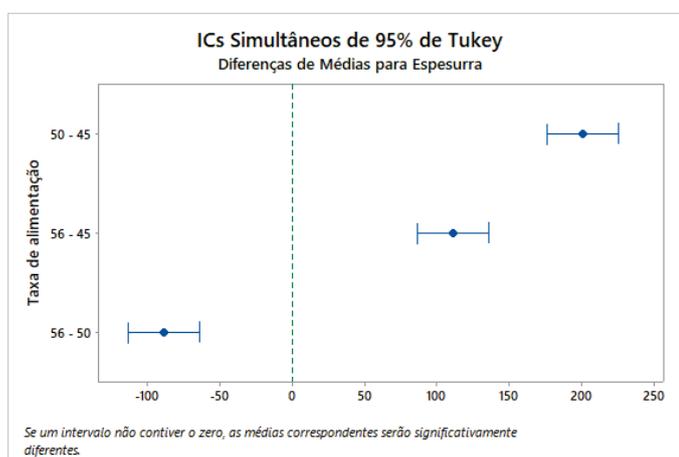
Teste de comparação de médias de Tukey para taxa de alimentação– TENACIDADE



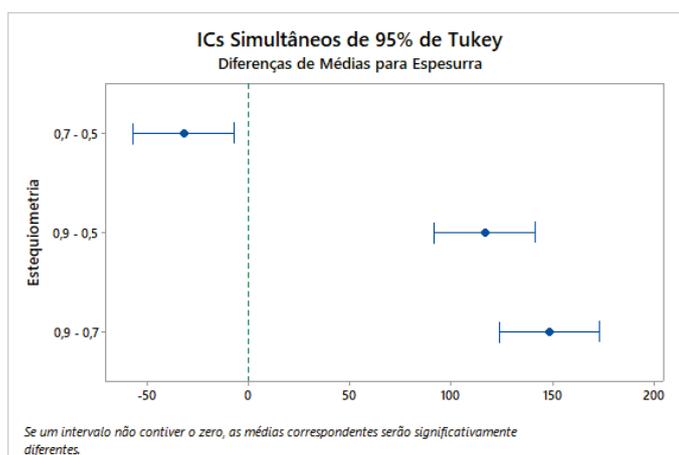
Teste de comparação de médias de Tukey para estequiometria– TENACIDADE



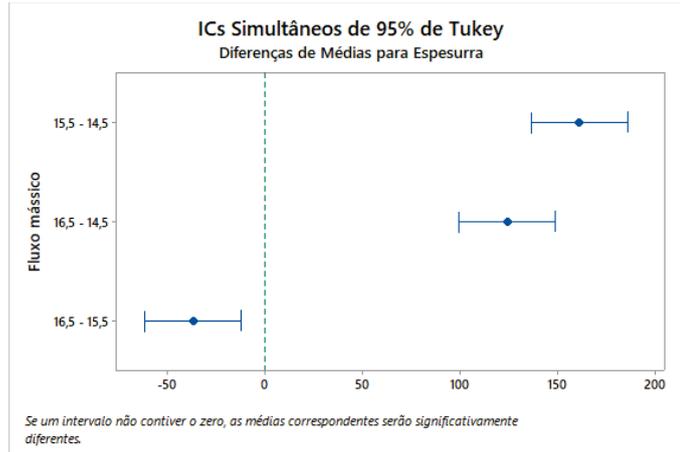
Teste de comparação de médias de Tukey para fluxo mássico– TENACIDADE



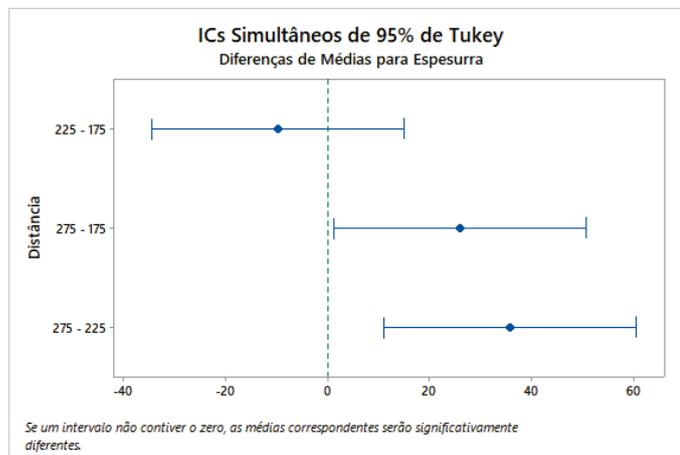
Teste de comparação de médias de Tukey para taxa de alimentação– ESPESSURA



Teste de comparação de médias de Tukey para estequiometria– ESPESSURA



Teste de comparação de médias de Tukey para fluxo mássico– ESPESSURA



Teste de comparação de médias de Tukey para distância– ESPESSURA

- GRÁFICO DE RESÍDUOS

