

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

MAURICIO DANIEL MARCZAL

**INFLUÊNCIA DO ACABAMENTO SUPERFICIAL OBTIDO POR
FRESAMENTO DE TOPO ESFÉRICO NA RESISTÊNCIA À
CAVITAÇÃO DE UM REVESTIMENTO AUSTENÍTICO DEPOSITADO
POR MIG**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2019

MAURICIO DANIEL MARCZAL

**INFLUÊNCIA DO ACABAMENTO SUPERFICIAL OBTIDO POR
FRESAMENTO DE TOPO ESFÉRICO NA RESISTÊNCIA À
CAVITAÇÃO DE UM REVESTIMENTO AUSTENÍTICO DEPOSITADO
POR MIG**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, área de concentração Fabricação Mecânica e Materiais, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Aldo Braghini Júnior

PONTA GROSSA

2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa
n.75/19

M322 Marczal, Mauricio Daniel

Influência do acabamento superficial obtido por fresamento de topo esférico na resistência à cavitação de um revestimento austenítico depositado por MIG / Mauricio Daniel Marczal. 2019.

122 f.; il. 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Aldo Braghini Junior

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

1. Cavitação. 2. Erosão. 3. Aspereza de superfície. 4. Usinagem. 5. Metais – Acabamento. I. Braghini Junior, Aldo. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. III. Título.

CDD 620.1

Elson Heraldo Ribeiro Junior. CRB-9/1413. 17/12/2019.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Título de Dissertação Nº 36/2019

“INFLUÊNCIA DO ACABAMENTO SUPERFICIAL OBTIDO POR FRESAMENTO DE TOPO ESFÉRICO NA RESISTÊNCIA À CAVITAÇÃO DE UM REVESTIMENTO AUSTENÍTICO DEPOSITADO POR MIG”

Por

Mauricio Daniel Marczal

Esta dissertação foi apresentada às 14:30 horas de **9 de agosto de 2019** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA, com Área de Concentração em Processos de Fabricação e Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Marcio Ferreira Hupalo
(UEPG)

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marenda
Pukasiewicz (UTFPR)



Prof. Dr. Aldo Braghini Junior (UTFPR)
Orientador e Presidente da Banca

Visto do Coordenador:

Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos
Coordenador do PPGEM
UTFPR – Câmpus Ponta Grossa

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano.”

(NEWTON, Isaac)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, fonte inesgotável de vida e inspiração. Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. Aldo Braghini Júnior, pela paciência e profissionalismo com que me guiou nesta trajetória, e ao Prof. Msc. Henrique Ajuz Holzmann pela amizade e auxílio nos momentos de dificuldade.

Aos meus colegas de sala nas disciplinas cursadas, pela apreciação de tantos momentos de amizade, alegria e descontração.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento incondicional à toda minha família, pois sem o apoio e amor deles seria impossível vencer esse desafio.

Agradeço imensamente ao colega Eriel Sabino, que com muita paciência, motivação e empenho, auxiliou de forma imprescindível na aquisição das imagens utilizadas neste trabalho. Um agradecimento a Escola de Engenharia de São Carlos – EESC - USP na figura do Prof. Reginaldo Teixeira Coelho pela disponibilização do Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação (LOPF) para realização dos ensaios de usinagem.

Uma menção especial de agradecimento a pessoa do Prof. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz, que permitiu a utilização do espaço do laboratório de caracterização de materiais, sem o qual não seria possível a execução de todos os longos ensaios realizados.

Agradeço a minha querida companheira Alessandra, pelas incontáveis horas de compreensão e apoio dispensadas a mim frente as obrigações da pós-graduação.

Enfim, a todos os que por algum motivo ou outro contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa.

RESUMO

MARCZAL, Mauricio Daniel. **Influência do acabamento superficial obtido por fresamento de topo esférico na resistência à cavitação de um revestimento austenítico depositado por MIG.** 2019. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

O fenômeno da cavitação, que ocorre em pás de turbinas hidráulicas, representa um sério problema de eficiência relacionado à manutenção de hidrogeradores. Tempos elevados de reparo associados a paradas totais dos equipamentos de geração impactam de forma significativa no custo efetivo da manutenção das turbinas. Processos de soldagem são geralmente utilizados no cenário atual quando há a necessidade de realizar a recuperação destes equipamentos, e são acompanhados de acabamento por esmerilhamento, em geral sem nenhum controle, apenas baseado na observação do operador, fato que promove inúmeras irregularidades superficiais, provocando alterações significativas e não homogêneas no perfil de rugosidade, que por sua vez afeta a resistência à cavitação. Compreender os fenômenos da cavitação, associados às superfícies obtidas em diferentes parâmetros de usinagem torna-se necessário para que se possa melhor planejar ações de manutenção, possibilitando aplicação de técnica de fresamento para recuperação de perfis danificados. A presente pesquisa avaliou os perfis de rugosidade produzidos por diferentes parâmetros de fresamento em um revestimento austenítico, resistente a cavitação, e a sua influência na perda de massa por cavitação, relacionando as diferentes superfícies geradas com a resistência a cavitação. Os resultados indicaram que o acabamento superficial obtido por usinagem influencia o processo de cavitação majoritariamente no período de incubação, se desenvolvendo principalmente com mecanismos de formação de pites em regiões não preferenciais, erosão de regiões de microrrebarbas com arrancamento de material aderido resultante da usinagem, tendo ainda como consideração que a superfície gerada por uma ferramenta de cabeça intercambiável em velocidade de corte mais baixa e avanço por dente menor, foi a que desenvolveu o processo erosivo mais lentamente.

Palavras-chave: Cavitação. Erosão. Rugosidade. Usinagem. Acabamento superficial.

ABSTRACT

MARCZAL, Mauricio Daniel. **Influence of surface finish obtained by end ball milling on the cavitation resistance of an austenitic coating deposited by MIG.** 2019. 122 p. Dissertation (Master Degree in Mechanical Engineering) - Federal University of Technology - Parana. Ponta Grossa, 2019.

The cavitation phenomenon, which occurs in hydraulic turbines, represents a serious efficiency problem related to the maintenance of hydrogenerators. High repair times associated with total equipment outages that significantly impact the effective cost of turbine maintenance. Welding processes are normally used in the current scenario when equipment recovery is required, and are accompanied by grinding finish, usually without control, only with operator observation, which uses various surface irregularities, causing changes deduced and not homogeneous in the roughness profile, which in turn affects the resistance to cavitation. Understanding the effects of cavitation, the effects associated with blocked surfaces at different usage parameters become necessary to improve maintenance actions, enabling the application of upgrade techniques to recover damaged damage. The present research evaluated the roughness profiles applied by different coating parameters in a cavitation resistant austenitic coating and its influence on cavitation mass loss, relating to different variations generated with cavitation resistance. The results indicate that the surface finish used by machining influences the cavitation process mainly during the incubation period, developing mainly with the pitting training mechanism in non-preferential regions, erosion of micro-burr regions with material organization adhered to machining use. It also has to be considered that the surface generated by a head tool interchangeable at lower cutting speed and advancing by lower tooth was a process that caused the erosion process more slowly.

Keywords: Cavitation. Erosion. Roughness. Machining. Surface Finishing

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos gerais de fresas de topo	24
Figura 2 – Fresamento tipo concordante (a esquerda) e discordante (a direita).....	24
Figura 3 – Representação esquemática do avanço por volta (f) e avanço por dente/gume (f_z)	25
Figura 4 – Diferentes texturas geradas com variação da velocidade de corte no fresamento	31
Figura 5 - Formação de APC em uma ferramenta de corte	31
Figura 6 – Processo de formação e colapso das bolhas na cavitação	33
Figura 7 – Equipamento para ensaio de cavitação por vibração.....	39
Figura 8 – Diferentes orientações dos cristais observadas no revestimento soldado submetido a (A) esmerilhamento e (B) refusão	44
Figura 9 – Micrografias mostrando os aspectos das superfícies após 10 horas de ensaio para (a) superfície polida e (b) superfície lixada.	45
Figura 10 – Fluxograma da pesquisa realizada.....	50
Figura 11 – Divisão da chapa em porções de material para preparação das amostras.....	51
Figura 12 – Corpo de prova antes e após passe de homogeneização	52
Figura 13 – Fresas utilizadas nos ensaios: (A) Inserto intercambiável (B) Cabeça intercambiável	54
Figura 14 – Parâmetros de rugosidade de uma superfície e cálculo de obtenção	58
Figura 15 – Ilustração esquemática do equipamento para ensaio de cavitação	61
Figura 16 – Espectro gráfico gerado pela técnica de EDS.....	64
Figura 17 – Aspecto metalográfico do substrato para o material do estudo. Ataque: Vilella.....	65
Figura 18 – Metalografia do revestimento na região transversal da amostra	65
Figura 19 – Estados de superfície inicial obtidos com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição (A) nova e (B) desgastada	66
Figura 20 – Topografia de superfície inicial para os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição (A) nova e (B) desgastada	67

Figura 21 – Estados de superfície inicial obtidos com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição (A) nova e (B) desgastada	68
Figura 22 – Estados de superfície inicial obtidos com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição (A) nova e (B) desgastada	69
Figura 23 – Estados de superfície inicial obtidos com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição (A) nova e (B) desgastada	70
Figura 24 – Estados de superfície inicial obtidos com os parâmetros de usinagem f_z de 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição (A) nova e (B) desgastada	71
Figura 25 – Estados de superfície inicial obtidos com os parâmetros de usinagem f_z de 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição (A) nova e (B) desgastada	71
Figura 26 – Estado de superfície inicial e aspecto topográfico para amostra na condição polida	73
Figura 27 – Estado de superfície inicial e aspecto topográfico para amostra na condição esmerilhada	74
Figura 28 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição nova	76
Figura 29 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição nova após ..	77
Figura 30 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição desgastada após	78
Figura 31 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição nova após ..	80
Figura 32 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição desgastada após	81
Figura 33 – (A) Aspecto da superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição nova	83

Figura 34 – Evolução morfológica das superfícies obtidas com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição nova e desgastada para (A) 6 horas, (B) 10 horas, (C) 14 horas (D) 20 horas de ensaio de cavitação.....	83
Figura 35 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição nova	86
Figura 36 – Aspecto da superfície após 14 horas de ensaio.....	86
Figura 37 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição nova	87
Figura 38 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição nova após	88
Figura 39 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição desgastada' após	89
Figura 40 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição nova após	90
Figura 41 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição desgastada após	91
Figura 42 –Evolução morfológica da superfície polida em (A) 6 e (B) 10 horas de ensaio.....	93
Figura 43 –Evolução morfológica da superfície polida em (A) 14 e (B) 20 horas de ensaio.....	94
Figura 44 –Evolução morfológica da superfície esmerilhada no ensaio de cavitação após (A) 6 horas de ensaio, (B) 10 horas, (C) 14 horas e (D) 20 horas	96
Figura 45 – Aspecto microscópico ao final de 20 horas de ensaio para as amostras 6N e 4D	114

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Esmerilhamento de uma turbina hidráulica	48
Fotografia 2 – Aspecto da amostra de ensaio a ser cavitada.....	53
Fotografia 3 – Centro de usinagem Hermle C800U	55
Fotografia 4 – Perfilômetro ótico TAYLOR HOBSON.....	57
Fotografia 5 – Microscópio Eletrônico modelo Vega 3LM Tescan.....	59
Fotografia 6 – Equipamento para ensaio de cavitação	60
Fotografia 7 – Detalhe interno do equipamento para ensaio de cavitação.....	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Acabamento superficial e tempo de operação para processos	28
Gráfico 2 – Curva de perda de massa na cavitação demonstrando os estágios de incubação e aceleração e evidenciando a determinação do período de incubação..	35
Gráfico 3 - Erosão por cavitação e rugosidade versus tempo	36
Gráfico 4 - Mudanças na PME, R_a , R_{rms} e R_{max} na superfície de um aço 304 sujeito a cavitação	42
Gráfico 5 – Perda de massa em um revestimento aspergido a arco, submetido a diferentes granulometrias de lixamento.....	43
Gráfico 6 – Perda de massa acumulada para as amostras polida e trabalhada a frio evidenciando alteração do período de incubação	45
Gráfico 7 – Curvas de perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostras usinadas, utilizando ferramenta de inserto intercambiável, com f_z 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min para condição nova e desgastada	75
Gráfico 8 – Curvas de perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostras usinadas, utilizando ferramenta de cabeça intercambiável, com f_z 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min para condição nova e desgastada	79
Gráfico 9 – Curvas de perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostras usinadas, utilizando ferramenta de inserto intercambiável, com f_z 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min para condição nova e desgastada	82
Gráfico 10 – Curvas de perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostras usinadas, utilizando ferramenta de cabeça intercambiável, com f_z 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min para condição nova e desgastada	85
Gráfico 11 – Curvas de perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostras usinadas, utilizando ferramenta de inserto intercambiável, com f_z 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min para condição nova e desgastada	88
Gráfico 12 – Curvas de perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostras usinadas, utilizando ferramenta de cabeça intercambiável, com f_z 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min para condição nova e desgastada	90
Gráfico 13 – Perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostra polida.....	92

Gráfico 14 – Perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostra esmerilhada.....	95
Gráfico 15 – Curva da evolução dos parâmetros de rugosidade de superfície obtidos para amostra nos parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição nova	97
Gráfico 16 – Curva de rugosidade de superfície nos parâmetros S_a , S_{sk} e S_q , da amostra obtida nos parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição nova.....	98
Gráfico 17 – Curva da evolução dos parâmetros de rugosidade de amplitude para amostra obtida nos parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição nova.....	99
Gráfico 18 – Curva de rugosidade de amplitude S_z para as amostras usinadas com ferramenta de inserto intercambiável na condição nova, nos parâmetros 1N: f_z 0,1 mm/aresta v_c 200m/min; 3N f_z 0,1 mm/aresta v_c 300m/min; 5N f_z 0,08 mm/aresta v_c 200m/min.....	100
Gráfico 19 – Sobreposição das curvas de rugosidade de amplitude S_z e perda de massa acumulada para amostra obtida nos parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição nova	101
Gráfico 20 – Curva de rugosidade de amplitude S_z para as amostras usinadas com ferramenta de inserto intercambiável na condição desgastada, nos parâmetros 1D: f_z 0,1 mm/aresta v_c 200m/min; 3D f_z 0,1 mm/aresta v_c 300m/min; 5D f_z 0,08 mm/aresta v_c 200m/min.....	102
Gráfico 21 – Sobreposição das curvas de rugosidade de amplitude S_z e perda de massa acumulada para amostra obtida nos parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição desgastada.....	103
Gráfico 22 – Curva de rugosidade de amplitude S_z para as amostras usinadas com ferramenta de cabeça intercambiável na condição nova, nos parâmetros 2N: f_z 0,1 mm/aresta v_c 200m/min; 4N f_z 0,1 mm/aresta v_c 300m/min; 6N f_z 0,08 mm/aresta v_c 200m/min.....	104
Gráfico 23 – Sobreposição das curvas de rugosidade de amplitude S_z e perda de massa acumulada para amostra obtida nos parâmetros de usinagem f_z de 0,1	

mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável na condição nova	105
Gráfico 24 – Curva de rugosidade de amplitude Sz para as amostras usinadas com ferramenta de cabeça intercambiável na condição desgastada, nos parâmetros 2D: f_z 0,1 mm/aresta v_c 200m/min; 4D f_z 0,1 mm/aresta v_c 300m/min; 6D f_z 0,08 mm/aresta v_c 200m/min.....	106
Gráfico 25 – Sobreposição das curvas de rugosidade de amplitude Sz e perda de massa acumulada para amostra obtida nos parâmetros de usinagem f_z de 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável na condição desgastada.....	107
Gráfico 26 – Curva de rugosidade de amplitude Sz para a amostra polida	108
Gráfico 27 – Sobreposição das curvas de rugosidade de amplitude Sz e perda de massa acumulada para a amostra Polida	108
Gráfico 28 – Curva de rugosidade de amplitude Sz para a amostra esmerilhada..	109
Gráfico 29 – Sobreposição das curvas de rugosidade de amplitude Sz e perda de massa acumulada para a amostra esmerilhada.....	110
Gráfico 30 – Dureza média das amostras ensaiadas na região não cavitada e submetida a cavitação.....	110
Gráfico 31 – Gráfico de performance para as amostras ensaiadas em termos de Sz inicial, Sz final e perda de massa acumulada.....	112
Gráfico 32 – Sobreposição das curvas de rugosidade de amplitude Sz e perda de massa acumulada para as amostras 6N e 4D.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química (% em peso) dos materiais utilizados.....	51
Tabela 2 – Parâmetros da deposição por soldagem do revestimento.....	52
Tabela 3 - Parâmetros de corte e condições de usinagem	55
Tabela 4 - Parâmetros do ensaio de cavitação	62
Tabela 5 - Parâmetros de rugosidade de superfície inicial nas amostras com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição nova e desgastada	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos.....	18
1.2 JUSTIFICATIVA.....	19
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO	21
2.1 USINAGEM.....	21
2.1.1 Usinagem com Geometria de Ferramenta Definida (UGD)	21
2.1.2 Usinagem com Geometria de Ferramenta Não-Definida (UGND)	22
2.2 ESMERILHAMENTO	22
2.3 FRESAMENTO	23
2.4 ACABAMENTO DE SUPERFÍCIES USINADAS.....	26
2.4.1 Integridade	26
2.4.2 Textura.....	27
2.4.3 Influência dos Parâmetros de Corte na Superfície Gerada.....	28
2.5 CAVITAÇÃO	32
2.5.1 Desenvolvimento do Dano	34
2.5.2 Técnicas de Avaliação da Cavitação	38
2.6 FATORES QUE AFETAM A RESISTÊNCIA A CAVITAÇÃO.....	40
2.6.1 Acabamento Superficial	40
2.6.2 Refinamento Microestrutural e Encruamento.....	43
2.6.3 Propriedades Mecânicas	46
2.6.4 Energia de Falha de Empilhamento (EFE)	47
2.7 RECUPERAÇÃO DE TURBINAS	48
3 MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1 CORPOS DE PROVA.....	51
3.1.1 Preparação dos Corpos de Prova.....	51
3.2 AMOSTRAS DE ENSAIO	53
3.2.1 Usinagem das Amostras	55
3.2.2 Aferição Inicial e Controle da Perda de Massa no Ensaio de Cavitação	56
3.2.3 Aquisição dos Parâmetros de Rugosidade	56

3.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura	59
3.2.5 Metalografia	59
3.3 ENSAIO DE CAVITAÇÃO	60
3.3.1 Cavitação no Método Indireto	60
3.3.2 Ensaio de Dureza	62
3.4 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	63
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO DEPOSITADO	64
4.2 CARACTERIZAÇÃO INICIAL DAS SUPERFÍCIES USINADAS	66
4.2.1 Superfícies Fresadas	66
4.2.2 Superfície Polida	72
4.2.3 Superfície Esmerilhada	73
4.3 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA A CAVITAÇÃO	74
4.3.1 Desempenho das Superfícies Geradas nas Condições 1N e 1D	74
4.3.2 Desempenho Superfícies Geradas nas Condições 2N e 2D	78
4.3.3 Desempenho das Superfícies Geradas nas Condições 3N e 3D	81
4.3.4 Desempenho Superfícies Geradas nas Condições 4N e 4D	85
4.3.5 Desempenho Superfícies Geradas nas Condições 5N e 5D	87
4.3.6 Desempenho Superfícies Geradas nas Condições 6N e 6D	89
4.3.7 Desempenho da Superfície Polida	91
4.3.8 Desempenho da Superfície Esmerilhada	94
4.4 ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA RUGOSIDADE	97
4.4.1 Ferramenta de Inserto Intercambiável Nova	100
4.4.1.1 Condição nova	100
4.4.1.2 Condição desgastada	102
4.4.2 Ferramenta de Cabeça Intercambiável	103
4.4.2.1 Condição nova	104
4.4.2.2 Condição desgastada	105
4.4.3 Amostra Polida	107
4.4.4 Amostra Esmerilhada	109
4.5 ANÁLISE DA MICRODUREZA	110
4.6 COMPARATIVO	111
5 CONCLUSÕES	115
REFERÊNCIAS	117

1 INTRODUÇÃO

No cenário brasileiro, atualmente a maior parte da energia elétrica é obtida por meio de hidrelétricas, as quais são responsáveis por aproximadamente 90% da produção total de eletricidade, tendo assim grande destaque no contexto nacional e sendo alvo constante de estudos para melhorias de aproveitamento do potencial energético, bem como de melhorias de manutenção (COPEL, 2016).

A obtenção da energia nas hidrelétricas baseia-se no movimento das pás das turbinas pela força da água, que possibilita o trabalho de um gerador, sendo que este movimento depende do fluxo de água que passa dentro do sistema de turbinas. Sua robustez, geometria e alto rendimento lhe conferem uma eficiência justificável frente a seus altos custos de implementação.

Nas turbinas ocorre uma aceleração da água, a qual tende a diminuir sua pressão para poder manter sua energia mecânica constante, sendo que esta pressão pode cair até uma pressão mínima na qual ocorre uma mudança de estado do fluido, formando assim bolhas de vapor. Estas bolhas de vapor são carregadas até uma região de colapso onde ocorrerá a implosão das mesmas. Se esta região for próxima a uma superfície sólida, as ondas de choque geradas pelas implosões entrarão em contato com a superfície das pás e a repetição deste processo acarreta em um processo erosivo, com posterior perda de massa. A esse processo de desgaste dá-se o nome de cavitação (SOUZA, 2012).

A cavitação pode levar a falha parcial ou total do sistema de turbinas. Para tanto, são realizadas inspeções constantes no sistema a fim de evitar este tipo de falha. Manutenções para esta situação específica demandam de grandes períodos de tempo, pois implicam em parada total da turbina.

O processo de recuperação da massa perdida é realizado por meio da deposição de material por processos de soldagem ou aspersão térmica. Para diminuir os problemas causados pela cavitação são utilizados para o preenchimento, materiais que sejam resistentes à cavitação. Deve-se ressaltar que após a deposição realiza-se uma etapa de esmerilhamento de desbaste e finalização, com o objetivo de uniformizar e dar acabamento à superfície recuperada. Riscos, porosidades e rugosidade elevada decorrentes do processo apresentam-se como concentradores de tensões equivalentes a um entalhe. Regiões que apresentam tais

condições são preferenciais para o início e desenvolvimento do processo de cavitação. Nestas regiões a perda de massa é maior que em regiões de menor rugosidade ou polidas (SOUZA, 2012).

Na etapa de esmerilhamento a superfície gerada apresenta uma característica superficial irregular e áspera, algo indesejável frente às condições de uso de componentes hidráulicos sujeitos a cavitação. Uma superfície mais uniforme e com melhor acabamento superficial pode ser obtida por meio de um processo de usinagem por geometria definida posterior ao processo de deposição por soldagem do revestimento. Com uma superfície usinada de forma otimizada, pode-se obter redução do atrito gerado entre o líquido e a superfície da pá, retardando assim o processo de cavitação nas pás da turbina. A contribuição da pesquisa neste aspecto se refere à compreensão dos fenômenos associados a ocorrência da cavitação em superfícies usinadas, utilizando superfícies obtidas em diferentes parâmetros de usinagem por fresamento, promovendo ampliação do conhecimento científico necessário para aplicação de técnicas mais apuradas de fabricação e manutenção de dispositivos hidráulicos.

1.1 OBJETIVOS

Dividem-se os objetivos de acordo com o que se segue.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência do acabamento superficial obtido por fresamento, variando avanço por dente e velocidade de corte, no processo de cavitação de um aço inoxidável austenítico ligado ao cobalto, depositado através da soldagem MIG/MAG.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a superfície de amostras de um aço inoxidável austenítico ligado ao cobalto depositado por soldagem MIG/MAG, em diferentes condições de fresamento.

- Quantificar a perda de massa do revestimento usinado ao longo do ensaio de cavitação, obtendo também as curvas de alteração de rugosidade superficial.
- Avaliar as características morfológicas da superfície erodida em termos de mecanismos de desgaste.
- Comparar a rugosidade, a taxa de perda de massa, alteração do período de incubação e aspecto morfológico da superfície em relação a condição polida e esmerilhada.

1.2 JUSTIFICATIVA

A recuperação de pás de turbinas hidráulicas demanda elevado tempo de reparo, mão de obra especializada e efetivo produtivo parado, ampliando o custo total da sua manutenção. Aplicar uma técnica baseada em usinagem para otimização da superfície obtida em termos de rugosidade, buscando compreender como ocorre o processo de cavitação nessas condições é de extrema relevância. A compreensão dos aspectos científicos associados a usinagem no processo de cavitação pode permitir futuras investigações sobre estratégias para aumento de disponibilidade de equipamento, representando um diferencial econômico para a indústria.

Devido ao aspecto superficial do material ter a capacidade de influenciar a velocidade em que surgem os estágios da cavitação, pretende-se buscar por meio da variação dos parâmetros de fresamento, diminuir esta rugosidade, refinando assim a superfície de modo a compreender melhor como ocorre o processo de cavitação quando utilizado o fresamento como técnica de usinagem de superfície, desenvolvendo portanto, conhecimento tecnológico sobre o processo.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é estruturado apresentando uma revisão teórica no capítulo 2. Neste capítulo são apresentadas as definições de usinagem com ferramenta de geometria definida, definição do processo de fresamento e caracterização das suas ferramentas. Ainda se comenta as definições do fenômeno da cavitação tais como: de que maneira ocorrem, quais os seus períodos de

acontecimentos, quais são as suas consequências. Discute-se também sobre os diferentes equipamentos e metodologias para ensaios de cavitação, apresentando vantagens e desvantagens. O capítulo 3 elucida a metodologia empregada nesta pesquisa, os materiais utilizados e as rotinas de execução. No capítulo 4, têm-se os resultados e discussões do trabalho, finalizando então com as conclusões no capítulo 5.

2 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

Aborda-se neste capítulo conceituação sobre a usinagem, introduzindo ao processo de fresamento e esmerilhamento. Comenta-se sobre os acabamentos dos processos de usinagem em termos dos parâmetros utilizados. Na sequência é abordado o fenômeno da cavitação, incluindo técnicas de verificação do fenômeno e suas propriedades de interferência, e os efeitos de diferentes propriedades em sua ocorrência.

2.1 USINAGEM

Usinagem é um termo que se aplica a todos os processos de fabricação onde ocorre a remoção de material sob a forma de cavacos. Trata-se, portanto, de operação que confere à peça forma, dimensões e acabamento superficial removendo material. A remoção de material ocorre através do contato entre ferramenta e peça, sendo a ferramenta constituída de um material com dureza e resistência muito superior à do material da peça usinada.

Os processos de usinagem convencionais são caracterizados de acordo com a geometria da ferramenta utilizada, sendo classificados em usinagem com geometria de ferramenta definida (UGD) e usinagem com geometria de ferramenta não definida (UGND).

2.1.1 Usinagem com Geometria de Ferramenta Definida (UGD)

Na usinagem com geometria de ferramenta definida, tal qual o nome sugere, é conhecido o aspecto geométrico do aparato de corte em questão. Este ainda, se mantém constante ao longo de toda sua extensão. Exemplos de processos em que há possibilidade de se medir a geometria da ferramenta de corte são: o torneamento, a furação, brochamento, fresamento, etc.

2.1.2 Usinagem com Geometria de Ferramenta Não-Definida (UGND)

Os processos de usinagem convencional por ferramenta com geometria indefinida são aqueles em que não se consegue medir efetivamente a geometria de corte envolvida. São processos que ocorrem, em geral, através do efeito abrasivo de um elemento mais duro movimentando-se sobre outro material de menor dureza.

Alguns exemplos de processos que não possuem definição na geometria de corte são: a retificação com rebolos, o brunimento, o jateamento, o esmerilhamento, etc.

2.2 Esmerilhamento

O esmerilhamento é um processo de UGND no qual a remoção do material é realizada por grãos abrasivos de alta dureza. Os grãos, além da dureza, devem ter estabilidade química e térmica.

Em processos de acabamento bruto, o esmerilhamento é altamente empregado em virtude da sua facilidade de aplicação, sua possibilidade de se trabalhar com formar curvas e seu baixo custo. Processos para limpeza e acabamento de superfície após a deposição por soldagem utilizam em geral dispositivos chamados esmerilhadeiras angulares, nas quais pode-se adaptar discos abrasivos de corte e desbaste ou mesmo discos abrasivos flexíveis, também conhecidos como *flaps*.

A usinagem por esmerilhamento angular manual é um processo em que há poucos parâmetros efetivamente controláveis de forma precisa. Dentre eles podem se destacar o tipo de disco utilizado, sua granulometria, a potência do motor utilizado e a velocidade do disco (muitas vezes fixada pelo próprio equipamento). Entre os parâmetros importantes que não permitem um controle preciso, pode-se destacar a pressão aplicada e a distância entre os passes realizados. Estes fatores dependem exclusivamente da habilidade e percepção do operador do equipamento, dificultando atingir homogeneidade na superfície gerada.

2.3 Fresamento

O fresamento é um processo de usinagem por geometria definida no qual ocorre a remoção de material bruto da peça de modo intermitente através do movimento rotativo da ferramenta de corte, normalmente multicortante, chamada de fresa (STEMMER, 1995). Tal ferramenta movimenta-se com uma determinada velocidade de avanço em relação à peça usinada.

Uma característica intrínseca do processo é que cada gume presente na fresa removerá uma porção de material da peça na forma de pequenos cavacos individuais que podem apresentar diferentes formatos (DROZDA, 1983).

Trata-se de um processo de fabricação largamente utilizado na indústria tanto de fabricação quanto manutenção. As aplicações do fresamento podem produzir uma variedade de condições superficiais tais quais como: superfícies planas, contornos, rasgos, ranhuras, cavidades e roscas, entre outras (STEMMER, 1995). Os tipos de fresamento são divididos em dois grupos principais: o periférico ou tangencial, e o frontal ou plano.

No fresamento periférico, ou também tangencial, a superfície usinada é gerada através dos gumes na periferia da fresa, sendo comumente um plano paralelo ao eixo da ferramenta. A seção transversal da geometria fresada é correspondente ao contorno da fresa ou da combinação de fresas utilizadas na usinagem (KÖNIG, 2008).

No caso do fresamento frontal, a superfície usinada é produto da ação combinada dos gumes posicionados na periferia e na face frontal da fresa, sendo esta geralmente posicionada em um ângulo de 90° em relação ao eixo da ferramenta. Geralmente, neste modelo de fresamento, a superfície usinada é plana, e não corresponde ao contorno dos gumes (KÖNIG; 2008).

O fresamento de topo é um processo contínuo, circunferencial e frontal que utiliza uma fresa de topo. Possui vantagem na execução de superfícies de forma livre, bem como na usinagem de rasgos e cortes de variados tipos e tamanhos (STEMMER, 1995).

Os gumes de corte nas fresas de topo estão presentes tanto nas faces quanto em sua periferia. Podem se apresentar com topo simples ou duplo, tendo hastes de corpo cilíndricos ou cônicos, em variadas dimensões, possuindo ainda

dois, três, quatro, seis ou mais canais, sendo que na maioria possuem geometria helicoidal (STEMMER, 1995). O topo pode se apresentar reto, semiesférico ou toroidal. As fresas de topo podem ser inteiriças, com insertos brasados ou mesmo utilizar insertos intercambiáveis. Alguns exemplos de fresas de topo são apresentados na figura 1.

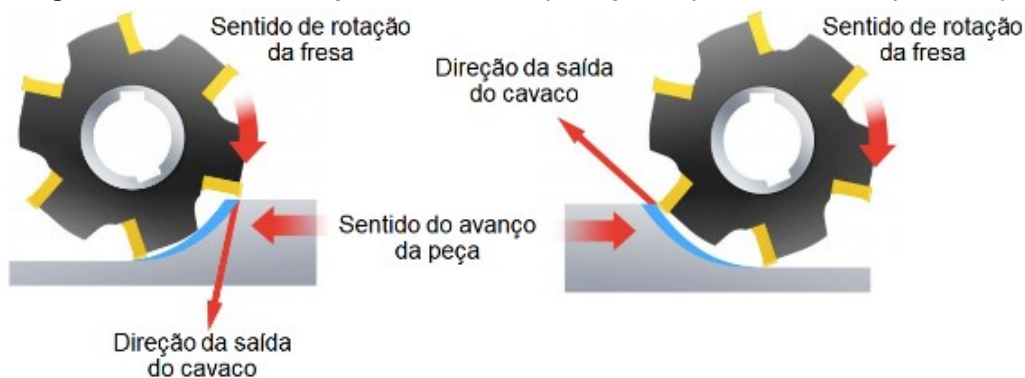
Figura 1 – Tipos gerais de fresas de topo



Fonte – Adaptado do catálogo eletrônico de (SANDVIK, 2010)

A depender da direção de corte e do avanço, classificam-se ainda o fresamento tipo concordante e o fresamento discordante. No fresamento tipo concordante, os movimentos de corte e de avanço têm, em média, o mesmo sentido, iniciando o corte com a espessura máxima de cavaco. No fresamento discordante os movimentos de corte e avanço têm sentidos opostos em média, iniciando-se o corte na espessura mínima de cavaco. Pode-se observar na figura 2, esquematicamente os fresamentos concordante (a esquerda) e discordante (a direita).

Figura 2 – Fresamento tipo concordante (a esquerda) e discordante (a direita)



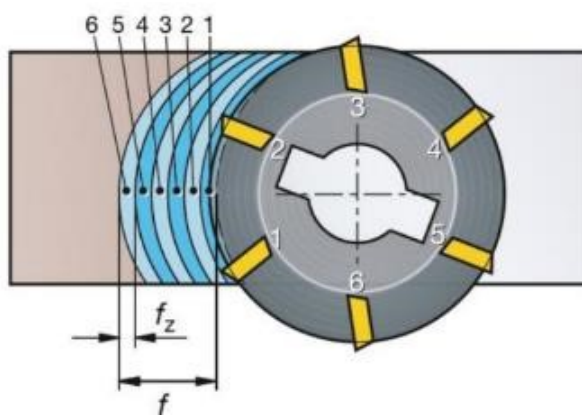
Fonte – Adaptado de SANDVIK;(2011)

Na situação do eixo médio da fresa interceptar a peça, tem-se o fresamento tipo concordante e discordante combinados. A porção externa ao eixo médio da fresa realiza movimento discordante e a porção interna ao eixo médio realiza movimento concordante. Este fenômeno ocorre principalmente nos processos de fresamento de faceamento e de topo (STEMMER, 1995).

No fresamento, as principais grandezas que definem uma boa remoção de cavaco, aliada a uma definição precisa do sobremetal a ser removido são: avanço, penetração e velocidade.

O avanço (f) é definido como o trajeto linear em milímetros, de uma volta completa da ferramenta. É estabelecido ainda o avanço por dente/gume (f_z) como sendo a distância linear percorrida por um dente da ferramenta no intervalo em que dois dentes consecutivos entram em corte, sendo medido no plano de trabalho. Visualiza-se na figura 3, a diferença de percurso linear entre os dois tipos de avanço.

Figura 3 – Representação esquemática do avanço por volta (f) e avanço por dente/gume (f_z)



Fonte: SANDVIK;(2011)

Penetração é a grandeza que descreve geometricamente a relação de profundidade entre a ferramenta de corte e a peça usinada. A profundidade de corte axial (a_p), medida de forma perpendicular ao plano de trabalho, é a profundidade da penetração da ferramenta em relação a peça. Já a profundidade de corte radial (a_e), medida diretamente no plano de trabalho e perpendicular à direção do avanço, trata da largura de penetração da ferramenta em relação a peça.

A velocidade de corte (v_c) é definida como a velocidade instantânea do ponto selecionado sobre o gume, no movimento de corte, em relação a peça. No

fresamento, o movimento de corte é proporcionado pela rotação da ferramenta. A velocidade de corte é, então, uma velocidade tangencial. A partir da v_c é calculada a velocidade de rotação (n), que determina a quantidade de voltas que a ferramenta faz por minuto junto ao eixo árvore. Por fim, a velocidade de avanço (v_f) indica a velocidade de deslocamento da fresa em direção a peça. A velocidade de avanço é dada pelo produto da rotação com o avanço total.

No fresamento, algumas características geométricas da ferramenta influenciam o resultado final do processo. São eles: o ângulo de folga, o ângulo de cunha, o ângulo de saída, o ângulo de posição, ângulo de hélice (no caso de fresas inteiriças) e o raio de ponta. As contribuições de cada aspecto são observadas no quadro 1.

Quadro 1 – Características geométricas da ferramenta de corte e influencias no fresamento

Aspecto Geométrico	Característica Funcional
Ângulo de Saída	Auxilia no escoamento do cavaco e influencia a força de corte.
Ângulo de Cunha	Garante rigidez à ferramenta, sobretudo em solicitações pesadas.
Ângulo de Folga	Reduz o atrito entre a superfície da peça e de folga.
Ângulo de Posição	Afeta espessura do cavaco, forças de corte e a vida da ferramenta.
Ângulo de Hélice	Auxilia na expulsão do cavaco e modifica os esforços axiais.
Raio de Ponta	Afeta diretamente a rugosidade gerada.

Fonte: Adaptado de (Hübner 2016)

2.4 Acabamento De Superfícies Usinadas

A qualidade superficial é um dos aspectos que indica diretamente a precisão de usinagem. Está diretamente relacionada ao estado físico-mecânico da camada superficial (integridade) e ao acabamento da superfície (textura) e afeta o funcionamento apropriado e a vida em serviço das peças.

2.4.1 Integridade

Nos processos de usinagem em geral, região da peça mais próxima da superfície externa sofre deformação plástica. Essa deformação ocorre em virtude da

entrada da ferramenta na peça usinada, do atrito entre o flanco da ferramenta de corte e da peça e também devido ao efeito do raio de ponta da ferramenta. Deste modo, a superfície mais externa à peça terá um comportamento mecânico diferenciado do material interno.

Uma parte considerável da energia requerida na usinagem é convertida em calor, que resulta em um aumento da temperatura na região de corte. No processo de fresamento, como nos demais processos de usinagem com ferramentas de geometria definida, a maior parte do calor é extraída através dos cavacos não sendo, portanto, a temperatura na superfície da peça muito elevada.

Em processos como o de retificação, onde se consome uma elevada quantidade de energia, o patamar de temperatura na superfície da peça pode atingir a temperatura crítica de transformação do material. Nestas condições pode haver mudanças metalográficas na superfície e região adjacente da peça. O calor gerado, o encruamento e tensões residuais causam variações das propriedades do material.

O encruamento da superfície externa é causado pela deformação plástica do material, resultando no aumento de sua microdureza. O calor gerado, além da possível transformação de fase, causa dilatação térmica, comprometendo a integridade dimensional da peça usinada. As tensões residuais deixadas no processo fragilizam o produto final.

2.4.2 Textura

A precisão de usinagem é dada, de forma quantitativa, através do erro de usinagem. O acabamento usinado é expresso visualmente através da textura apresentada e quantitativamente através da sua rugosidade.

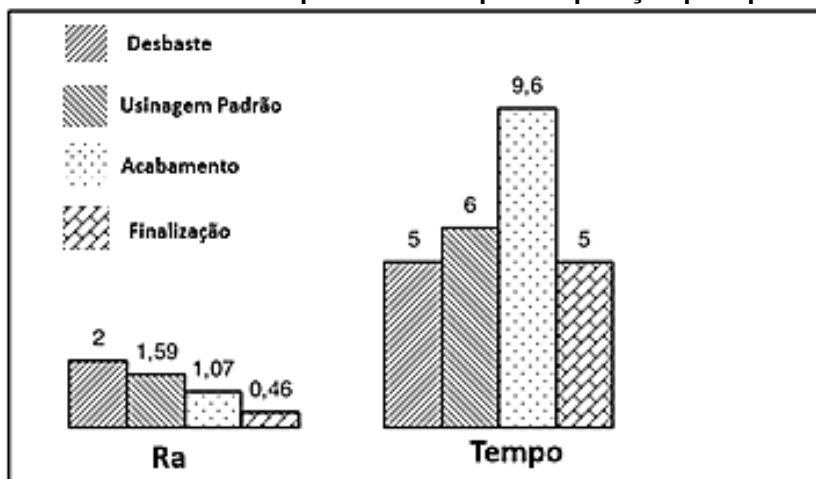
Rugosidade é um tipo de desvio microgeométrico das peças usinadas. Ela aparece em todas as superfícies, independente de quão lisas possam aparentar ser. A rugosidade influencia significativamente na performance das peças em trabalho em diversos aspectos. A fim de garantir no produto uma boa qualidade estética, extensão de sua vida em serviço e redução dos seus custos de produção, a rugosidade deve ser precisamente especificada no projeto e cuidadosamente controlada na fabricação.

A rugosidade de uma superfície fresada é gerada através de fatores geométricos (geometria da ferramenta e avanço), deformação plástica do material na superfície, vibração do sistema durante a usinagem dentre outros.

Diferentes processos de usinagem promovem diversos acabamentos de superfícies. Verificar o processo mais conveniente, que forneça o melhor resultado superficial na etapa de manutenção, é uma importante escolha no processo de manutenção (LAUWERS, 2014).

O método mais eficaz para obtenção de menores índices de rugosidade superficial é através da utilização de processos de acabamento. Uma alternativa para maior redução da rugosidade média (R_a) pode ser obtida ainda, com a utilização de processos complementares, visando o melhor acabamento superficial. Tal fato pode ser observado no gráfico 1.

Gráfico 1 – Acabamento superficial e tempo de operação para processos



Fonte: Mezlini;(2014)

Percebe-se então que processos de usinagem com complementação, como acabamento e finalização, podem melhorar a qualidade de uma superfície devido à redução de sua rugosidade.

2.4.3 Influência dos Parâmetros de Corte na Superfície Gerada

Segundo Mezlini et. al. (2014), as condições da superfície são alteradas não somente pelo processo de usinagem utilizado, mas também em grande parte pelos parâmetros de corte ajustados. Os parâmetros do processo escolhidos que não

estejam adequadamente ajustados causam perdas, como acelerado desgaste e fratura da ferramenta, além de perdas econômicas, incluindo peças deterioradas ou qualidade da superfície reduzida (GÖKKAYA & NALBANT (2006).

O acabamento da superfície apresentará características diferentes dependendo do avanço utilizado, da rigidez do sistema, dos ângulos da ferramenta, do material da peça usinada, do eventual tratamento térmico do material da peça, do material da ferramenta, do revestimento da ferramenta e fluido de corte utilizado (quando for o caso) Zhang et al. (2015). Compreender e avaliar esses parâmetros é fundamental para obter o perfil de rugosidade ideal esperado. Portanto, além da definição de um processo de fabricação específico, cabe também avaliar quais são os parâmetros de usinagem a serem utilizados de modo a otimizar o resultado final.

Apesar de não ser recomendável o uso de fluido de corte no fresamento devido à redução de vida da ferramenta de metal duro, por vezes torna-se necessário para evitar ou reduzir os desvios geométrico/dimensionais das peças pelo fenômeno da dilatação térmica, ou ainda em casos específicos que se deseje obter um perfil de rugosidade muito baixo na peça. Eventualmente o fluido tem aplicação para evitar sujeira excessiva gerada por cavacos curtos, do tipo em pó, ou de materiais como ferro fundido cinzento na máquina (DINIZ, 2006).

O controle da vibração é um fator importante para o acabamento superficial e para o bom desempenho do processo em usinagem. A vibração afeta o acabamento superficial da usinagem, a dimensão da peça bem como a estrutura da máquina. Os parâmetros de vibração e força de corte geralmente dependem das condições de fabricação, como avanço, profundidade de corte, velocidade de corte, rigidez da máquina-ferramenta e da ferramenta de corte.

Gurmeet et. al. (2010) verificou experimentalmente que com o aumento do ângulo de inclinação da ferramenta de usinagem, a rugosidade da superfície diminuiu, enquanto que com o aumento do raio de ponta da ferramenta, a rugosidade da usinagem tende a aumentar. Neşeli (2011) desenvolveu um modelo de predição de rugosidade, usando planejamento fatorial, em relação aos parâmetros de geometria de ferramenta, tendo em conta os fatores ângulo de aproximação da ferramenta, o raio de ponta da ferramenta e o ângulo de inclinação negativo.

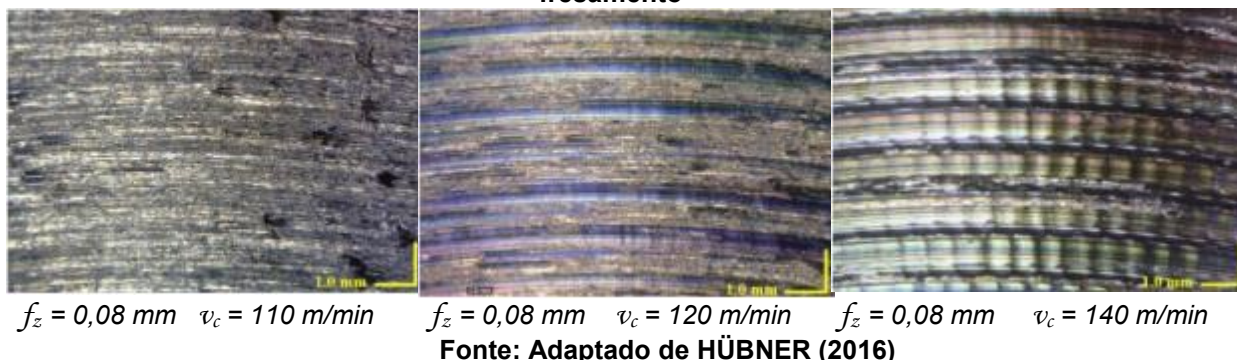
Chen, et. al (2005) determinou experimentalmente que na execução do fresamento com uma fresa de topo esférico utilizando inclinações no eixo da fresa em determinados ângulos, é observada a obtenção de menores valores de altura das marcas de usinagem, porém, ao elevar o ângulo de inclinação as alturas das marcas não se reduzem mais, mantendo-se estáveis para um determinado raio da ferramenta.

O avanço é o parâmetro que mais influência no acabamento superficial, pois a altura dos picos e a profundidade dos vales são marcas do avanço (DINIZ, 2006). Diminuir a taxa de avanço em 33% pode melhorar a rugosidade da superfície em cerca de 26% (GÖKKAYA & NALBANT, 2006).

Costa (2009) analisou o fresamento frontal em bloco de motores de ferro fundido cinzento, com ferramenta com capacidade para 50 insertos de metal duro, com 25 posições ocupadas pelas pastilhas, utilizando velocidades de corte de 250 m/min a 350 m/min e avanço por dente de 0,05 mm/dente a 0,08 mm/dente. Verificou que os valores de rugosidade eram menores para menores valores de sobremetal retirado, que levavam a menores valores de potência consumida pela máquina. Ao passo que se aumenta a profundidade de corte, há aumento nas áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário e, portanto, aumento das componentes da força de usinagem e dos níveis de vibrações. A melhor qualidade da superfície com menor consumo de energia pode ser alcançada com menor avanço e profundidade de corte (KANT G.; SANGWAN 2014).

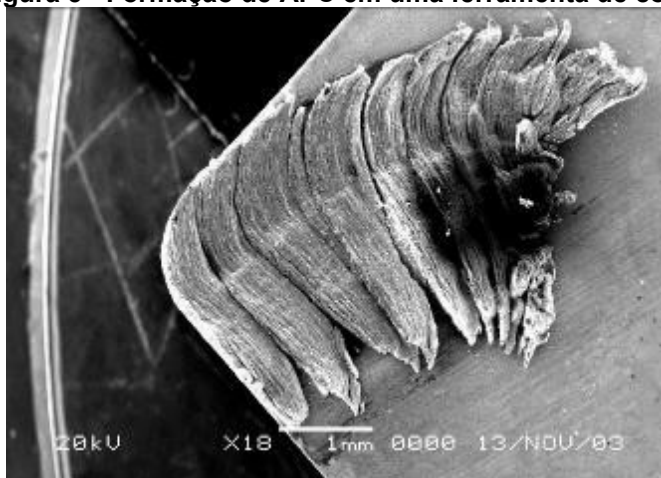
A medida em que a velocidade de corte (v_c) aumenta, há a tendência de melhorar o acabamento gerado em grande parte dos processos. Resultados experimentais encontrados por Hübner (2016) no fresamento de topo de uma amostra de aço SAE 1045, são apresentados na figura 4 e demonstram as diferentes texturas obtidas com variação da velocidade de corte, evidenciando uma melhoria da rugosidade superficial em patamares mais elevados de v_c .

Figura 4 – Diferentes texturas geradas com variação da velocidade de corte no fresamento



Em baixas velocidades de corte pode ocorrer formação da aresta postiça de corte (APC) que resulta em microrrebarbas, originadas das microtrincas responsáveis pela formação da APC, sobre a peça e tende a gerar elevados valores de rugosidade, R_a (GÖKKAYA & NALBANT (2006)). Uma visualização da APC em um inserto de corte pode ser vista na figura 5.

Figura 5 - Formação de APC em uma ferramenta de corte



Fonte: GÖKKAYA & NALBANT (2006)

No aumento de v_c é promovida a elevação da temperatura na interface cavaco/ferramenta, reduzindo assim a resistência ao cisalhamento do material da peça nos planos de cisalhamento primário e secundário, reduzindo então as forças necessárias para prosseguir o cisalhamento. A partir de determinada v_c , o material se comporta como um fluido viscoso e necessita-se somente vencer a tensão de escoamento no cisalhamento do material no plano secundário. A partir daí, a v_c não apresenta mais influência nas forças, vibrações e conseqüentemente no acabamento da superfície gerada (Trent, 2000).

Dispositivos de usinagem modernos são dotados de diversos sensores e mecanismos que permitem ao operador o controle preciso dos parâmetros de corte estabelecidos.

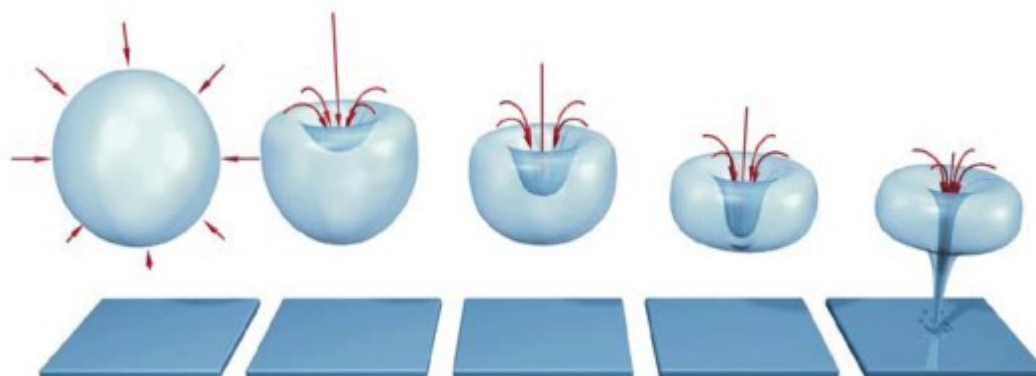
2.5 CAVITAÇÃO

A cavitação, segundo Zhang (2009), é um fenômeno no qual ocorre a formação de bolhas, ou agregados de vapor, em um fluido. Estas formações ocorrem devido a uma redução da pressão em determinado ponto do fluido, que quando movimentados, para uma região de alta pressão ou de pressão superior, se condensam. Dois métodos distintos são possíveis para a cavitação: hidrodinâmico e acústico. No fenômeno hidrodinâmico, a cavitação acontece na presença de um fluxo, enquanto que a cavitação acústica é gerada através de um campo de pressão oscilante num líquido quase estático. Embora haja diferenças nos dois fenômenos, os princípios físicos que governam os dois modos são os mesmos (BRENNEN, 1995).

Em sua teoria sobre o fenômeno cavitatório, Rayleigh (1917) admitiu que o dano por cavitação ocorria exclusivamente devido à grande pressão implosiva gerada no instante do colapso das bolhas. Tal teoria levava em consideração bolhas ou cavidades esféricas, o que atualmente compreende-se que nem sempre ocorre esfericamente.

Nos estudos de Naudè (1961), verificou-se que as bolhas se deformam durante a sua movimentação, e o dano é provocado como consequência do impacto de um jato líquido sobre a matriz. Em virtude dos gradientes de pressão e da instabilidade do fluxo, ocorre uma depressão na bolha, próximo da superfície, sendo esta depressão preenchida pelo líquido. Este processo finaliza com a passagem de um microjato líquido em alta velocidade através da região de centro da bolha. A Figura 6 ilustra a ocorrência das etapas deste fenômeno.

Figura 6 – Processo de formação e colapso das bolhas na cavitação



Fonte: Adaptado de BEN HAMIDA; (2017)

Além disso, as bolhas de vapor, também chamadas de bolhas de cavitação, rompem-se à medida que são afastadas das regiões de baixas pressões, criando assim ondas de choque altamente destrutivas que atingem pressões extremamente elevadas.

Em seu estudo, OKADA (1990) classifica os valores da pressão de colapso das bolhas dependendo do tipo de ensaio de cavitação realizado, mostrando que as variações podem atuar na faixa entre 10 MPa até 1,4 GPa. Tais variações mostram a dificuldade em se mensurar ou prever a implosão em virtude da alta taxa de ocorrência, alta velocidade implosiva e dimensões reduzidas das cavidades, dentre outros fatores (PROCOPIAK, 1997). Com a implosão e a projeção do jato em alta velocidade na superfície pode-se superar os valores de pressão limite suportada pelo material, o que provoca danos através de cavitação da superfície sólida. Conseqüentemente em virtude da ocorrência repetitiva do fenômeno envolvido no processo, inicia-se a nucleação culminando na remoção do material afetado.

A degradação da superfície surge por meio da fadiga superficial. O dano evolui pela formação de pites de erosão (*"pitting"*) bem como por meio de deslocamento de material nas zonas encruadas nos materiais maciços. O desgaste erosivo resultante deste fenômeno é chamado de erosão por cavitação, sendo responsável por elevados custos de manutenção nos mais diversos sistemas hidráulicos.

As reações dos materiais ao fenômeno da cavitação são classificadas em dois grupos, de acordo com a característica da fratura durante a cavitação. No que se refere à cavitação, os materiais dúcteis, que demonstram deformações e transformação de fase associada a pequena perda de massa em longos tempos de

ensaio, e os materiais frágeis os quais não suportam as solicitações da cavitação, evidenciando perda de massa logo nos períodos iniciais do processo. Já os materiais frágeis demonstram uma deformação inicial elevada e crescente encruamento. Nas regiões de maior acúmulo de deformação surgem então microtrincas de fadiga que dão início à formação de inúmeros pontos de depressão. Em contrapartida, nos materiais frágeis, sua menor capacidade de absorção da energia leva a formação rápida de núcleos concentradores de tensões, que dão lugar à erosão das superfícies e levam à formação de cavidades. A profundidade média de erosão está associada com os mecanismos de fratura envolvidos (POHL, 1996).

2.5.1 Desenvolvimento do Dano

Na erosão por cavitação em materiais maciços, comumente distinguem-se etapas bem definidas de acordo com a progressão do dano. São os períodos de: incubação, aceleração, atenuação e estabilização (SOUZA, 2012). No período de incubação, o colapso das bolhas ou jatos sobre a superfície ocorre previamente de forma localizada. O período de incubação consiste, portanto, na fase inicial no processo de cavitação, desenvolvido pela fadiga superficial, a qual neste estágio promove pouca ou nenhuma perda de massa.

A repetição das implosões eleva as ondulações da superfície, provocando uma deformação em grande escala, gerando mais depressões e microtrincas. Ocorre então que a superfície se deforma plasticamente aumentando rapidamente a rugosidade, sendo que a partir do encruamento superficial, com a nucleação e propagação as primeiras trincas a rugosidade dobra seu valor inicial (BOCCANERA, 1999).

Com o período de aceleração inicia-se o processo de perda de massa. Ao passo em que a superfície se mantém exposta à cavitação, as ondulações progridem dando lugar a profundas crateras, gerando ainda mais depressões. A máxima erosão ocorre quando as bordas das crateras se desprendem em partículas, sugerindo um modo de fratura dúctil.

O intervalo de atenuação tem por característica o decréscimo da taxa de perda de massa, em virtude da modificação do perfil superficial (com característica

de rugosidade acentuada) que absorve a energia gerada no processo, atenuando deste modo a taxa de erosão. O último período que compreende a fase de estabilização apresenta a taxa de erosão constante e com magnitude inferior àquela visualizada no período anterior, em virtude dos líquidos e gases que ficam aprisionados nas crateras, corroborando para diminuir a ação das implosões ou microjatos. A evolução da cavitação ocorre em etapas definidas, sendo a incubação, aceleração, atenuação e estabilização.

Um ponto importante a ser determinado é o tempo de incubação nominal que é determinado através do cruzamento da linha tangente da curva de máxima perda de massa com a abcissa do gráfico. Alternativamente o tempo de incubação típico pode ser determinado pela variação brusca na curva de perda de massa acumulada. No gráfico 2 são apresentadas as etapas iniciais (incubação e aceleração) em sua curva típica de ocorrência, bem como é ilustrada a metodologia utilizada para determinação do período de incubação nominal e típico.

Gráfico 2 – Curva de perda de massa na cavitação demonstrando os estágios de incubação e aceleração e evidenciando a determinação do período de incubação



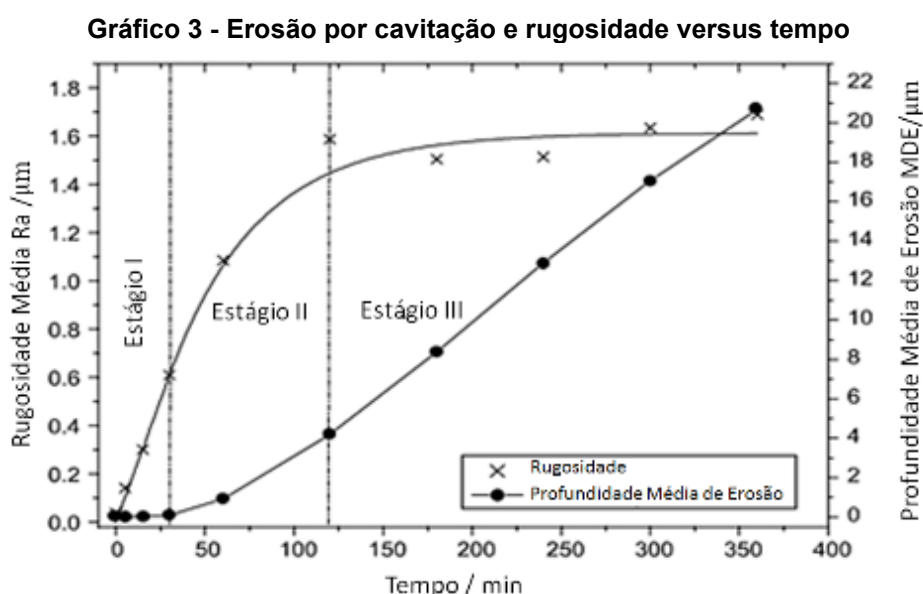
Fonte: Adaptado de Cruz; (2016)

No comportamento fluidodinâmico, a rugosidade superficial altera significativamente o comportamento da zona de arraste do fluido em contato com a pá, que por sua vez tende a gerar zonas com diferenciais de pressão as quais

acabam dando origem ao fenômeno da cavitação, onde durante seu aparecimento leva à erosão da superfície da turbina.

Uma clara relação das rugosidades superficiais médias versus à perda de massa associada à erosão por cavitação através de ensaio de tempo, é citada por Chiu et al. (2005) que submeteu dois materiais com diferentes perfis de Ra ao ensaio de cavitação, padronizado pela norma ASTM G32 (2006). A modificação do perfil rugoso é dependente da dinâmica da cavitação, sendo perceptivelmente alterada nos estágios de incubação e no período de aceleração da cavitação. São destacados 3 períodos de modificação do perfil rugoso respectivamente associados com os períodos de incubação aceleração e atenuação da cavitação.

Nota-se que um grande salto de rugosidade é observado nas etapas iniciais do ensaio de cavitação, estabilizando após o fim do estágio de aceleração, como mostra o gráfico 3.



Fonte: Chiu; (2005)

A alteração do perfil ocorre, dentre outros aspectos, pela redução substancial de material presente na amostra, criando microgeometrias mais discrepantes que elevam a rugosidade média. Como sugere Bordeasu et. al (2016) a rugosidade da erosão por cavitação pode ser usada como um método suplementar para confirmações a respeito do comportamento da cavitação. A escolha de um parâmetro de rugosidade adequado é, portanto, um importante passo para o

acompanhamento do processo erosivo no fenômeno da cavitação, sendo complementar a perda de massa (AHMED, 1990).

O fenômeno de cavitação, portanto, produz efeitos indesejáveis e agressivos. Escaler et al. (2006), comenta que a cavitação pode se apresentar de formas diferentes dependendo do projeto da máquina e da condição de operação, resultando assim em altos níveis de vibração, instabilidades e erosão, o que invalida o funcionamento e provoca graves prejuízos. A cavitação é muito mais intensa em equipamentos submetidos a sobrecarga, validada em um estudo numérico por elementos finitos (GOHIL & SAINI, 2016). Nota-se então que, limitar o processo de cavitação é de fundamental importância para avaliação da resistência do material sujeito ao fenômeno, e a avaliação da erosão demonstra ser o fator mais crítico para sua falha.

Segundo Kang (2017), nem toda a cavitação gera, de fato, erosão de material. Esta dependerá das características (tenacidade a fratura, microestrutura, acabamento superficial entre outros fatores) dos materiais utilizados na construção, bem como da intensidade do colapso das bolhas. Em virtude disto, mesmo com a ocorrência do fenômeno não há ainda relação entre a taxa de perda de material ou mesmo a perda do rendimento potencial hidráulico, dado que a vazão pode decrescer relativamente pouco em função da extensão do dano. Em contrapartida, para a manutenção, o custo de reparo pode ser relativamente maior quando é detectada perda de rendimento no equipamento. Com o advento das novas tecnologias, novos modelos de sensoriamento, metodologias e padronizações de ensaios, soluções alternativas mais próximas da realidade são buscadas a fim de avaliar a cavitação e seus efeitos erosivos.

No que se refere ao projeto de componentes hidráulicos, é de fundamental importância levar em consideração os efeitos da cavitação. A geometria da superfície tem seu comportamento alterado quanto ao surgimento da cavitação dependendo do ângulo de ataque, podendo esta ser reduzida a médio prazo, porém não eliminada. Uma metodologia inicial de projeto deve ser adotada com base em testes práticos e simulados computacionalmente para que se possa obter o máximo desempenho em termos de tempo livre de cavitação (CELEBIOGLU, 2017).

Por outro lado, na abordagem determinística atual não são fornecidas informações suficientes para o projeto completo de pás de turbinas sobre a cavitação. Neste modelo de projeto, uma abordagem baseada na combinação de

estimativa probabilística do tempo esperado de exposição à cavitação e um modelo para a predileção do dano induzido pela cavitação no material da pá é bastante útil, porém para implementar esta abordagem, são necessários também modelos de danos materiais por cavitação (CHERNIN, 2017).

A fim de se minimizar os efeitos da erosão por cavitação deve-se evitar que as zonas de baixa pressão entre os fluxos líquidos, ocorram junto das superfícies sólidas. Isso pode ser definido na fase de projeto da instalação, definindo os componentes hidráulicos com índice de Thoma baixos, o que por vezes é economicamente pouco viável, já que as técnicas de aumento do índice acarretam num maior afogamento de turbina, onerando a construção ou elevando o nível a jusante, parte de baixo do rio por onde escoar a água através das comportas ou dos canais extravasores, diminuindo deste modo a altura total e como consequência a redução de potência disponível do sistema.

A fim de se evitar as zonas de baixa pressão, sobre a superfície sólida, pode-se modificar o perfil das pás do rotor, fazendo com que, apesar da existência de cavitação, esta venha a evidenciar-se longe da superfície maciça, não levando, portanto, a erosão. O projeto é comumente verificado junto à utilização de ensaios de modelo da turbina, identificando visualmente a geração de cavitação. Com as alterações dos perfis se evita ou se diminui o aparecimento das zonas com baixa pressão próximas da superfície maciça (SOUZA, 2012).

2.5.2 Técnicas de Avaliação da Cavitação

Tratando-se da cavitação que ocorre em equipamentos hidráulicos de forma “natural”, é inviável a reprodução fidedigna do fenômeno em laboratório devido a necessidades de longos períodos de tempo e um aporte significativo de recursos monetários. Visando acelerar o processo para viabilizar os estudos foram desenvolvidos ao longo dos anos, modelos e protótipos de máquinas reais além de várias técnicas e dispositivos para gerar em laboratório, nível de cavitação controlada, para reprodução acelerada do fenômeno.

As principais técnicas utilizadas são: o método de Venturi, a metodologia do disco rotativo, o aparato de jato cavitante e o método vibratório. O método vibratório tem a característica de ser mecanicamente o mais simples, financeiramente o mais

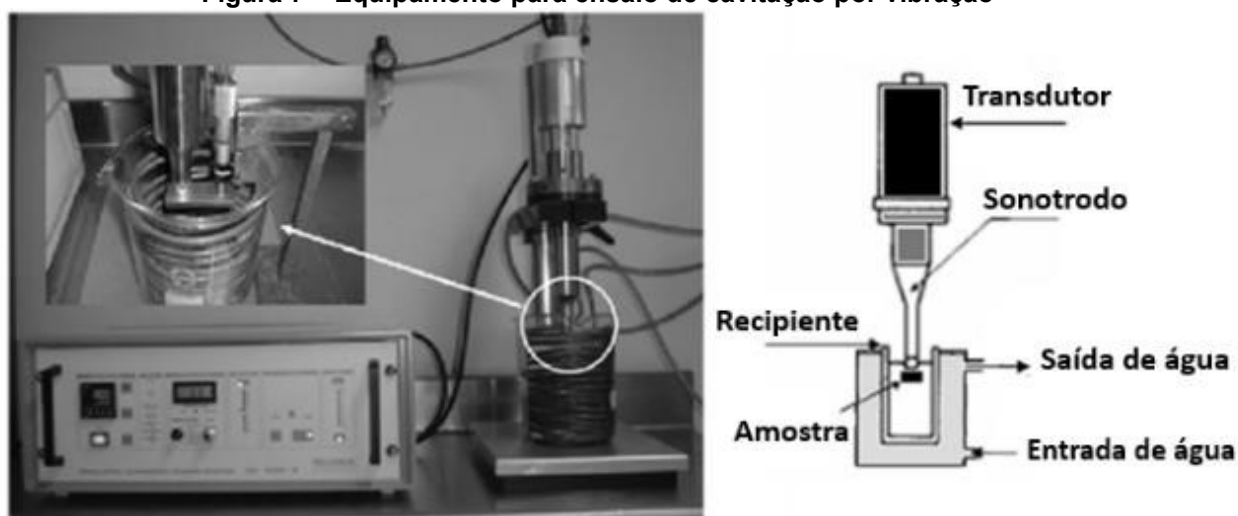
barato e rotineiramente o mais utilizado nos ensaios de cavitação. O experimento encontra-se normalizado através da norma ASTM G32 (2006).

O dispositivo para o ensaio no método vibratório é constituído por diferentes componentes, dentre os quais se destacam: um conversor eletroacústico que comporta um transdutor comprimido entre duas massas metálicas; um gerador de corrente, de potência regulável, acoplado a um dispositivo de controle de frequência de ressonância do equipamento eletroacústico; um amplificador metálico que transmite e amplifica as vibrações originadas do transdutor; um sonotrodo que tem por função amplificar e transmitir as vibrações oriundas do amplificador; um sistema de isolamento acústico; um sistema de refrigeração para o controle de temperatura ao longo do ensaio; um sensor que permita o controle de amplitude.

Os corpos de prova, geralmente cilíndricos, são fixados diretamente ao sonotrodo no método direto, ou acoplados em um porta-amostra abaixo do mesmo método indireto, que oscila à alta frequência e baixa amplitude. Estes corpos de prova, em geral no formato cilíndrico, estão imersos normalmente, em água. A oscilação gerada cria alternadamente zonas de alta e baixa pressão na região superior do corpo de prova, levando ao surgimento de bolhas e posteriormente a sua implosão.

Uma visualização do esquema do aparato bem como do equipamento utilizado no ensaio de cavitação vibratório é mostrada na Figura 7.

Figura 7 – Equipamento para ensaio de cavitação por vibração



Fonte: Adaptado de Santa et. al. (2011)

O método vibratório é uma das técnicas mais tradicionais de ensaio por cavitação. Suas vantagens incluem a fácil operação deste tipo de equipamento, o menor tempo de ensaio necessário, e o custo reduzido em comparação a outras técnicas. Ainda se destaca o fato do melhor controle dos parâmetros neste modelo de ensaio.

2.6 FATORES QUE AFETAM A RESISTÊNCIA A CAVITAÇÃO

Os principais fatores que afetam a resistência à cavitação em materiais são discutidos a seguir.

2.6.1 Acabamento Superficial

Melhores acabamentos superficiais tendem a aumentar o período de incubação, minimizando a taxa de erosão. Poros e riscos são localizações preferenciais que tendem a acelerar a nucleação e a propagação de trincas que surgem por meio da fadiga superficial (BOCCANERA, 1999). O bom acabamento superficial é diretamente afetado pelo método utilizado, porém também pode vir a ter influência da composição química do material.

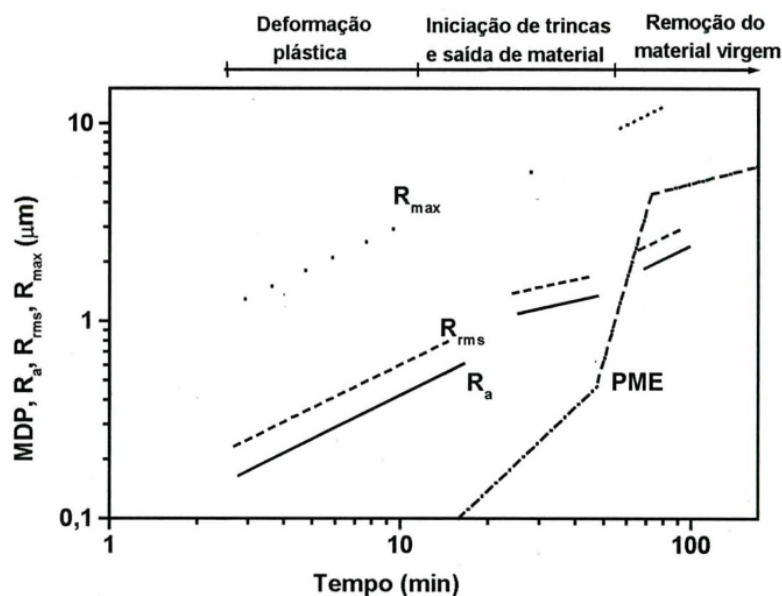
A rugosidade superficial é conhecida por ser um dos principais parâmetros (juntamente com o nível de turbulência inicial e a distribuição de pressão na superfície do componente) que governam a cavitação hidrodinâmica. Em superfícies mais rugosas (ásperas) uma cavidade anexa é desenvolvida ao longo da superfície ao passo que a interação e o movimento dos fluxos do lado da pressão na sucção trazem a água líquida do lado da pressão para o lado de sucção da pá, formando o jato. Este move-se ao longo da superfície até a borda principal, resultando no aparecimento de bolhas em larga escala (HAO, 2017). O autor ainda complementa que para o mesmo tempo de ensaio em superfícies lisas e rugosas, o perfil áspero tende a erodir muito mais aceleradamente que o perfil liso.

O valor do parâmetro de rugosidade média é inversamente proporcional ao número de picos ao longo de um comprimento de avaliação em uma superfície de folha: quanto menor a rugosidade superficial média, maior é o número de picos. Em

geral, o comprimento da região cavitada expande-se com um aumento de rugosidade como relata Churkin et al. (2016).

Segundo Luo (2016), riscos e porosidade apresentam-se como um concentrador de tensões equivalentes a um entalhe, sendo que estas regiões são preferenciais para o início e proliferação do processo de cavitação. Quanto à porosidade, os efeitos de aceleração da erosão são mais pronunciados, pois se verifica uma considerável redução ou até uma extinção do período de incubação. Nos revestimentos depositados por processo de soldagem, o uso de parâmetros adequados e deposição realizada por um operador experiente tendem a minimizar o aparecimento de poros. Processos de pós processamento como fresamento, esmerilhamento e polimento vem a contribuir para a melhora da superfície. Ademais, um elemento utilizado a fim de melhorar o acabamento de revestimentos, é o silício. Sua adição no material aumenta a fluidez do metal fundido resultando assim em uma melhor fluidez.

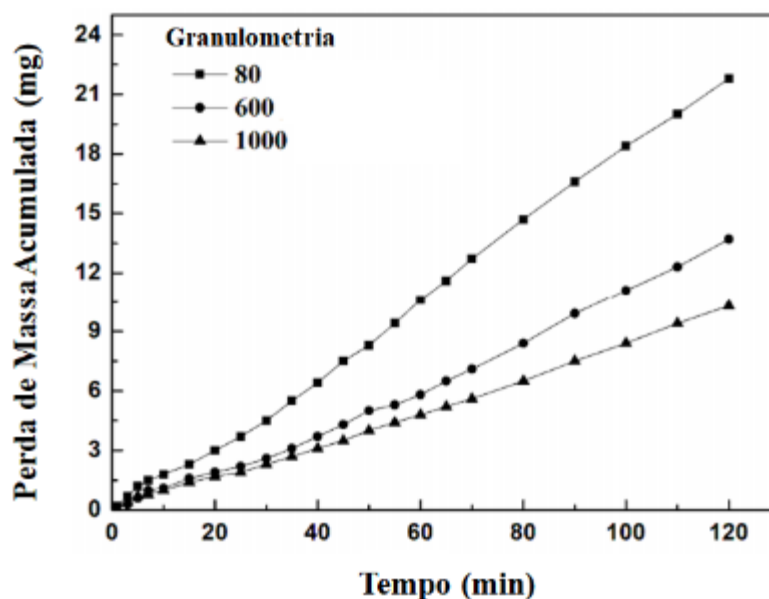
No regime permanente, onde todo o material de origem é removido, a rugosidade quadruplica seu valor original. Ahmed (1990) desenvolveu, através da realização de ensaios de cavitação acelerada pelo método indireto em um aço inoxidável, uma análise relativamente precisa dos estágios de erosão feita através do uso dos parâmetros de rugosidade média, rugosidade média quadrática e utilizando também a altura máxima do perfil. O autor concluiu que a altura máxima do perfil de rugosidade, ao longo do comprimento de medição, ("Rz") é um parâmetro mais sensível para a descrição das mudanças, especialmente quando a profundidade média de erosão (PME) é mais severa conforme observado no gráfico 4.

Gráfico 4 - Mudanças na PME, R_a , R_{rms} e R_{max} na superfície de um aço 304 sujeito a cavitação

Os diferentes parâmetros de rugosidade podem servir para análises distintas quanto aos resultados da cavitação acelerada. Kumar et al. (2014) afirma que o processo de erosão no estado estacionário é caracterizado por um aumento linear no parâmetro de rugosidade superficial R_v e uma mudança de taxa de remoção de material mais baixa no volume de superfície e parâmetro de rugosidade total $R_{máx}$.

Em um estudo sobre a influência da rugosidade inicial na resistência a cavitação em revestimentos amorfos e nanocristalinos ferrosos, aspergidos a arco, Lin et. al. (2017) utilizou uma metodologia que envolvia 3 diferentes granulometrias de lixamento posterior ao processo de aspersão. Nas suas conclusões, os revestimentos submetidos ao lixamento com tamanho de grãos menores (que geram superfícies mais lisas) obtiveram o melhor resultado em termos de perda de massa acumulada como é mostrado no gráfico 5.

Gráfico 5 – Perda de massa em um revestimento aspergido a arco, submetido a diferentes granulometrias de lixamento



Fonte: Adaptado de Lin et. al.; (2017)

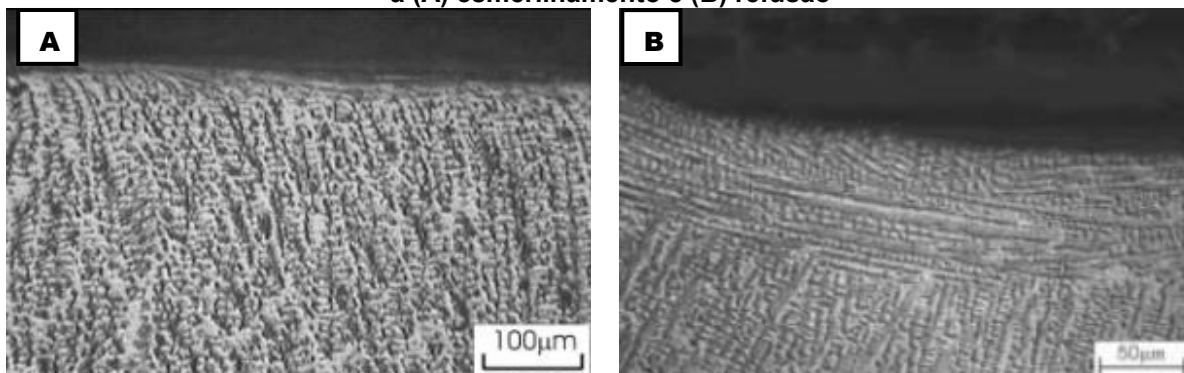
2.6.2 Refinamento Microestrutural e Encruamento

O refinamento da microestrutura pode contribuir para o aumento do tempo no estágio de incubação e redução da taxa de erosão acumulada. Contornos de grão tendem a funcionar como obstáculos ao escorregamento de discordâncias, que levam a propagação das trincas induzidas pela cavitação, minimizando assim a taxa de erosão.

Basicamente verificado no processamento, o encruamento que ocorre anteriormente à cavitação, em aços inoxidáveis austeníticos, contribui de forma significativa para a alteração do período de incubação e mudança da taxa de erosão. A menor resistência à deformação plástica induzida por encruamento, leva a quase extinção do período de incubação. A variação na máxima taxa de erosão, por sua vez, é associada à mudança no mecanismo de erosão (MESA, 2011).

Procopiak (1997) conclui em seu estudo que as técnicas de revestimento por solda produzem uma orientação preferencial dos cristais (textura metalográfica) na camada de revestimento. A metalografia observada na figura 8 demonstra que diferentes técnicas de acabamento alteram essa orientação conduzindo a uma alteração na microestrutura observada.

Figura 8 – Diferentes orientações dos cristais observadas no revestimento soldado submetido a (A) esmerilhamento e (B) refusão



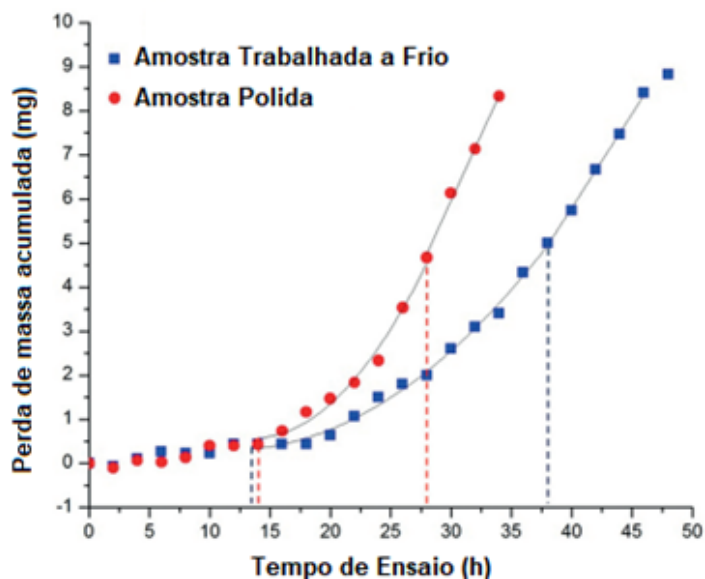
Fonte: Procopiak, (1997)

Essa orientação confere alterações no comportamento de erosão por cavitação. O refinamento da microestrutura esconde a extensão da falha de empilhamento, também reduz a quantidade de transformação de fase, aumentando assim o período de incubação (PROCOPIAK, 1997).

O trabalho a frio na usinagem pode aumentar indiretamente o tempo de incubação nominal e reduzir a taxa de erosão máxima devido a formação de estrutura martensítica. Plesset & Ellis (1995), durante investigação sobre o mecanismo de danos por cavitação em materiais policristalinos e puramente monocristalinos, concluíram que os danos resultantes da deformação plástica induzido pelo trabalho a frio levavam à falha por fadiga sob tensão devido aos repetidos colapsos das bolhas de vapor.

Cruz et. al. (2016) verificou em um estudo com materiais trabalhados a frio, que a estrutura deformada produzida pela usinagem no comportamento da erosão da cavitação de um revestimento de aço inoxidável FeCrMnSiB estendeu o período de aceleração durante a erosão por cavitação. Essa ampliação contribuiu aumentando a resistência geral à cavitação da superfície, além de adiar o início da taxa máxima de erosão, elevando indiretamente o tempo de incubação nominal. Conforme visto no gráfico 6, pode ser observado que a evolução da perda de massa para uma amostra polida é mais acelerada que numa amostra submetida a trabalho a frio (CRUZ et al., 2016).

Gráfico 6 – Perda de massa acumulada para as amostras polida e trabalhada a frio evidenciando alteração do período de incubação

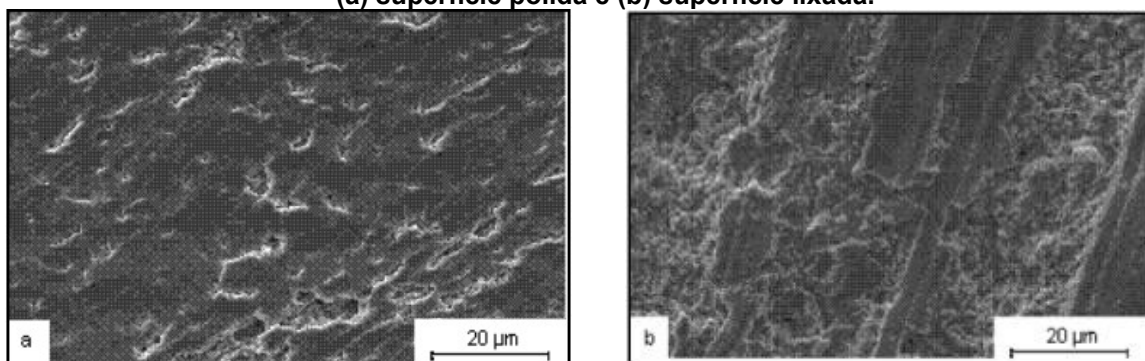


Fonte: Adaptado de CRUZ, et. al. (2016)

Nos aços inoxidáveis austeníticos ligados ao cobalto, o efeito do refino microestrutural é evidenciado no aumento do estágio de incubação associado à maior intensidade de transformação de fase da austenita- γ em martensita- ϵ (BOCCANERA, 1999) e ao atraso no início da transformação martensítica (XIAOJUN, 2003). A baixa energia de falha de empilhamento desses materiais também favorece tanto a transformação martensítica quanto a capacidade de encruamento e absorção de energia.

Essa transformação de fase também é alterada em função do tipo de acabamento realizado, modificando o aspecto superficial da região submetida a cavitação como observado na figura 9 para amostra polida e lixada.

Figura 9 – Micrografias mostrando os aspectos das superfícies após 10 horas de ensaio para (a) superfície polida e (b) superfície lixada.



Fonte: BOCCANERA, et. al. (1999)

Junto ao refino da microestrutura, uma elevação da espessura de camada refinada, também eleva a resistência à cavitação. O refino microestrutural é, portanto, função tanto da composição quanto do processamento.

2.6.3 Propriedades Mecânicas

Correlações adequadas das propriedades mecânicas com a resistência à cavitação são obtidas exclusivamente para classes de materiais similares. Dentre classes de diferentes materiais, a resistência à cavitação apresenta correlação adequada com a capacidade de encruamento (CHANG, 2006; LUO, 2016) e com a energia da falha de empilhamento.

Xiaojun (2002) comenta que a resistência à erosão por cavitação não está relacionada necessariamente com a dureza de uma superfície. As superfícies refundidas mostram uma resistência à cavitação melhorada em comparação com as superfícies alisadas num primeiro momento (estágio de incubação). Por outro lado, Kishor et al. (2014) apresenta dados de melhoria na resistência à cavitação de um espécime de aço martensítico processado termo-mecanicamente, justificando tal fato a um aumento de dureza, que prolongaria o tempo de incubação. Presume-se então que não há definições completamente estabelecidas com relação à dureza e à resistência à cavitação. Apesar disso, Hattori (2003) estabeleceu em seu estudo correlação probabilística entre a resistência a erosão normalizada de aços ao carbono, e a dureza Vickers, dada pela equação 2:

$$(N_e)_X = 2,1E - 06 \cdot HV^{2,4} \quad (2)$$

onde:

E representa o módulo de elasticidade do material

HV é a dureza Vickers dos aços carbono

$(N_e)_X$ é a resistência a erosão normalizada

Quanto mais próximo de 1 for o resultado da resistência normalizada, maior é a probabilidade de ocorrência da cavitação. Ressalta, porém, que tal relação é válida para o ferro e o aço carbono.

Quando se compara materiais de classes diferentes, esta equação que correlaciona a dureza não é muito satisfatória, indicando que as propriedades mecânicas, de forma isolada, não definem a resistência à cavitação (PUKASIEWICZ, 2008). Isso é corroborado por Franc et al. (2012) que concluiu em seu estudo que os danos causados pela erosão (deformação permanente) durante o período de incubação não estão correlacionados de forma simples ao limite elástico dos materiais determinado a partir de ensaios convencionais de tração, levando a necessidade de uma avaliação mais específica.

2.6.4 Energia de Falha de Empilhamento (EFE)

Os metais com estrutura CFC e HC formam-se por meio de uma sequência de empilhamento dos planos atômicos compactos, que são arranjados pelo espaço. Em algumas ocasiões existe a ocorrência de falhas nas sequências de empilhamento dos planos devido a deformação plástica ou formação de aglomerados de defeitos criados, dentre outras maneiras, por têmpera ou irradiação do material com partículas pesadas de alta energia. A energia de falha de empilhamento (EFE) pode ser determinada por meio da medição da distância entre as discordâncias parciais. A distância de equilíbrio de separação entre duas discordâncias reflete o balanço entre a força de repulsão das parciais e a associada EFE. A energia de falha de empilhamento é tanto maior quanto menor for a distância entre as discordâncias parciais.

Materiais com baixa EFE tendem a possuir maior resistência à cavitação (SIMONEAU, et al 1987). Nos materiais com baixa EFE, as discordâncias parciais apresentam-se geralmente bem separadas, com uma maior área de falha de empilhamento. A tensão que é necessária para recombinar tais discordâncias parciais será dependente da distância de separação entre elas, que dependerão da magnitude da energia de falha de empilhamento. Nos materiais desse tipo a distribuição das discordâncias surge de forma mais homogênea, ocorre uma menor tendência à formação de células de discordâncias, o deslizamento cruzado é restrito,

uma maior resistência mecânica, baixa taxa de fluência, e a uma maior suscetibilidade à formação de martensita induzida por deformação, como no caso de aços inoxidáveis austeníticos (PROCOPIAK, 2000).

2.7 RECUPERAÇÃO DE TURBINAS

Conforme é colocado por Kumar, Saini (2010), a recuperação de turbinas cavitadas normalmente é realizada dentro da própria casa de máquinas da usina hidrelétrica, exigindo assim a parada total daquela unidade geradora. As áreas cavitadas são limpas e em sequência é depositado um material resistente à cavitação, usualmente pelo processo MIG/MAG (metal inerte gás e metal ativo gás), pela sua elevada taxa de deposição se relacionado a outros métodos. Nesta técnica a superfície externa fica com aspecto grosseiro, com áreas de crista elevadas, ainda se visualizando uma elevada taxa de porosidade no interior da solda. Por isso, uma etapa de esmerilhamento posterior é realizada para que esta superfície seja homogeneizada conforme visualizado na fotografia 1.

Fotografia 1 – Esmerilhamento de uma turbina hidráulica



Fonte: Souza; (2012)

O processo é aplicado com o objetivo de melhorar o acabamento da superfície, porém, mesmo com essa etapa de acabamento a rugosidade superficial continua elevada. O esmerilhamento é um processo de usinagem por geometria de

ferramenta não definida, que consiste na remoção de material resultante da ação abrasiva dos grãos de alta dureza unidos a um ligante.

A pressão quando se deseja remover grande quantidade de material é aplicada de forma mais intensa, sendo reduzida no caso da necessidade de se obter um acabamento mais fino, devendo se evitar o tempo de exposição, que aumenta a temperatura e pode danificar o ligante. Quanto mais constante a pressão de operação, melhor o resultado final obtido.

A velocidade de rotação do rebolo preferencialmente deve ser bastante elevada a fim de melhorar a remoção de material. Tal parâmetro é limitado as características do equipamento utilizado, sendo que muitas vezes não é possível aumentá-la ou diminuí-la.

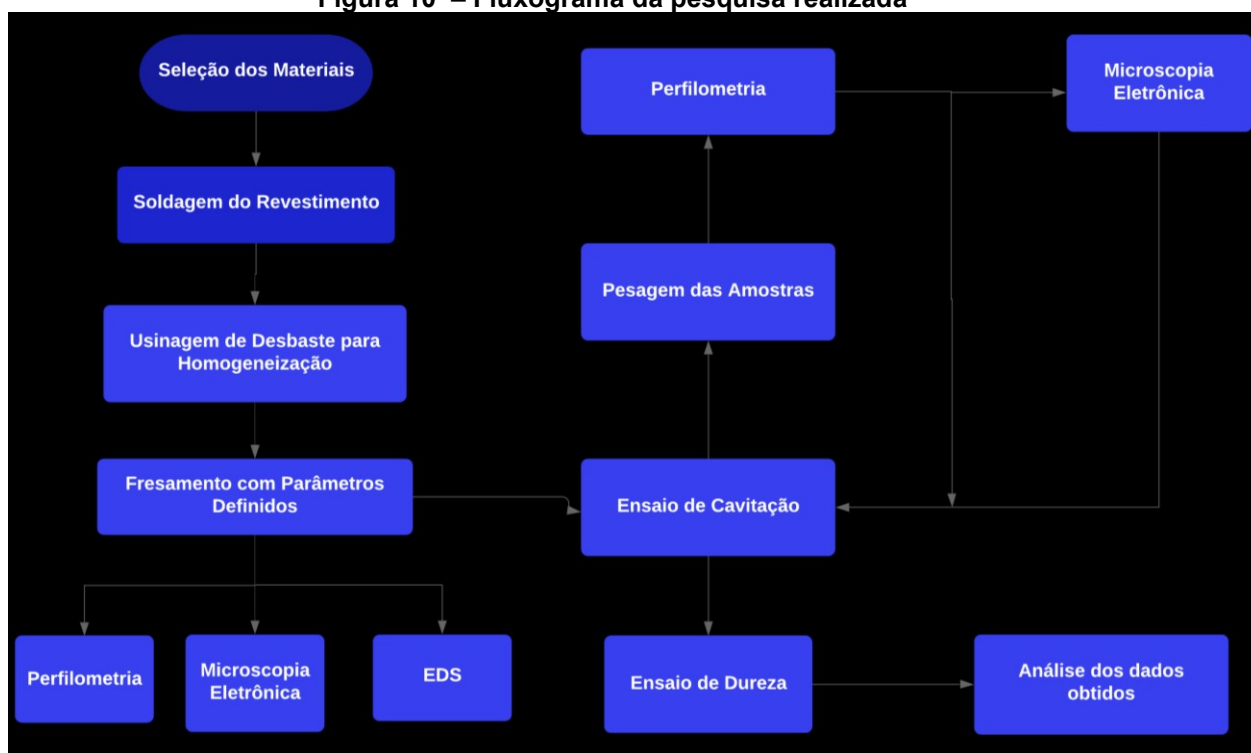
Os passes mais distantes proporcionam surgimento de heterogeneidades, que acentuam o caráter rústico do processo. Uma maior quantidade de passes resulta em um melhor acabamento superficial, mais homogêneo, porém demanda de um tempo maior de processamento. A combinação dos parâmetros é fundamental para obtenção do resultado desejado. Acabamentos mais finos necessitam de um maior número de passes aliado a alta rotação do equipamento e de uma baixa pressão de operação (DINIZ, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O caráter técnico da presente pesquisa é experimental. A realização procedeu-se de forma aplicada tendo como foco principal um problema de natureza quantitativa-qualitativa. Os materiais selecionados para o estudo foram o aço ASTM A743 CA6NM como substrato bem como o revestimento a base de cobalto CaviTec®, depositado a partir do processo de soldagem MIG.

A prática consistiu na deposição do revestimento sobre o substrato, seguindo-se do fresamento frontal de topo em um centro de usinagem tendo como característica a variação dos parâmetros de corte, da ferramenta utilizada e de seu caráter (nova ou desgastada), para permitir a comparação dos efeitos em relação a uma superfície polida, referência nos estudos sobre cavitação. Os procedimentos da pesquisa são descritos através do fluxograma visualizado na figura 10.

Figura 10 – Fluxograma da pesquisa realizada



Fonte: Autor

3.1 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram previamente selecionados a partir de um blank disponibilizado para o estudo.

3.1.1 Preparação dos Corpos de Prova

O material estabelecido como substrato no ensaio é o aço inoxidável ASTM A743-CA6NM, que possui dureza média de 290 ± 2 Vickers. Este material foi utilizado para a construção do substrato dos corpos de prova, sobre o qual depositou-se um revestimento resistente à cavitação a base de cobalto (CaviTec®), com dureza média de 400 ± 2 Vickers. A composição básica do material de revestimento e do substrato utilizado é descrita na Tabela 1.

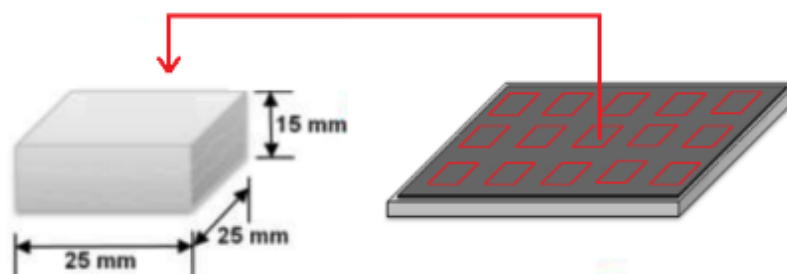
Tabela 1 – Composição química (% em peso) dos materiais utilizados

	C	N	Si	Mn	Cr	Ni	Co	Mo	V	P
CaviTec®	0,21%	0,20%	3%	10%	17%	0,12%	9%	-	0,06%	0,03%
Aço CA6NM	0,6%	-	1%	1%	14%	4,5%	-	0,7%	-	0,04%

Fonte: Fedument, (2010)

Com o material de deposição e substrato definidos, realizou-se então a geração das amostras, consistindo no processo de corte de seções da superfície. O blank foi dividido em segmentos de 25mmx25mmx15mm conforme ilustrado na figura 11.

Figura 11 – Divisão da chapa em porções de material para preparação das amostras



Fonte: Autor

Cada amostra recebeu 2 passes de soldagem sob a superfície. Com o objetivo de se assemelhar a uma manutenção real, a deposição por soldagem dos

revestimentos foi realizada com auxílio da técnica MIG (*metal inert gas*). Os parâmetros utilizados no processo são descritos na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros da deposição por soldagem do revestimento

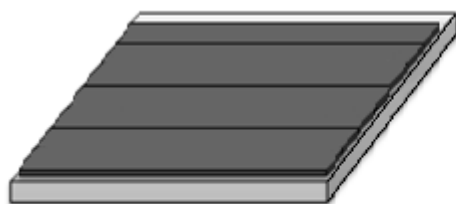
Parâmetro	Especificação
Processo	MIG/MAG
Tensão	22 V
Velocidade de alimentação do arame	1,5 m/min
Número de passes	2
Direção	Ascendente
Velocidade de soldagem	0,25 m/min
Tipo do gás de proteção	Ar – 2% O ₂
Vazão do gás de proteção	15 L/min

Fonte: Autor

Para uma deposição por soldagem de maior precisão, houve o auxílio de uma guia com controle de velocidade (Tartilope), com objetivo de tornar o cordão de solda em cada passe mais homogêneo. Realizou-se o controle da temperatura da peça entre passes para minimizar a possibilidade de ocorrência de trincas a frio durante o processo de deposição. O controle foi realizado pelo acompanhamento da temperatura da peça a cada passe de solda, com auxílio de um termopar.

Uma etapa posterior de usinagem de desbaste se fez necessária para uniformizar a superfície, permitindo assim a produção das amostras de ensaio. Uma ilustração do resultado do processo pode ser visualizada na figura 12.

Figura 12 – Corpo de prova antes e após passe de homogeneização



Deposição dos Cordões de Solda



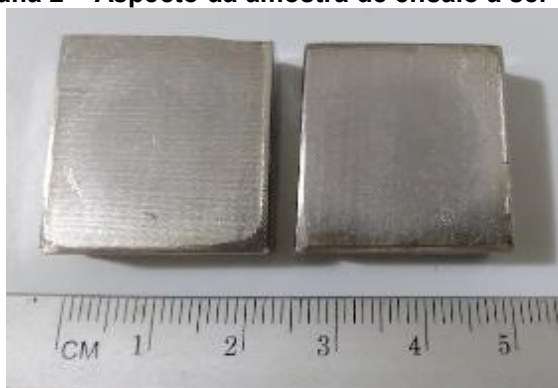
Usinagem de desbaste para homogeneização

Fonte: Autor

3.2 AMOSTRAS DE ENSAIO

O fresamento de acabamento ocorreu na superfície de cada porção de material, previamente esquadrejado e homogeneizado, sendo visualizado na fotografia 2 o aspecto da amostra de ensaio após fresamento.

Fotografia 2 – Aspecto da amostra de ensaio a ser cavitada



Fonte: Autor

No fresamento de superfícies planas utilizando fresas de topo esférico, não se têm apenas formação geométrica através da trajetória da ferramenta. Em virtude da variação da velocidade periférica ao longo do raio da ferramenta, duas formas de trilhas distintas podem surgir. A adoção de fresas de acabamento do tipo *Ball Nose* na usinagem de superfícies planas promove então uma formação superficial do tipo esculpida. A escolha pelo tipo de ferramenta se justifica em virtude de a superfície da pá da turbina apresentar uma geometria complexa, sendo o modelo *Ball Nose* o mais adequado para a usinagem de tais superfícies. No que se refere a geometrias planas, objeto do estudo, este tipo de ferramentas apresentará o pior resultado de usinagem possível para um acabamento superficial baseado na topografia.

Utilizou-se dois tipos de fresas de topo esférico, com diâmetro de corte de 12mm, tipo *Ball Nose*, as quais são: (A) inserto intercambiável de 2 arestas de corte, (código do fabricante R216F-1230 E-L 1010) e (B) cabeça intercambiável com 4 arestas de corte, (código do fabricante 316-12BM440-12060G 1030). As fresas utilizadas nesta pesquisa são ilustradas na figura 13.

Figura 13 – Fresas utilizadas nos ensaios: (A) Inserto intercambiável (B) Cabeça intercambiável



Fonte: Adaptado de SANDVIK (2011)

Os dados técnicos fornecidos pelo fabricante para cada ferramenta são descritos no quadro 2.

Quadro 2 – Dados técnicos das ferramentas de corte utilizadas

	Inserto Intercambiável	Cabeça Intercambiável
Arestas de Corte	2	4
Ângulo de Saída	0°	10,5°(radial) 1,5° (axial)
Ângulo de Hélice	-	40°
Ângulo de Inclinação	-3° a 3°	-15° a 15°
Raio de Ponta	6 mm	6 mm

Fonte: (SANDVIK 2011)

As ferramentas foram utilizadas para gerar as superfícies das amostras, novas e desgastadas: inicialmente fresamento contínuo (com as ferramentas na condição nova de fábrica) até obtenção do desgaste de flanco em 0,2 mm, e posteriormente (após obtido o desgaste esperado) usinagem de acabamento nas superfícies das amostras de ensaio. Utilizou-se também fresas de topo com inserto intercambiável e cabeça intercambiável, de mesma especificação, na condição nova de fábrica (sem desgaste de flanco), para usinagem de acabamento da superfície das amostras de ensaio.

O centro de usinagem utilizado para o fresamento foi um equipamento da marca HERMLE C800 U pertence ao Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação pertencente a Escola de Engenharia de São Carlos - USP, operado em comando Siemens, 840D conforme fotografia 3.

Fotografia 3 – Centro de usinagem Hermle C800U



Fonte: Autor

Os procedimentos de usinagem das amostras são descritos a seguir.

3.2.1 Usinagem das Amostras

O fresamento das amostras de ensaio foi realizado utilizando os parâmetros de corte descritos na tabela 3:

Tabela 3 - Parâmetros de corte e condições de usinagem

Condição	Cód.	Fresa	f_z (mm/aresta)	a_p (mm)	a_e (mm)	V_c (m/min)	Nível
Desgastada	1D	Inserto Intercambiável	0,1	0,5	0,1	200	0
	2D	Cabeça Intercambiável	0,1	0,5	0,1	200	
	3D	Inserto Intercambiável	0,1	0,5	0,1	300	+
	4D	Cabeça Intercambiável	0,1	0,5	0,1	300	
	5D	Inserto Intercambiável	0,08	0,5	0,1	200	-
	6D	Cabeça Intercambiável	0,08	0,5	0,1	200	
Nova	1N	Inserto Intercambiável	0,1	0,5	0,1	200	0
	2N	Cabeça Intercambiável	0,1	0,5	0,1	200	
	3N	Inserto Intercambiável	0,1	0,5	0,1	300	+
	4N	Cabeça Intercambiável	0,1	0,5	0,1	300	
	5N	Inserto Intercambiável	0,08	0,5	0,1	200	-
	6N	Cabeça Intercambiável	0,08	0,5	0,1	200	

Fonte: Autor

A profundidade de corte (a_p) foi fixada em 0,5mm em todas as usinagens, bem como a penetração de trabalho (a_e) foi fixa em 0,1mm para todas as condições. Com o objetivo de se obter uma superfície similar ao efeito que ocorre com a metodologia tradicional (esmerilhamento) preparou-se uma amostra pré-usinada através do processo de esmerilhamento por disco flexível. O esmerilhamento foi realizado em um processo manual, com a utilização de uma esmerilhadeira angular

da marca Bosh, dotada de um disco flexível de 4,5 polegadas com grãos cerâmicos de óxido de alumínio, granulometria 120.

Ainda foi necessário a preparação de uma amostra de referência. A amostra de referência produzida foi confeccionada em uma superfície pré-usinada utilizando processo tradicional de preparação metalográfica, com lixamento sequencial em lixas d'água com granulometrias de 220, 360, 600, e 1200 *mesh* e polimento da amostra, usando suspensão de diamante de 1 μ m e 0,25 μ m com aplicação de fluido lubrificante específico. Toda preparação foi realizada com auxílio de uma lixadeira e politriz semiautomática da marca Buehler Vector Beta em rotação de 300rpm com aplicação de carga manual.

3.2.2 Aferição Inicial e Controle da Perda de Massa no Ensaio de Cavitação

Todas as amostras submetidas a pesagem foram limpas com acetona de pureza analítica, em banho ultrassônico com duração de 5 minutos, a fim de eliminar partículas de material sobre a superfície. A limpeza por ultrassom foi realizada em um equipamento Thornton T7. Posteriormente as amostras foram secas com auxílio de jato de ar quente. Todas as aferições de massa foram realizadas utilizando uma balança de precisão analítica, da marca Shimadzu, modelo AUX220. Cada pesagem se repetiu por 5 vezes sendo adotada então a média aritmética para obtenção da massa da amostra.

3.2.3 Aquisição dos Parâmetros de Rugosidade

Na avaliação dos parâmetros de rugosidade nos revestimentos submetidos a cavitação foi utilizado um perfilômetro ótico tridimensional da marca Taylor Hobson CCI Lite (fotografia 4), dotado de aumentos em 10x e 50x. O software utilizado para análise dos dados obtidos foi o *Talymap Gold 6.2*.

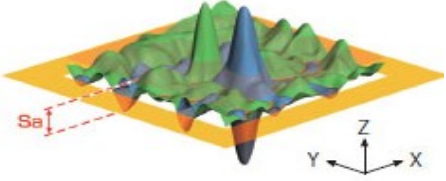
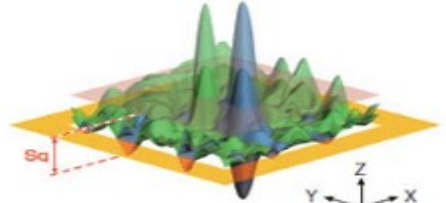
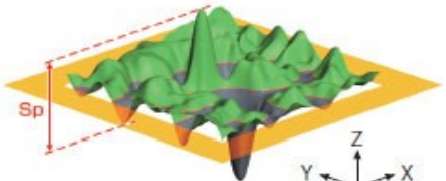
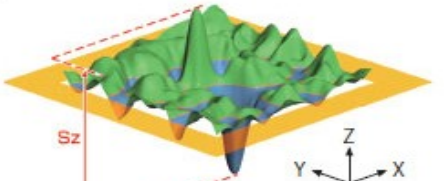
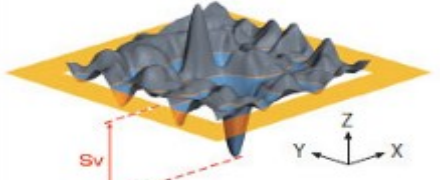
Fotografia 4 – Perfilômetro ótico TAYLOR HOBSON

Fonte: Próprio Autor

O procedimento de aquisição de imagem utilizou a lente com aumento de 10x, sendo posicionado a amostra sempre com a indicação à frente, procurando-se focar a região mais próxima do centro. Com a aquisição dos dados do equipamento, utilizou-se o software *Talymap Gold 6.2.6302* para interpretação dos dados. A delimitação da área de medição foi de 1,67mm por 1,67mm. As informações pertinentes extraídas do relatório do software foram os mapas tridimensionais da superfície indicando evolução micrométrica da topografia e a aquisição dos parâmetros de área da superfície e de rugosidade linear do perfil. Foram realizadas 5 linhas de medição para aquisição de valor médio da rugosidade linear, sendo duas verticais e 3 horizontais.

Os parâmetros de área obtidos foram: rugosidade média aritmética “Sa”, rugosidade média quadrática “Sq”, altura máxima de pico “Sp”, altura máxima média de superfície “Sz”, profundidade máxima de vales “Sv”, assimetria de superfície “Ssk”, e curtose “Sku”. Os parâmetros de superfície são descritos pela ABNT NBR 6405 e o cálculo utilizado para obtenção dos mesmos é descrito na figura 14.

Figura 14 – Parâmetros de rugosidade de uma superfície e cálculo de obtenção

<p>Rugosidade média aritmética S_a</p> 	$S_a = \iint Z(x,y) \partial x \partial y$
<p>Rugosidade média Quadrática S_q</p> 	$S_q = \sqrt{\iint [Z(x,y)]^2 \partial x \partial y}$
<p>Altura máxima de pico S_p</p> 	$S_p = \max(Z(x,y))$
<p>Altura máxima média de superfície S_z</p> 	$S_z = S_p + S_v$
<p>Profundidade máxima de vales S_v</p> 	$S_v = \min(Z(x,y))$
<p>Assimetria S_{sk}</p>	$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \iint [Z(x,y)]^3 \partial x \partial y$
<p>Curtose S_{ku}</p>	$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \iint [Z(x,y)]^4 \partial x \partial y$

Fonte: Adaptado de OLYMPUS

Os parâmetros lineares de rugosidade adquiridos foram: rugosidade média aritmética “Ra”, rugosidade média quadrática “Rq”, rugosidade total “Rt”, altura máxima média “Rz”, profundidade máxima de vale “Rv”, altura máxima de pico “Rp”, média das amplitudes do perfil “Rc”, assimetria de perfil “Rsk” e curtose de perfil “Rku”. Todos os parâmetros utilizados são descritos pela norma ABNT NBR 6405.

3.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

As imagens de microscopia eletrônica foram realizadas por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura TESCAN VEGA 3LM (fotografia 5), pertencente ao Laboratório de Materiais da UTFPR – PG, de modo a identificar e acompanhar a evolução da morfologia da superfície e, utilizando técnicas de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), analisar a composição química do revestimento.

Fotografia 5 – Microscópio Eletrônico modelo Vega 3LM Tescan



Fonte: Autor

3.2.5 Metalografia

A avaliação da microestrutura do material consistiu em preparação metalográfica convencional: lixamento escalonado progressivo com polimento posterior usando pasta diamantada 0,25µm. O ataque superficial utilizou solução de Vilella.

3.3 ENSAIO DE CAVITAÇÃO

A realização do ensaio se deu pelo método vibratório, em atenção à norma ASTM G32/03 (2006).

3.3.1 Cavitação no Método Indireto

O ensaio padronizado pela norma ASTM G32/03 (2006), modificado para o modo indireto foi realizado objetivando facilitar os procedimentos de amostragem dos materiais. Os ensaios de cavitação acelerada foram realizados utilizando equipamento da marca Qsonica, modelo Q700 pertencente a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa. O dispositivo é dotado de banho termostático, controlador de frequência e tempo, além de invólucro supressor de ruído. O equipamento utilizado pode ser visto na fotografia 6, seu detalhe de montagem interna na fotografia 7, e seu desenho esquemático na figura 15.

Fotografia 6 – Equipamento para ensaio de cavitação



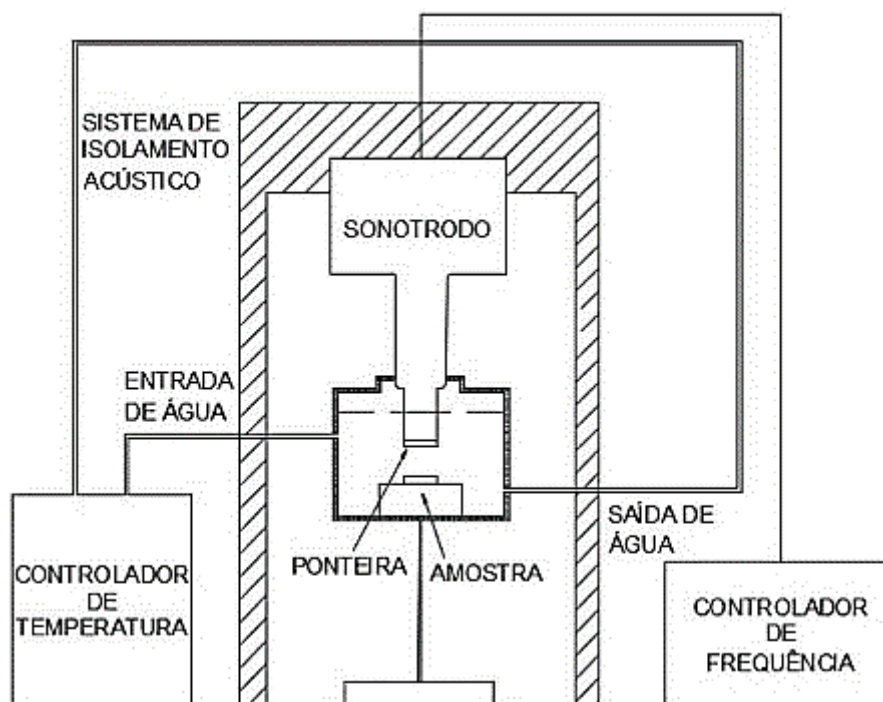
Fonte: Autor

Fotografia 7 – Detalhe interno do equipamento para ensaio de cavitação



Fonte: Autor

Figura 15 – Ilustração esquemática do equipamento para ensaio de cavitação



Fonte: Lamana (2017)

O líquido de imersão utilizado no processo foi água deionizada, à uma temperatura controlada de 25°C, com as amostras sendo imersas a uma profundidade de 20 mm, ajustadas por uma haste de controle. A distância entre a ponta do sonotrodo e a amostra ensaiada foi estabelecida em 500µm, medida e

ajustada a partir de um calibrador de folgas. Os parâmetros utilizados no ensaio para a cavitação podem ser visualizados na tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros do ensaio de cavitação

Parâmetro	Especificação
Equipamento	Qsonica Q700
Frequência de vibração	(20 ± 0,5) kHz
Amplitude	(50 ± 0,5%) µm pico-a-pico
Diâmetro do sonotrodo	19 mm
Método aplicado	Indireto
Distância entre sonotrodo e amostra	500 µm
Temperatura	(25 ± 1) °C
Profundidade de imersão da amostra	20 mm
Solução	Água destilada
Tempo total por ensaio	2 horas e 30 minutos
Tempo efetivo de cavitação por ensaio	2 horas

Fonte: Autor

Cada ponta de sacrifício do sonotrodo foi utilizada por um período de aproximadamente 25 horas e então substituída por outra em condição recuperada, visto que esta sofre severo desgaste com o uso.

O tempo total de ensaio foi estabelecido em 20 horas para cada amostra.

3.3.2 Ensaio de Dureza

Para realização dos ensaios de dureza, utilizou-se um microdurômetro *Shimadzu HMV-G20 Series*, na escala Vickers, com carga definida em 300 gf com penetrador de diamante, tipo piramidal de base quadrada com 136° entre faces opostas. A duração de cada indentação foi de 15 segundos.

O procedimento de medição da dureza teve como método a medição das diagonais da indentação realizada. Ao fim de cada indentação, reposicionou-se o indentador a 0,4mm de distância em direção a região cavitada, efetuando-se nova indentação e medindo o novo valor de dureza. Foram realizadas 15 medições em cada amostra, a fim de se obter a curva de variação de dureza em função da região cavitada.

As medições ocorreram somente após finalizados todos os ensaios de cavitação objetivando não modificar a superfície ao ensaio.

3.4 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Toda rotina prática de ensaio foi realizada seguindo padrões predeterminados, para obtenção dos dados desejados. Realizou-se inicialmente a limpeza e pesagem inicial das amostras, para se obter o parâmetro da massa inicial.

Caracterizou-se a composição química do revestimento utilizando técnicas de EDS, juntamente com a aquisição dos dados imagem de superfície inicial, com uso de microscopia eletrônica de varredura, de todas as amostras a serem ensaiadas, totalizando 14 amostras. Obteve-se os dados de rugosidade e mapa topográfico tridimensional inicial para todas as amostras.

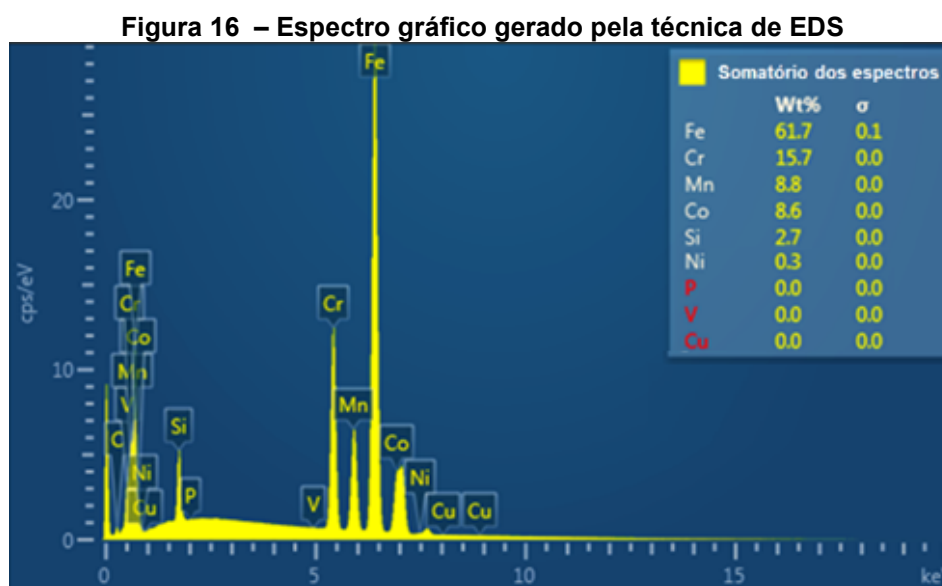
Realizou-se o ensaio de cavitação acelerada para cada amostra, tendo sido realizada limpeza e secagem nas amostras, sendo então seguidas de pesagem em intervalos de tempo de 2 horas cada. Também em intervalos de tempo de 2 horas, adquiriu-se os dados de rugosidade e mapa topográfico, seguindo mesmo padrão até o fim dos ensaios. A aquisição de imagem pelo microscópio eletrônico foi realizada nos intervalos de ensaio de 6 horas, 10 horas, 14 horas e 20 horas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são discutidos os aspectos do material utilizado para o revestimento, a caracterização inicial das superfícies obtidas por usinagem, incluindo a morfologia com microscopia eletrônica e parâmetros de rugosidade obtidos com o perfilômetro óptico. Na sequência apresentam-se os resultados da cavitação e se discute os mecanismos de desgaste por cavitação ocorridos em cada uma das condições usinadas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO DEPOSITADO

A caracterização química por espectroscopia de energia dispersiva foi realizada com intuito de verificar a composição química esperada para o revestimento depositado. Os resultados encontrados são mostrados na figura 16.

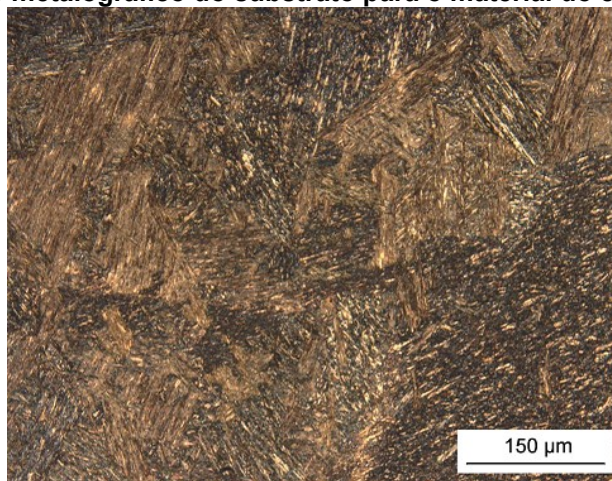


Fonte: Autor

A composição convergiu com o que era esperado em relação a literatura (KOGA et al 2019), divergindo ligeiramente nos elementos Mn e Cr. A não ocorrência dos elementos fósforo, vanádio e cobre, citados por Fedumentti (2010), se deve ao baixo percentual dos mesmos na liga e a limitação da técnica utilizada para detecção.

A metalografia foi realizada sob a seção transversal da amostra para obtenção da microestrutura. Uma visualização do aspecto metalográfico do substrato é apresentada na figura 17.

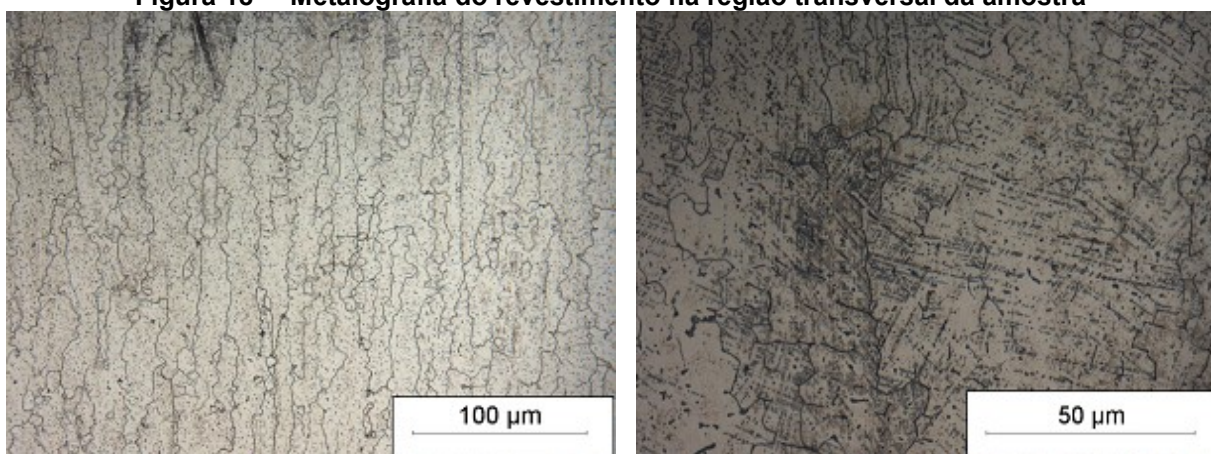
Figura 17 – Aspecto metalográfico do substrato para o material do estudo. Ataque: Vilella



Fonte: Autor

No substrato observa-se a microestrutura martensítica típica do aço CA6NM. O revestimento soldado apresentou uma estrutura puramente austenítica, com ocorrência de deformações pontuais decorrentes de transformação de fase martensítica induzida pela usinagem. A microestrutura austenítica apresentou grãos colunares, alinhados com a direção de soldagem. O aspecto metalográfico do revestimento na seção transversal pode ser visualizado para diferentes ampliações na figura 18.

Figura 18 – Metalografia do revestimento na região transversal da amostra



Fonte: Autor

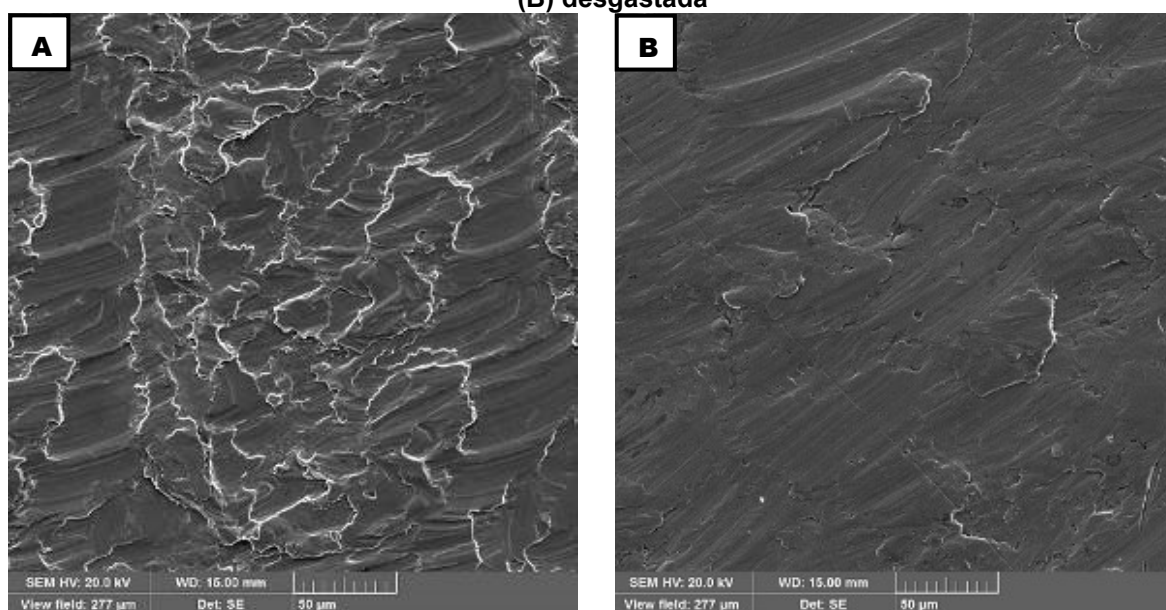
4.2 CARACTERIZAÇÃO INICIAL DAS SUPERFÍCIES USINADAS

As superfícies caracterizadas inicialmente serão apresentadas como fresadas, polida e esmerilhada.

4.2.1 Superfícies Fresadas

A figura 19 apresenta a morfologia da superfície obtida na usinagem com a fresa de topo do tipo inserto intercambiável utilizando os parâmetros: f_z 0,1 mm/aresta, a_p 0,5 mm e v_c 200 m/min nas condições (a) ferramenta nova e (b) ferramenta desgastada.

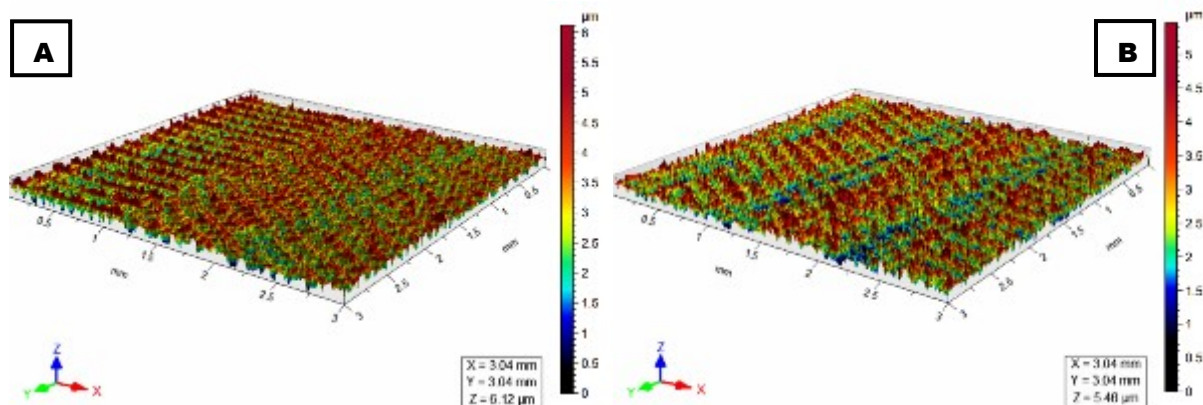
Figura 19 – Estados de superfície inicial obtidos com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição (A) nova e (B) desgastada



Fonte: Autor

A condição superficial obtida pelo uso da ferramenta na condição nova forneceu um aspecto visual aparentemente menos refinado, em virtude das inúmeras microrrebarbas observadas no percurso da usinagem. Embora a superfície gerada pela ferramenta desgastada aparente estar em melhor acabamento superficial, a topografia tridimensional mostra que as duas ferramentas obtiveram patamar muito similar de rugosidade total como mostra a figura 20.

Figura 20 – Topografia de superfície inicial para os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição (A) nova e (B) desgastada



Fonte: Autor

Tal fato é reforçado através da observação dos dados diversos parâmetros de rugosidade de superfície, obtidos com a perfilometria ótica, apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de rugosidade de superfície inicial nas amostras com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição nova e desgastada

Parâmetro	Superfície 1N	Superfície 1D
Sp (μm)	3,56	3,03
Sv (μm)	2,56	2,42
Sz (μm)	6,12	5,46
Sa (μm)	0,89	0,66
Sq (μm)	1,08	0,82
Ssk	0,14	0,38
Sku	2,56	3,10

Fonte: Autor

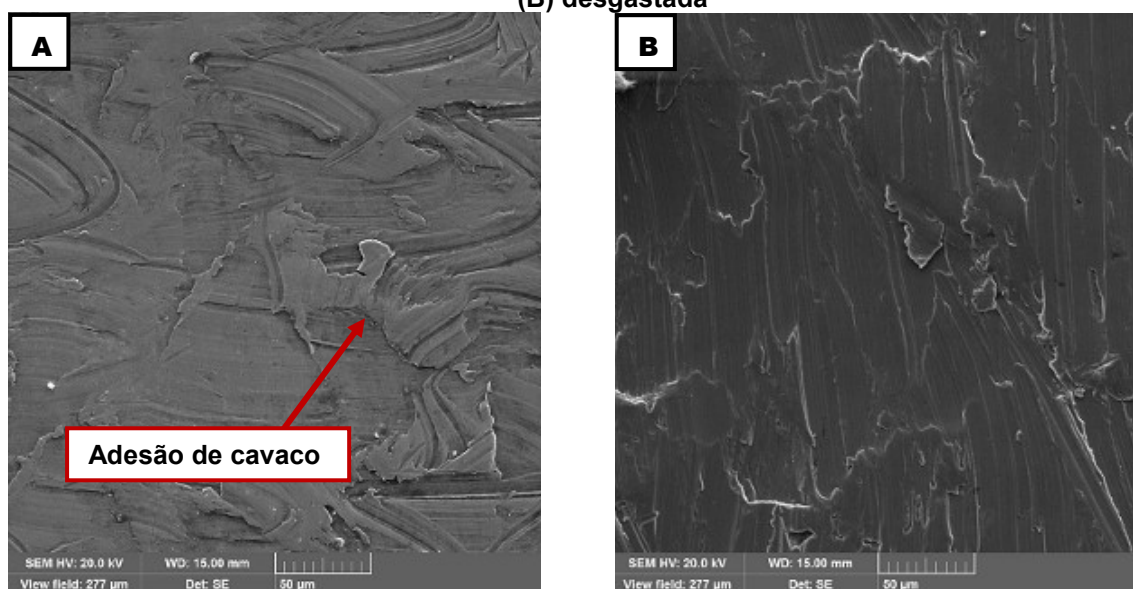
Afirma-se então que as condições de superfície geradas pelas ferramentas nova e desgastada são similares, porém o mecanismo de ação das duas é distinto. Enquanto a ferramenta nova, que ainda possui sua geometria íntegra, produz efeitos mais pronunciados de corte e arrancamento do material, gerando microrrebarbas, a ferramenta desgastada tem um mecanismo mais próximo à conformação mecânica, gerando um amassamento de material na superfície, que sugere soldagem a frio de cavacos parciais não removidos.

A aresta de corte ao centro da ferramenta não promove um cisalhamento perfeito nesta região, influenciando os valores de rugosidade. Tal cisalhamento imperfeito ao centro da ferramenta faz com que uma porção do material seja

esmagado e empurrado para fora do centro da ferramenta, não sendo então removido pela próxima aresta de corte.

O fenômeno apresentou maior grau de intensidade nas superfícies geradas pelas ferramentas nas condições 2N e 2D (figura 21), distorcendo muito as trilhas de usinagem esperadas para os mesmos parâmetros de corte usando ferramentas similares. Indica que o grau de desgaste e comprometimento geométrico da fresa possa estar comprometendo o corte e gerando alto grau de conformação, tendo assim geração aumentada de encruamento superficial nas placas soldadas a frio.

Figura 21 – Estados de superfície inicial obtidos com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição (A) nova e (B) desgastada



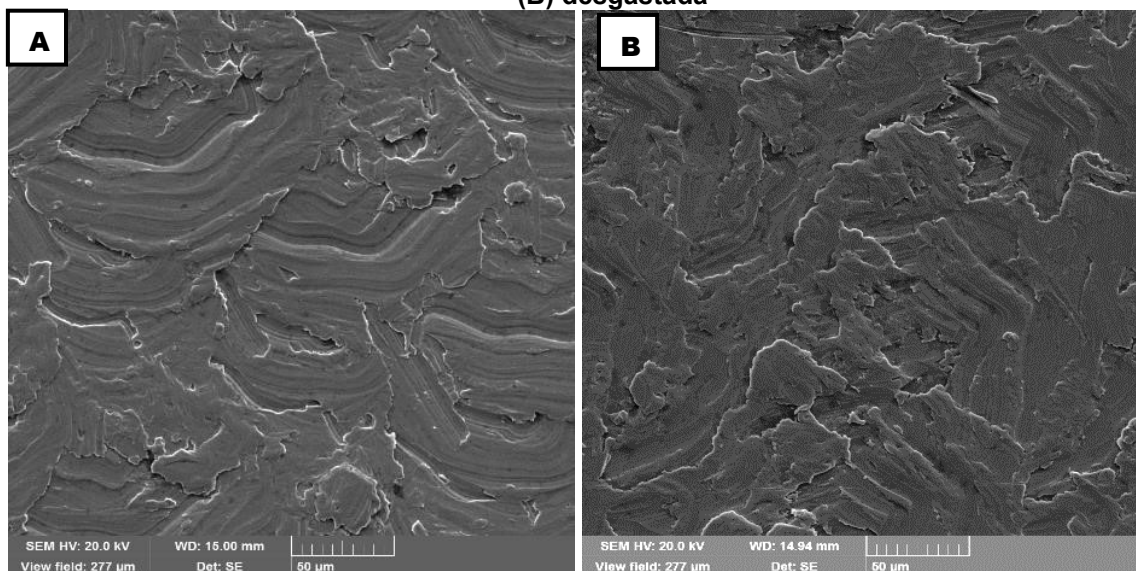
Fonte: Autor

É possível identificar o efeito de conformação que ocorreu ao centro da trajetória da ferramenta, região com ausência de corte. A formação de cavaco nas ferramentas com topo esférico é mais complexa do que em ferramentas de topo reto. Na trajetória da ferramenta do tipo *Ball Nose*, tem a orientação da aresta de corte periodicamente e dinamicamente modificada durante a rotação do eixo-árvore e também do deslocamento em avanço.

As fresas com montagem de insertos intercambiáveis, com parâmetros de corte ajustados no nível superior, obtiveram o melhor resultado em termos comparativos de superfície. Apresentaram um grau reduzido de conformação frente às outras ferramentas e parâmetros, porém ainda sim perceptível. Observou-se que com o aumento da velocidade de corte, a fresa desgastada conseguiu atingir um

desempenho muito similar ao da ferramenta nova. As imagens da superfície inicial gerada nas ferramentas de inserto intercambiável, com parâmetros ajustados no nível superior são vistas na figura 22.

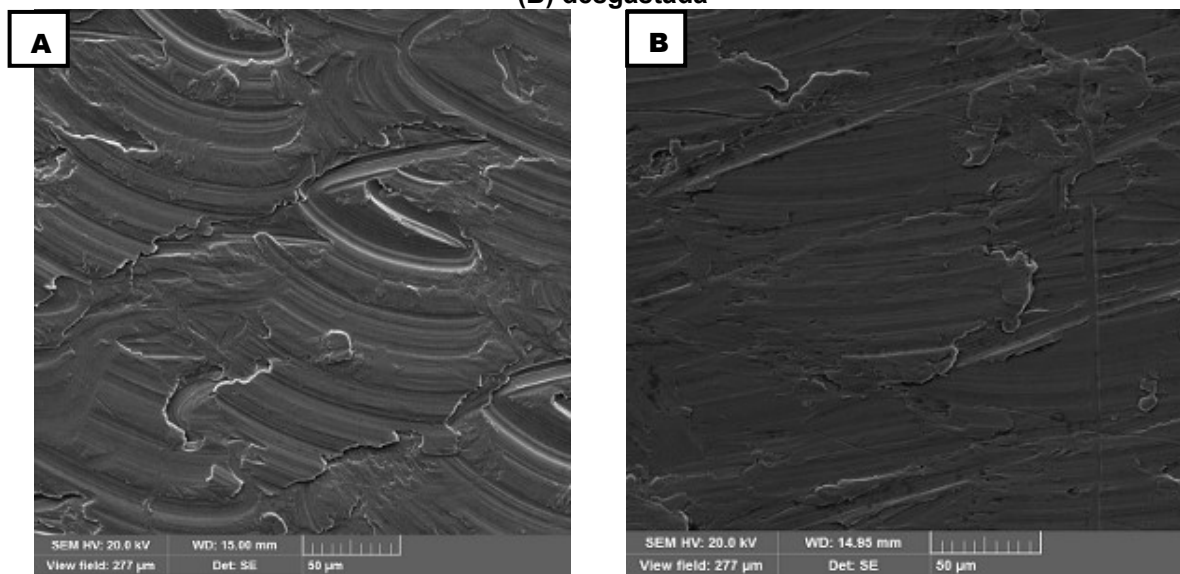
Figura 22 – Estados de superfície inicial obtidos com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição (A) nova e (B) desgastada



Fonte: Autor

Parâmetros de corte no nível superior para as ferramentas de cabeça intercambiável melhoraram muito o aspecto visual deixado na superfície, porém ainda sim apresentando grau significativo de material aderido, tanto na ferramenta nova quanto a desgastada. Verifica-se os estados iniciais gerados através da figura 23.

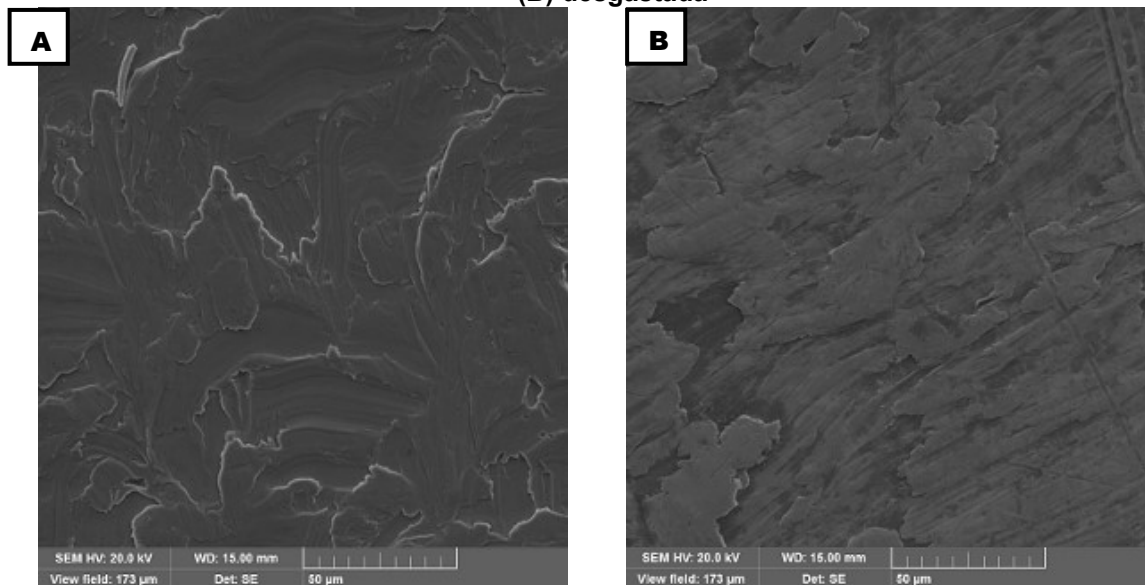
Figura 23 – Estados de superfície inicial obtidos com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição (A) nova e (B) desgastada



Fonte: Autor

As superfícies obtidas nas condições de fresamento usando ferramenta com inserto intercambiável, com parâmetros em nível inferior (reduzindo f_z em 0,08 mm/aresta, e fixando v_c em 200 m/min) sofreram variação muito expressiva no efeito da adesão de material. Nota-se diferenças nas ranhuras deixadas, e maior quantidade de material aderido na ferramenta desgastada com conseqüente mudança na altura do perfil, porém refletindo pouco na rugosidade observada como visto na figura 24.

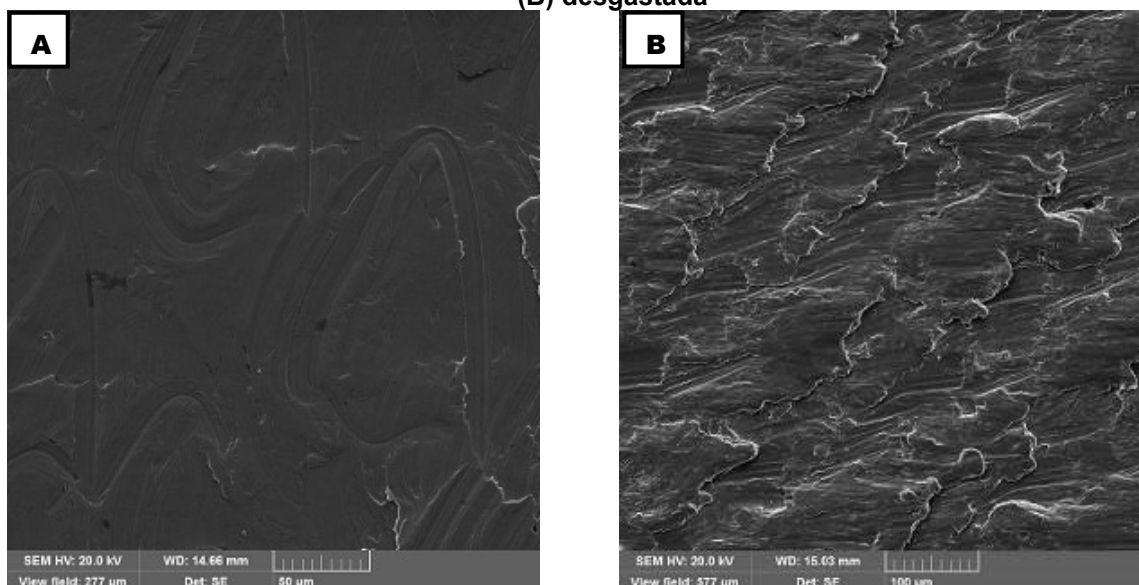
Figura 24 – Estados de superfície inicial obtidos com os parâmetros de usinagem f_z de 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição (A) nova e (B) desgastada



Fonte: Autor

Por fim, a ferramenta com cabeça intercambiável produziu efeitos muito intensos de adesão de material na superfície, comprometendo a observação das marcas de usinagem esperadas de forma similar a ferramenta nova. As diferenças foram muito expressivas e refletiram-se nos valores de rugosidade, sendo o único caso de piora substancial da rugosidade com uso da ferramenta desgastada, conforme observado na figura 25.

Figura 25 – Estados de superfície inicial obtidos com os parâmetros de usinagem f_z de 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição (A) nova e (B) desgastada



Fonte: Autor

As superfícies geradas pelos pares de ferramentas nas condições 2N e 2D, 4N e 4D 5N e 5D 6N e 6D mostram divergências no percurso da usinagem. Tais divergências se apresentam como ranhuras heterogêneas e podem ser causadas pelo percurso de usinagem, vibrações do sistema, comprometimento da geometria de ferramenta bem como também pelo ângulo de inclinação da ferramenta utilizada (TOH, 2004).

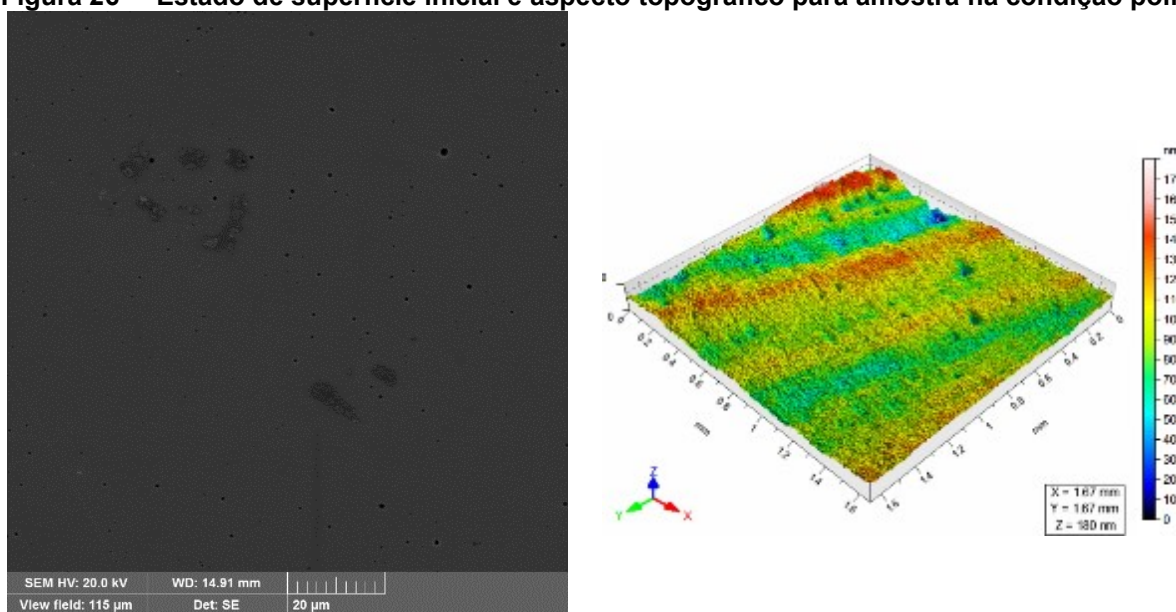
A usinagem da peça envolveu a utilização de fresas do tipo *Ball Nose*, o que explica o fenômeno que caracterizou a geração das trilhas heterogêneas nos pares citados, principalmente levando-se em consideração a variação da velocidade de corte ao longo do diâmetro da ferramenta, bem como porção de material em contato da ferramenta sobre a peça de trabalho (CHEN, 2005). O fenômeno de esmagamento de material, que modifica as trilhas normais de usinagem, ocorre tanto pela velocidade de corte nula ao centro da ferramenta, quanto pela modificação do avanço.

Os valores de rugosidade obtidos se mostram baixos para o processo de fabricação utilizado de acordo com a literatura (MEZLINI, 2014) o que indica bom ajuste dos parâmetros para o resultado desejado, gerando um bom acabamento superficial.

4.2.2 Superfície Polida

A amostra polida apresentou rugosidade muito baixa em comparação aos métodos de usinagem utilizados. A superfície da amostra demonstrou homogeneidade e bom acabamento, apresentando, porém, quantidade grande de microporos oriundos do aprisionamento dos gases do processo de deposição por soldagem, bem como pequenas regiões de inclusão. Uma visualização da superfície polida, bem como sua topografia tridimensional é mostrada na figura 26.

Figura 26 – Estado de superfície inicial e aspecto topográfico para amostra na condição polida



Fonte: Autor

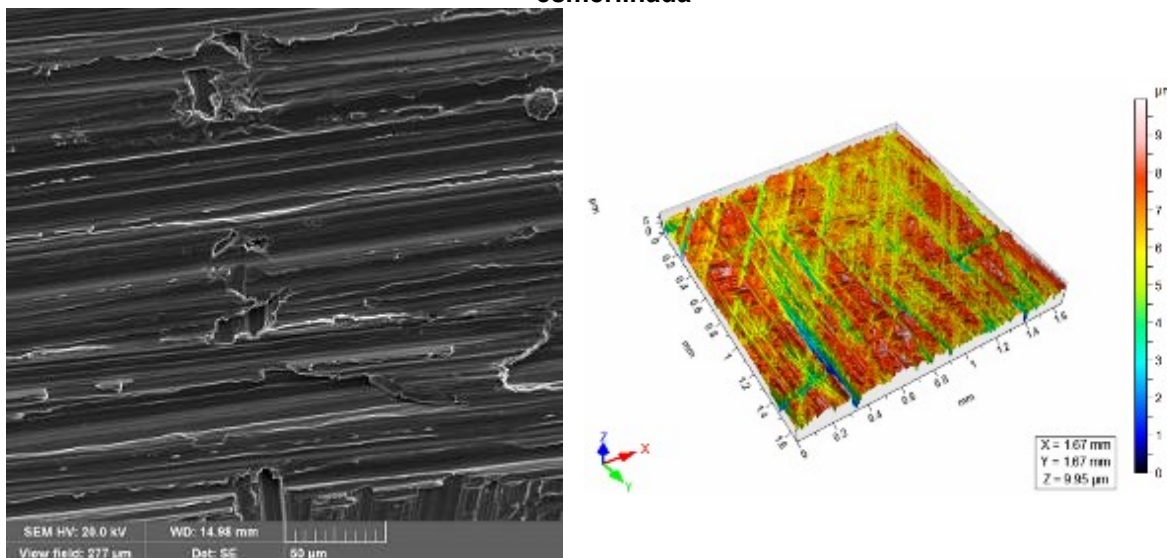
Os valores de rugosidade na ordem de nanômetros indicam o bom acabamento superficial obtido através do polimento, embora a topografia apresente regiões com microporosidades.

4.2.3 Superfície Esmerilhada

A condição de esmerilhamento, como esperado, promoveu o pior resultado em termos de rugosidade comparativamente a todas as outras amostras do estudo. Riscos profundos e a incidência de descontinuidades nas marcas de usinagem se fizeram bastante presentes nessa condição de usinagem.

O aspecto superficial, bem como a topografia da amostra é apresentado na figura 27.

Figura 27 – Estado de superfície inicial e aspecto topográfico para amostra na condição esmerilhada



Fonte: Autor

Nota-se através da topografia a presença de sulcos diagonais com direção preferencial, tipicamente oriundos do processo de esmerilhamento angular.

4.3 ANÁLISE DA RESISTÊNCIA A CAVITAÇÃO

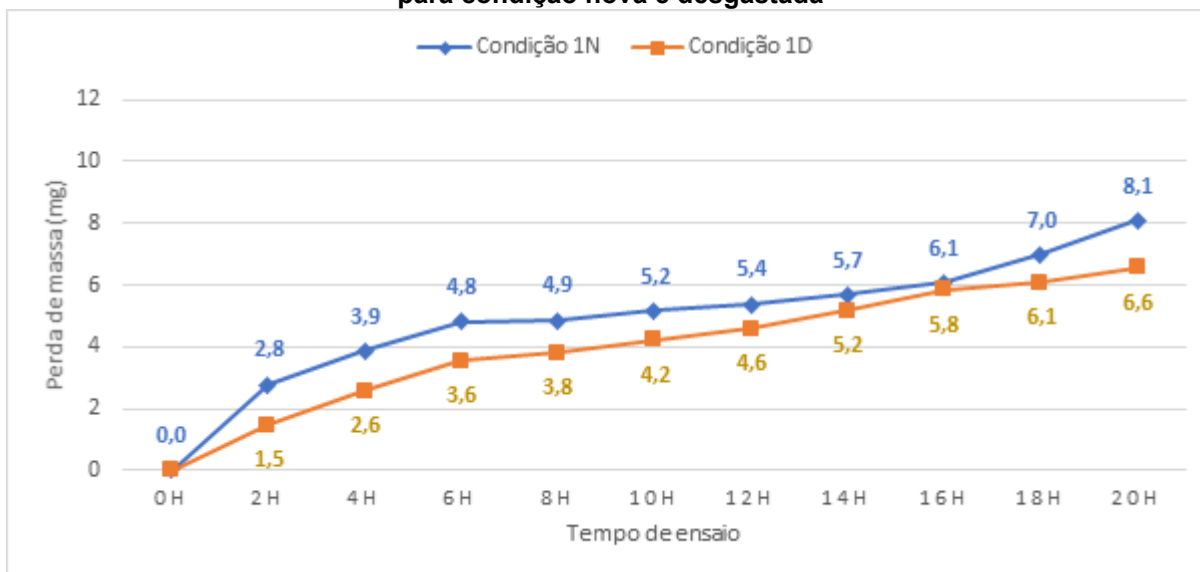
O dano de erosão por cavitação nas amostras usinadas se mostrou bastante precoce, sendo quantificado a perda de massa logo nas primeiras horas de ensaio para todas as amostras estudadas, a exceção da amostra de referência polida. Os resultados obtidos em termos de tempo e perda de massa acumulada convergem para as literaturas consultadas (PROCOPIAK, 1997; BOCCANERA, 1998; XIAOJUN, 2002).

Nesta seção discute-se sobre as performances das superfícies geradas por usinagem e esmerilhamento com relação a perda de massa e erosão por cavitação.

4.3.1 Desempenho das Superfícies Geradas nas Condições 1N e 1D

O efeito da perda de massa através do tempo de ensaio relativo às amostras produzidas com a ferramenta na condição 1N e 1D pode ser visto através das curvas do gráfico 7.

Gráfico 7 – Curvas de perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostras usinadas, utilizando ferramenta de inserto intercambiável, com f_z 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min para condição nova e desgastada



Fonte: Autor

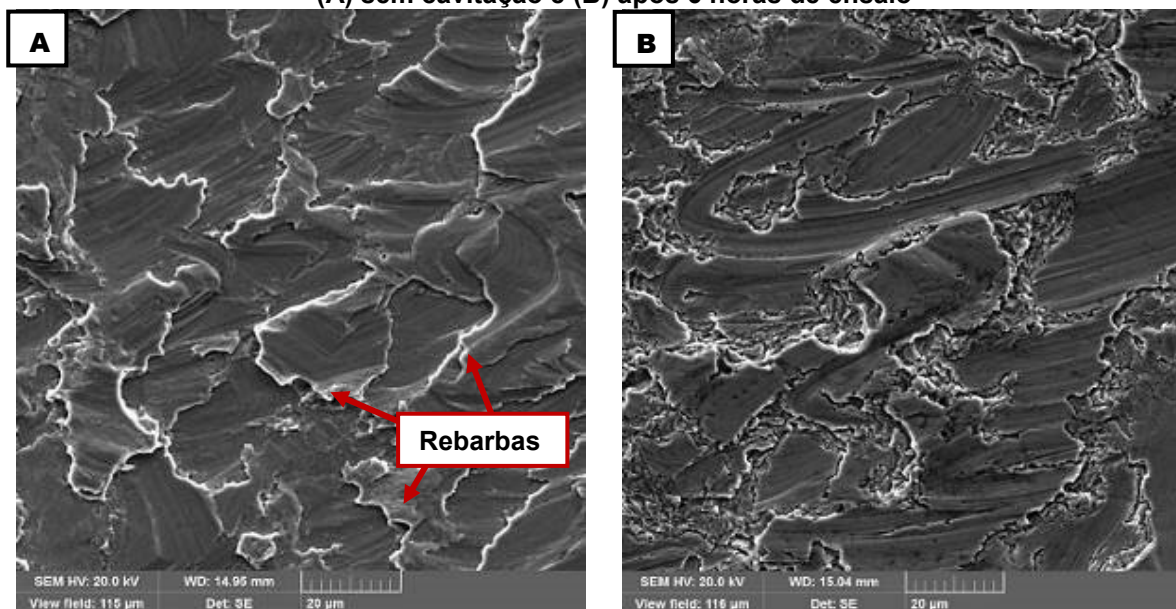
Houve perda de massa desde as primeiras duas horas de ensaio, tal fato podendo ser explicado em virtude da remoção das microrrebarbas de material aderido (deixadas no processo de usinagem) pela vibração intensa causada pelo sonotrodo. O efeito da perda de massa devido a este mecanismo é muito mais pronunciado na superfície gerada pela ferramenta em sua condição nova. Como o ensaio padronizado de cavitação é realizado numa superfície polida, isenta de microrrebarbas, era esperado a ocorrência desse fenômeno.

Nos materiais com acabamento superficial polido é esperado uma perda de massa quase nula no início do ensaio, em virtude da transformação de fase que ocorre na microestrutura (XIAOJUN, 2002). Porém para a amostra usinada, a microestrutura resultante da usinagem já apresentava intensa transformação em martensita (constatado pela dureza mais elevada em comparação com a superfície polida) havendo, portanto, menor absorção de energia para transformação de fase, consequentemente fraturando as rebarbas.

O arrancamento de material foi observado inicialmente nas zonas de borda das microrrebarbas, sendo estas consideradas como entalhes concentradores de tensão. Conforme a literatura sugere (BOCCANERA, 1998), nestas regiões a ocorrência de início da remoção de material por erosão é maior, o que de fato

ocorreu, sendo visto na figura 28 que apresenta a condição de superfície 1N (A) como usinada, e (B) após 6 horas de ensaio.

Figura 28 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição nova (A) sem cavitação e (B) após 6 horas de ensaio

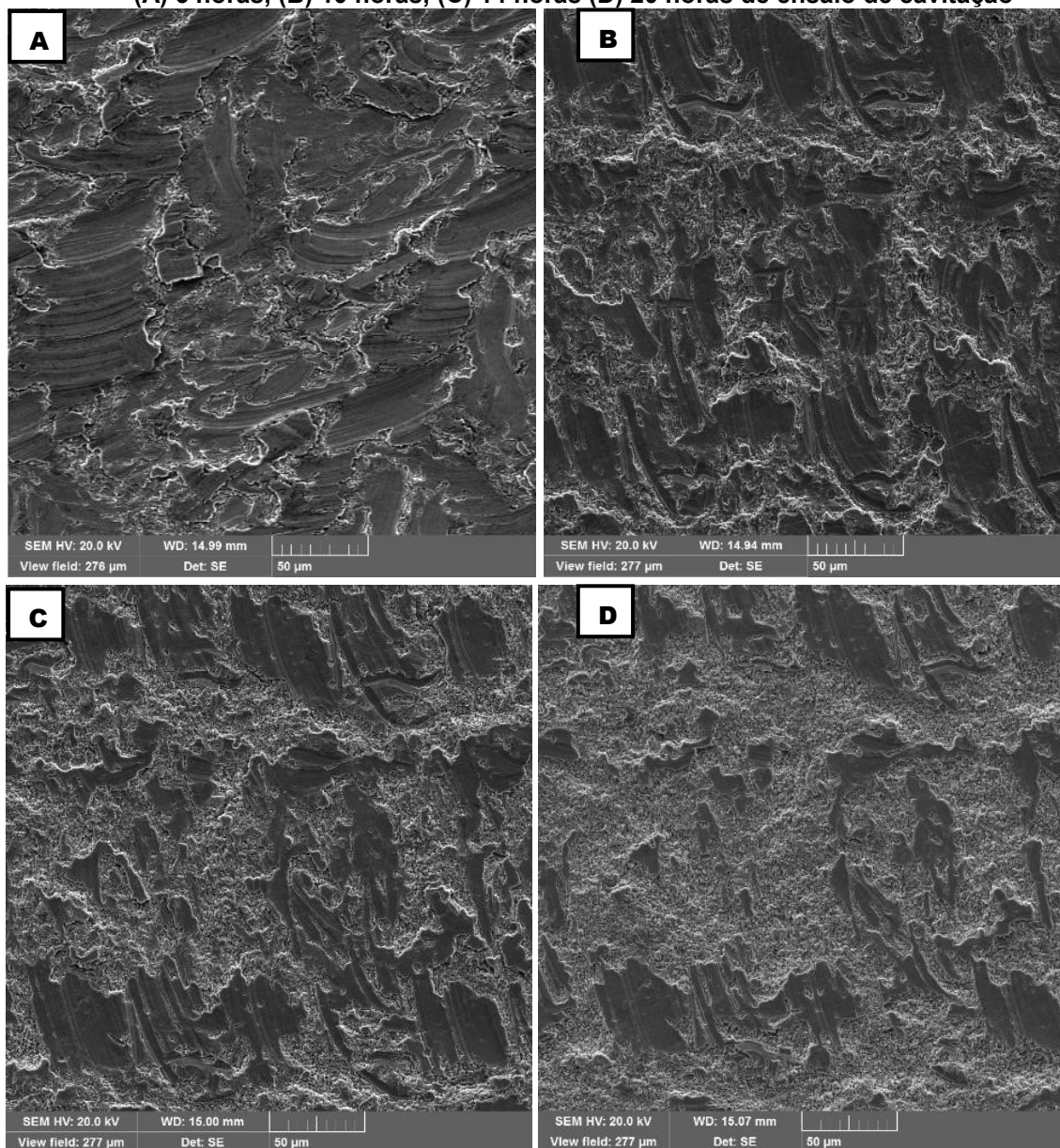


Fonte: Autor

Essas zonas preferenciais de arrancamento são influenciadas também pelo efeito do trabalho a frio produzido a partir da usinagem (consequência do cisalhamento imperfeito que produz conformação ao invés de corte), que tende a encruar o material muito mais intensamente nas rebarbas do que em sua porção de base.

No decorrer do processo, pode-se observar acentuação do desgaste erosivo em virtude da formação de fissuras na porção base do revestimento, estas sofrendo nucleação, que ao final do processo consumiram boa parte da zona usinada, atingindo a porção interna, e não somente superficial, do revestimento. O mecanismo de desgaste é a erosão por fadiga, conforme sugere a literatura (RICHMAN, 1990). A evolução para a amostra 1N é apresentada na figura 29, nos intervalos de (A) 6 horas, (B) 10 horas, (C) 14 horas e (D) 20 horas de ensaio.

Figura 29 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição nova após (A) 6 horas, (B) 10 horas, (C) 14 horas (D) 20 horas de ensaio de cavitação

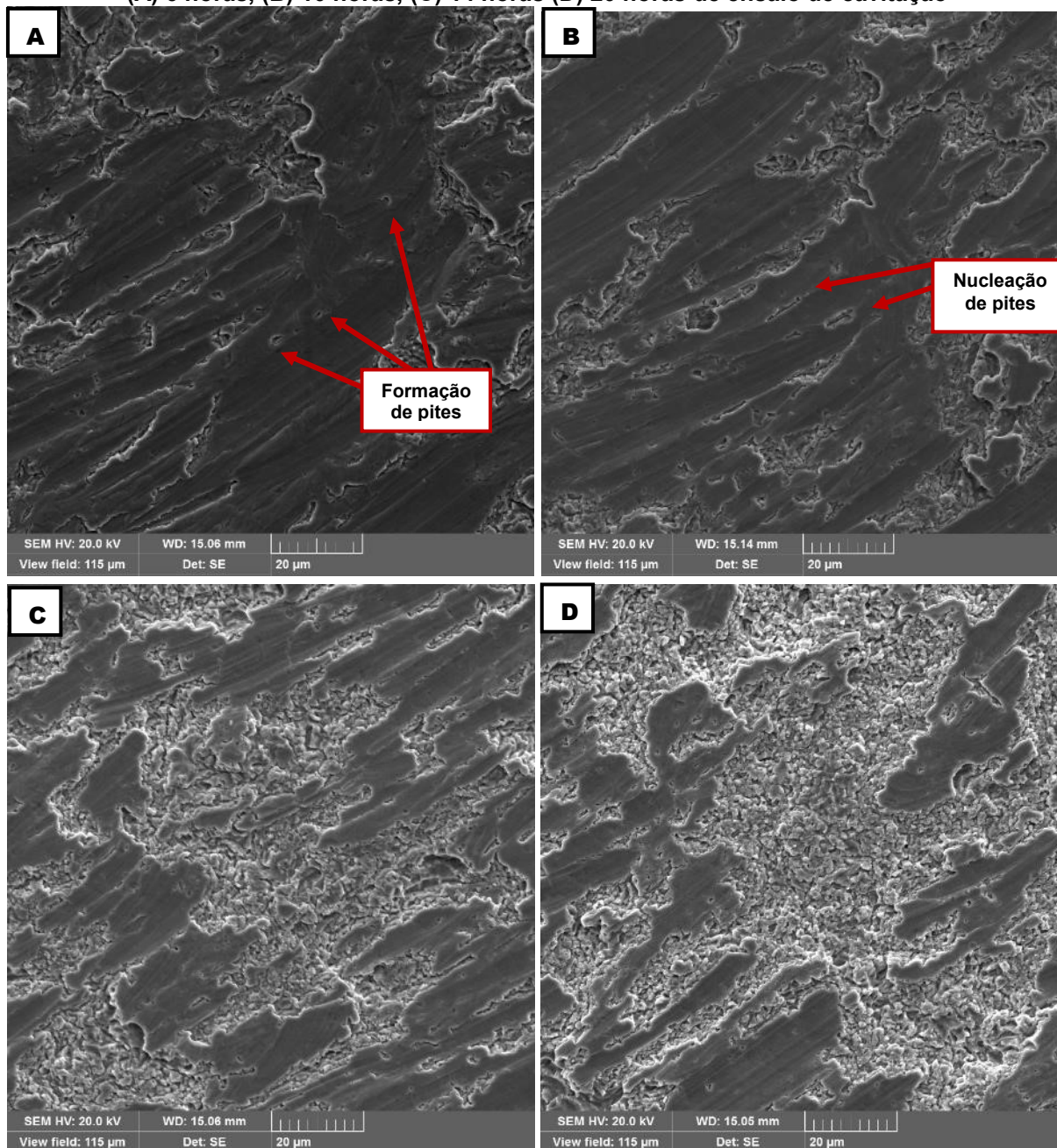


Fonte: Autor

Nota-se que o efeito erosivo com o avanço do ensaio é muito mais pronunciado nas regiões de borda deixadas pela formação da cratera, e não necessariamente nas marcas de usinagem.

A ferramenta na condição 1D apresentou comportamento similar no mecanismo de desgaste, porém com uma maior incidência de pites, a partir da sexta hora de ensaio. Uma evolução da superfície obtida pela condição 1D nos intervalos de ensaio é visualizada na figura 30, para (A) 6 horas, (B), 10 horas, (C) 14 horas e (D) 20 horas de ensaio.

Figura 30 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição desgastada após (A) 6 horas, (B) 10 horas, (C) 14 horas (D) 20 horas de ensaio de cavitação



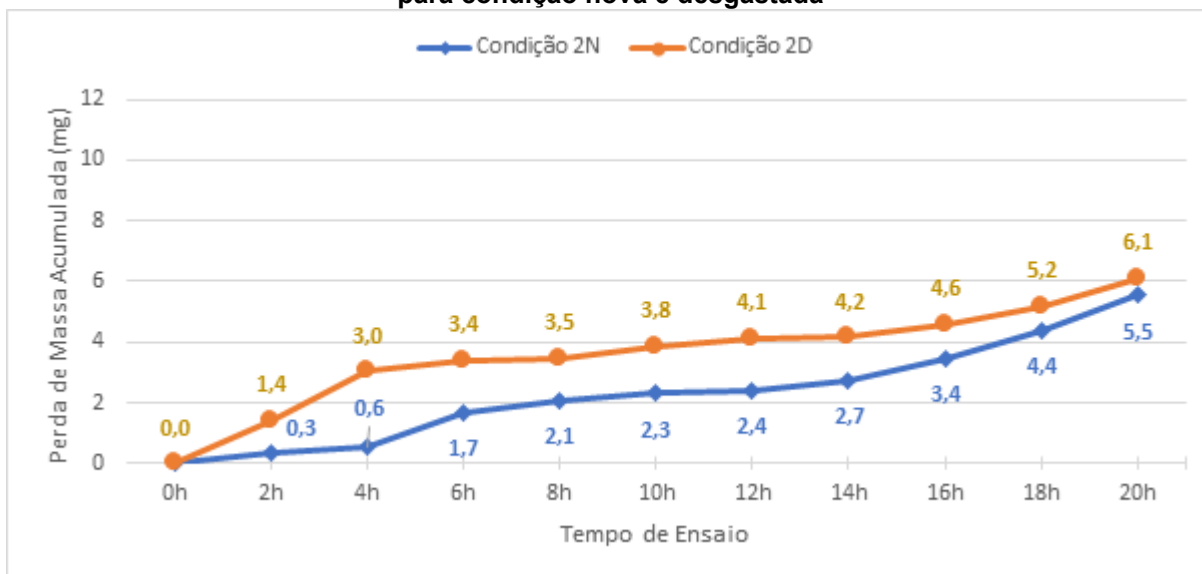
Fonte: Autor

4.3.2 Desempenho Superfícies Geradas nas Condições 2N e 2D

Na perda de massa para as superfícies geradas através das condições de usinagem 2N e 2D, notou-se que com uso da ferramenta desgastada, a superfície produzida apresentou grande acúmulo de massa perdida associada as 4 primeiras horas de ensaio em comparação a superfície gerada na condição nova. Os dados

relativos à perda de massa acumulada para as condições descrita 2N e 2D são vistos no gráfico 8.

Gráfico 8 – Curvas de perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostras usinadas, utilizando ferramenta de cabeça intercambiável, com f_z 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min para condição nova e desgastada

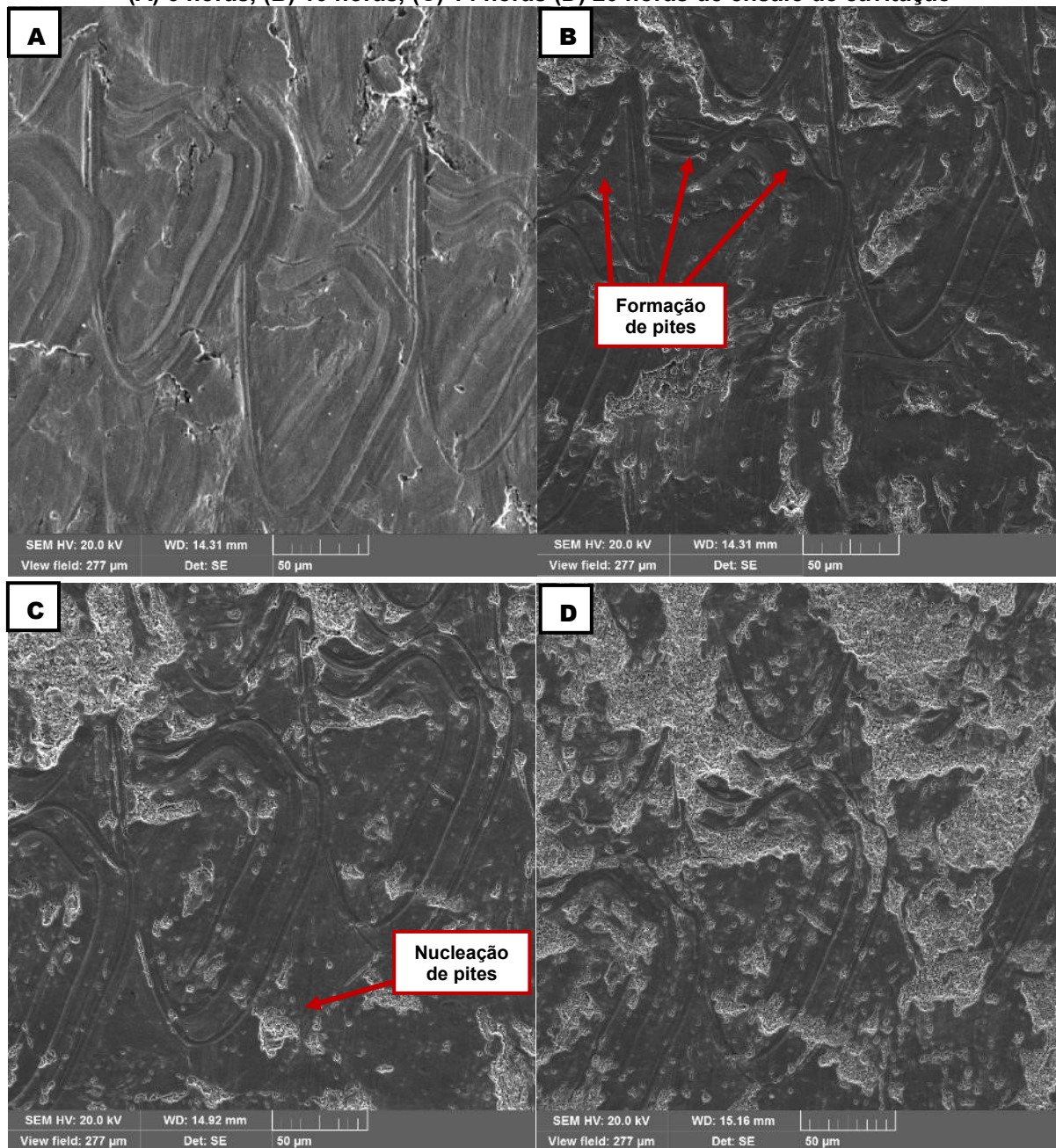


Fonte: Autor

A maior perda de massa para condição desgastada nas 4 primeiras horas de ensaio refere-se a perda de adesão entre as placas soldadas a frio no revestimento. Essa perda de massa de material aderido ocorreu principalmente em virtude da vibração do equipamento usado no ensaio de cavitação e não necessariamente pelo efeito da colisão das bolhas ou microjatos. A grande perda de massa associada as horas iniciais sugere extinção do período de incubação, promovendo desgaste no regime permanente logo ao início do ensaio (KISHOR, 2014).

Na ferramenta nova, a condição de usinagem permitiu um acabamento com pouca quantidade de material aderido. Com isso, o mecanismo de desgaste por cavitação para superfície gerada nesta condição foi principalmente causado pela formação e nucleação de pites (observados a partir da décima hora de ensaio), gerando então diversos pontos de microfratura, responsáveis pelo arrancamento do material. As porções do revestimento são arrancadas antes que possam absorver uma quantidade significativa de energia da cavitação (LAVIGNE, 2017). Uma evolução do perfil obtido nas condições 2N é vista na figura 31, para intervalos de tempo de (A) 6 horas, (B) 10 horas, (C) 14 horas e (D) 20 horas de ensaio.

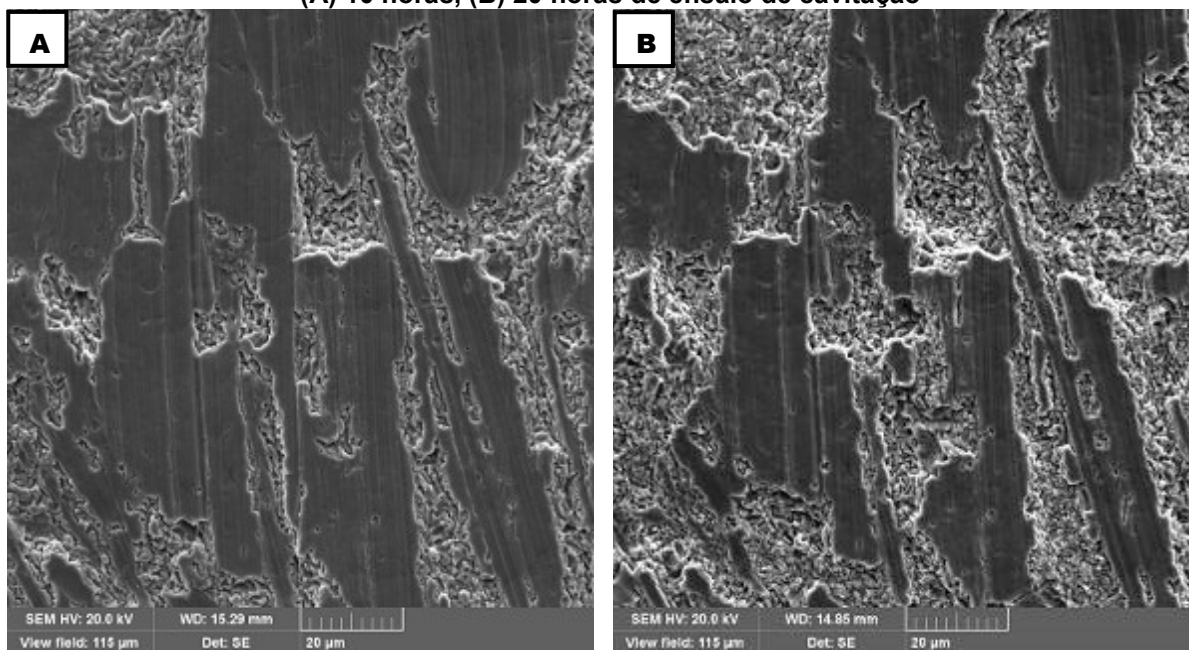
Figura 31 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição nova após (A) 6 horas, (B) 10 horas, (C) 14 horas (D) 20 horas de ensaio de cavitação



Fonte: Autor

A superfície gerada na condição 2D teve um comportamento de remoção de material aderido através da microfatura por fadiga. A ocorrência de pites foi menor, porém a perda de massa total teve aumento em comparação com a superfície obtida nas condições 2N. Em detalhe na figura 32 observa-se a superfície 2D após (A) 10 horas de ensaio e (B) 20 horas de ensaio.

Figura 32 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição desgastada após (A) 10 horas, (B) 20 horas de ensaio de cavitação



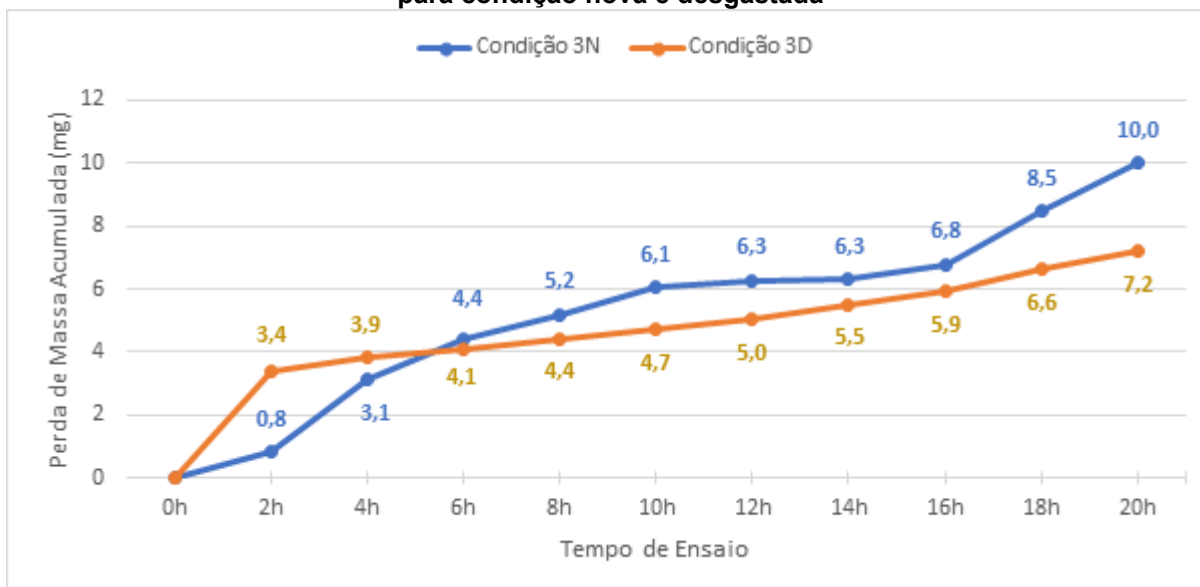
Fonte: Autor

Riscos e marcas de usinagem não necessariamente foram o local de maior incidência de erosão, sendo que a evolução do dano se dá principalmente pela nucleação das crateras formadas inicialmente, gerando aumento da perda de material através da fadiga por fratura dúctil (BOCCANERA, 1998). Pequenos pontos de pites formados nuclearam-se muito pouco em comparação ao tempo de ensaio.

4.3.3 Desempenho das Superfícies Geradas nas Condições 3N e 3D

A perda de massa relativa ao ensaio das amostras com superfícies geradas pelas ferramentas nas condições 3N e 3D é apresentada no gráfico 9.

Gráfico 9 – Curvas de perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostras usinadas, utilizando ferramenta de inserto intercambiável, com f_z 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min para condição nova e desgastada

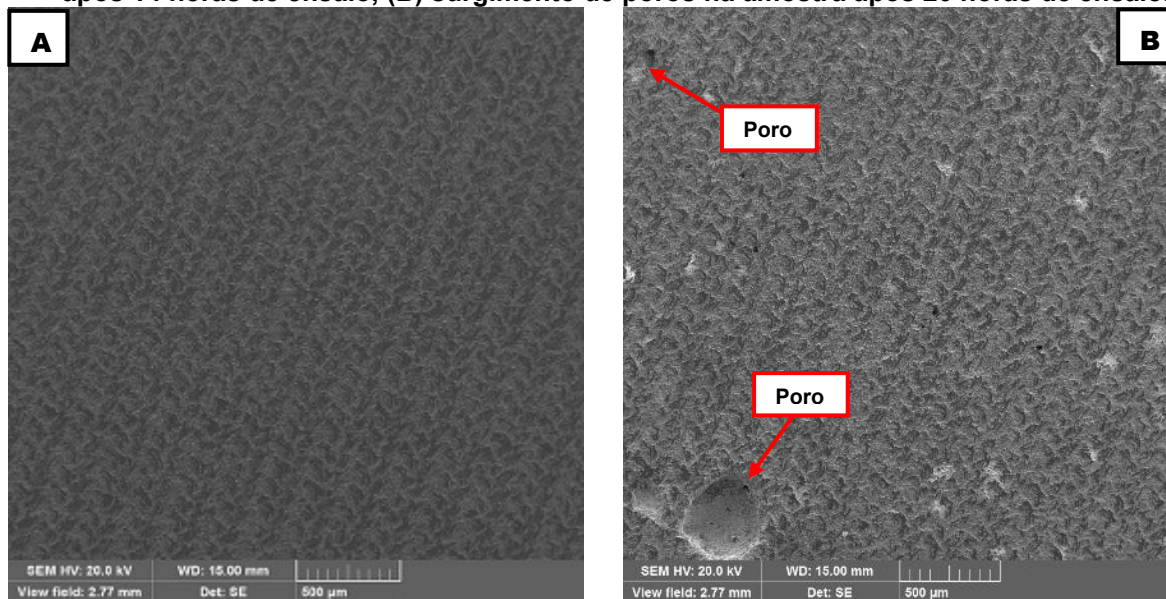


Fonte: Autor

Estas superfícies são as que melhor se assemelham em função dos parâmetros de usinagem utilizados, porém seu comportamento frente a perda de massa teve algumas características diferentes. Na amostra gerada nas condições 3D, há um salto de perda de massa logo nas primeiras 2 horas, que não tem continuidade na mesma taxa de remoção conforme o avanço do ensaio. Tal fato pode ser explicado em função da perda de porções de material aderido com baixa intensidade. O comportamento quase linear após a segunda hora do ensaio reforça essa explicação.

Na amostra gerada na condição 3N, a perda de massa possui uma taxa de remoção de material parabólica (excetuando-se as 2 primeiras horas) até a marca das 16 horas de ensaio, quando sofre uma variação súbita. Essa variação ocorreu em função do aparecimento de poros que foram revelados conforme visualizado na figura 33. Os poros são defeitos gerados no processo de deposição por soldagem do revestimento, que permaneceram ocultos abaixo da superfície usinada.

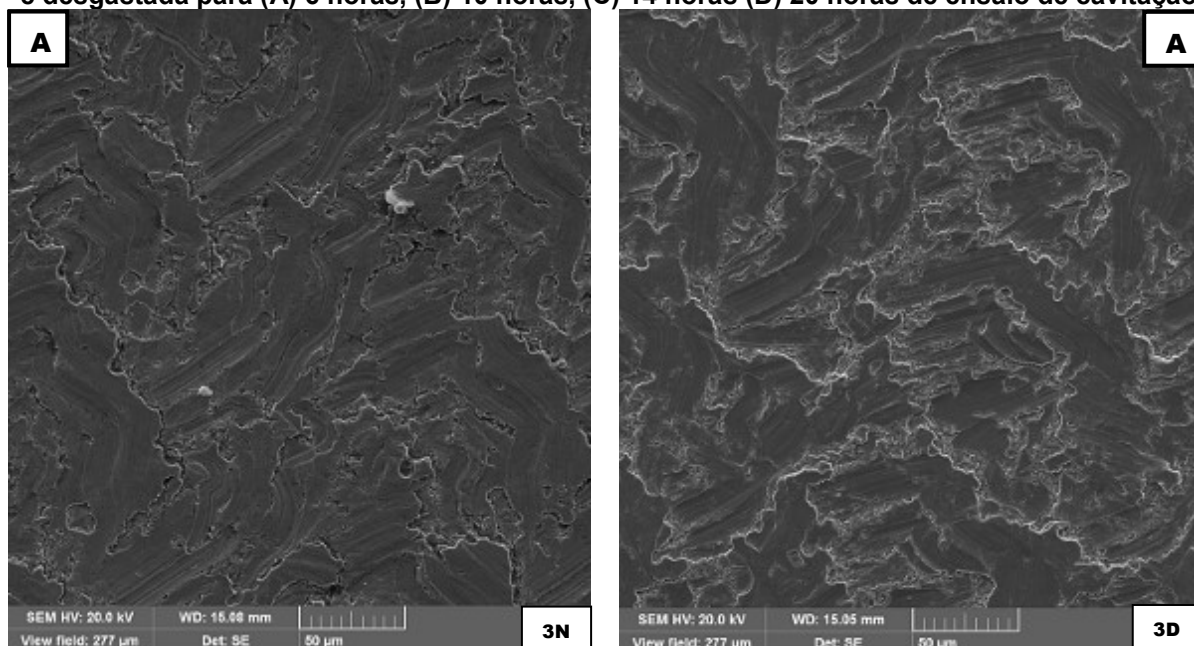
Figura 33 – (A) Aspecto da superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição nova após 14 horas de ensaio, (B) surgimento de poros na amostra após 20 horas de ensaio.

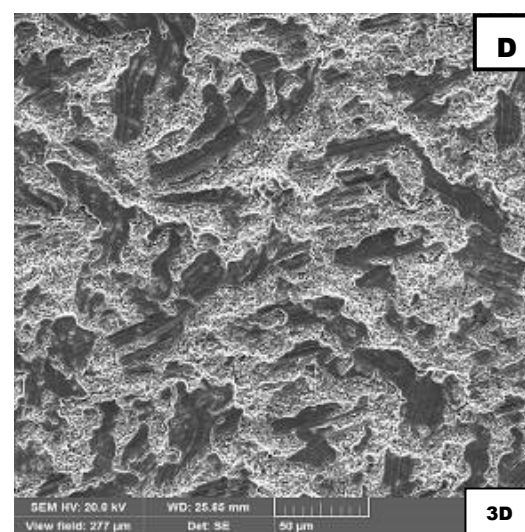
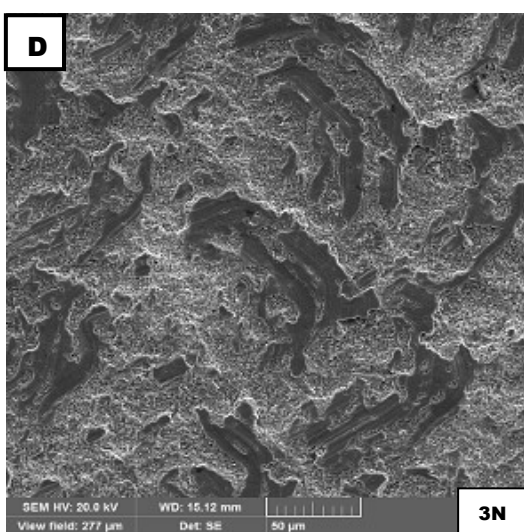
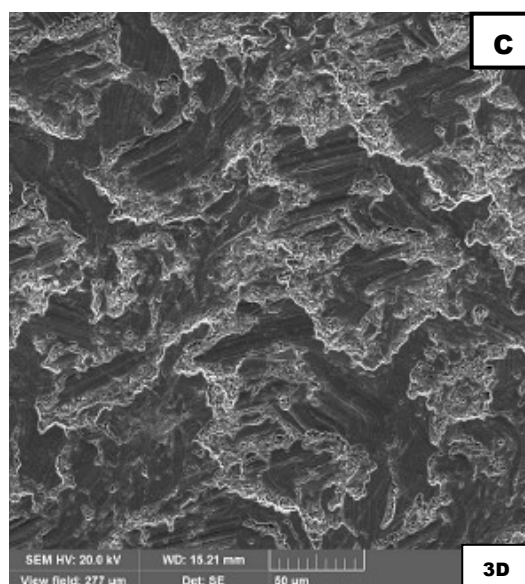
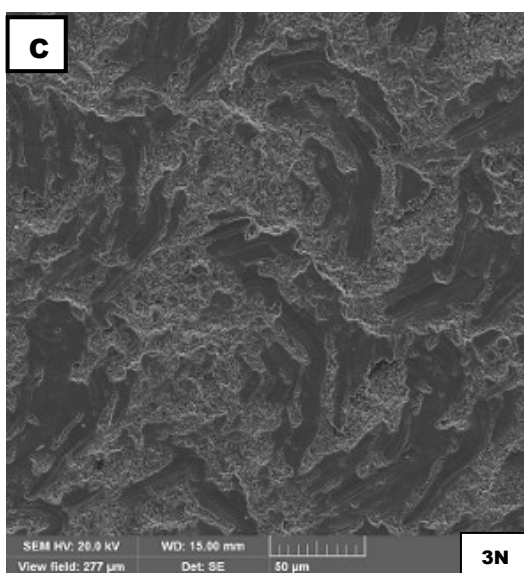
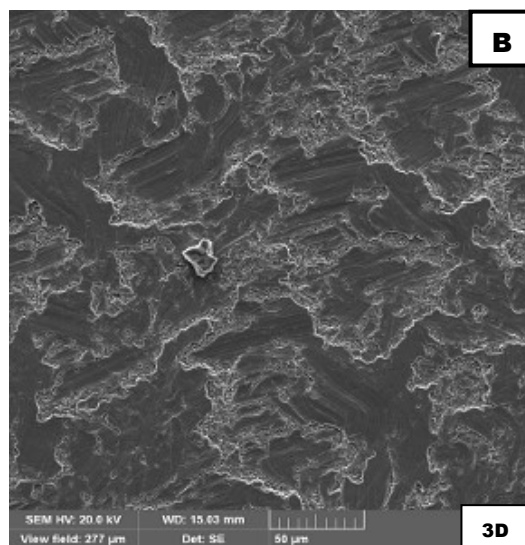
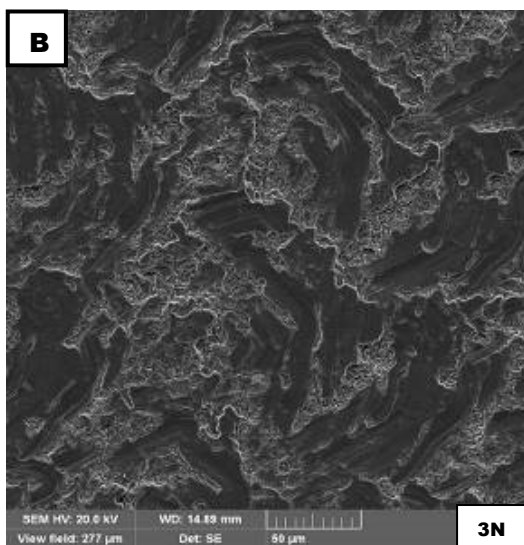


Fonte: Autor

A evolução geral das superfícies 3N e 3D foi muito similar, tendo apresentado o mesmo mecanismo de desgaste. Um comparativo das superfícies nos intervalos de (A) 6, (B) 10, (C) 14 e (D) 20 horas de ensaio pode ser visualizado na figura 34.

Figura 34 – Evolução morfológica das superfícies obtidas com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição nova e desgastada para (A) 6 horas, (B) 10 horas, (C) 14 horas (D) 20 horas de ensaio de cavitação.



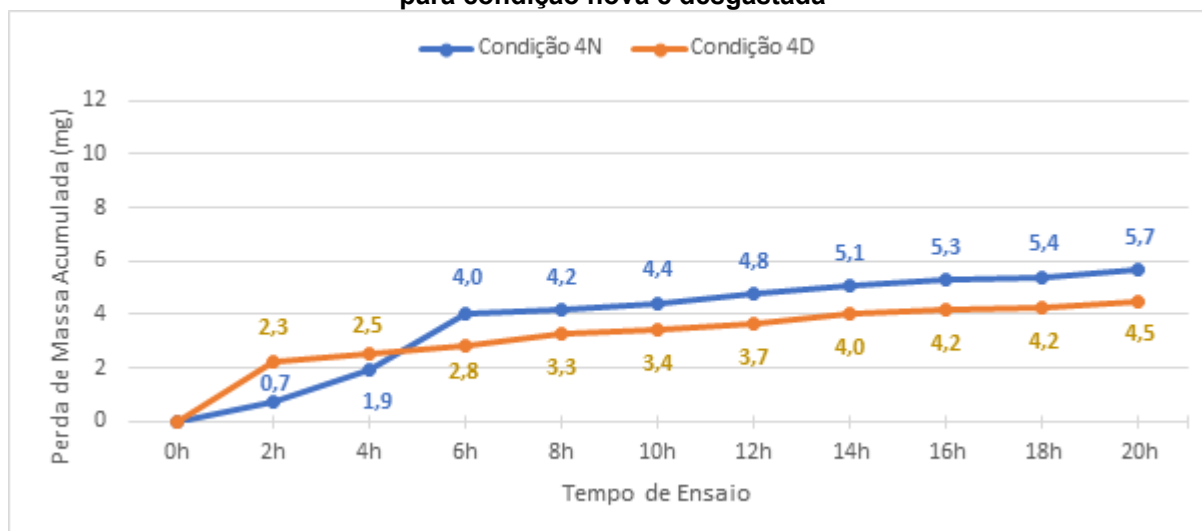


Ao final do ensaio, nas ampliações observadas, nota-se o arredondamento dos contornos de rebarba, caracterizando assim o mecanismo da fratura dúctil como predominante na remoção de material.

4.3.4 Desempenho Superfícies Geradas nas Condições 4N e 4D

A perda de massa nas superfícies obtidas nas condições 4N e 4D são mostradas no gráfico 10.

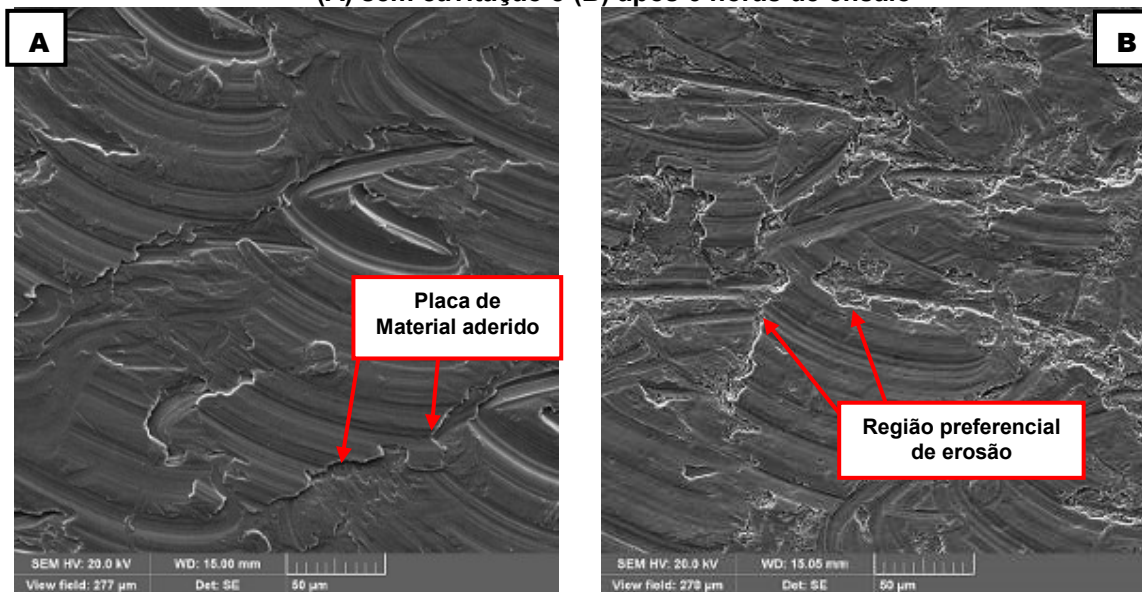
Gráfico 10 – Curvas de perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostras usinadas, utilizando ferramenta de cabeça intercambiável, com f_z 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min para condição nova e desgastada



Fonte: Autor

A curva de perda de massa na superfície gerada pela condição 4N é bastante acentuada até a sexta hora de ensaio, estabilizando-se a partir de então até a conclusão do experimento. A maior perda de massa ocorreu na região de material aderido à superfície usinada, que incubou rapidamente a erosão, como pode ser visto na figura 35 na condição (A) sem cavitação e (B) após 6 horas de ensaio.

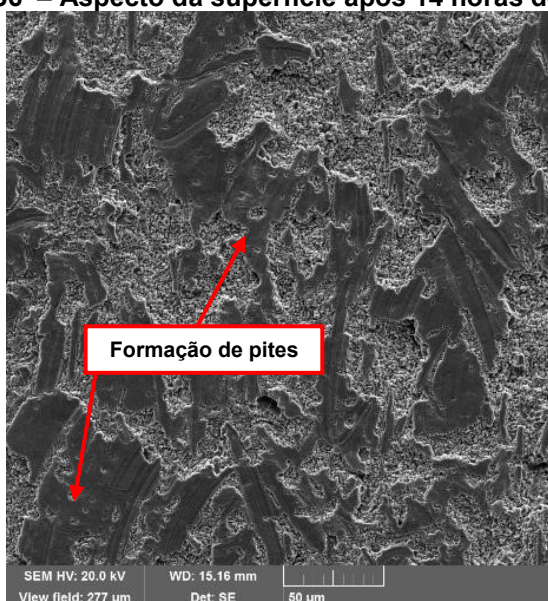
Figura 35 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição nova (A) sem cavitação e (B) após 6 horas de ensaio



Fonte: Autor

O mecanismo de desgaste observado inicialmente foi combinado a fratura por fadiga, e permaneceu o mesmo até a décima quarta hora. Após 14 horas de ensaio o dano evoluiu para uma combinação de efeitos do arrancamento de material das bordas e da erosão gerada pela formação e nucleação de pites. Com 20 horas de ensaio o dano provocado extraiu grande parte da região usinada. Pode-se observar o aspecto da superfície após 14 horas de ensaio na figura 36.

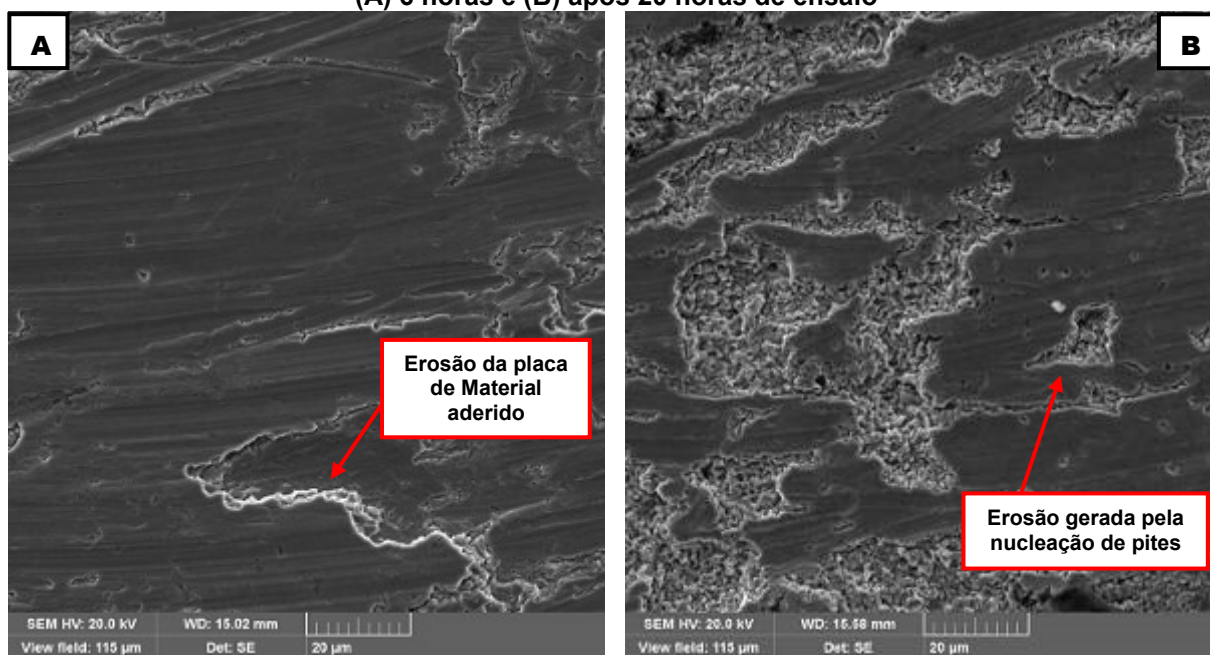
Figura 36 – Aspecto da superfície após 14 horas de ensaio.



Fonte: Autor

A amostra gerada na condição 4D apresenta comportamento semelhante, divergindo no tempo para estabilização da curva, que aconteceu na segunda hora de ensaio. O fenômeno se deve principalmente a extração de material das zonas de borda pela vibração do sonotrodo. O aspecto da superfície da amostra pode ser observado na figura 37 em (A) 6 horas, (B) 20 horas de ensaio.

Figura 37 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição nova (A) 6 horas e (B) após 20 horas de ensaio

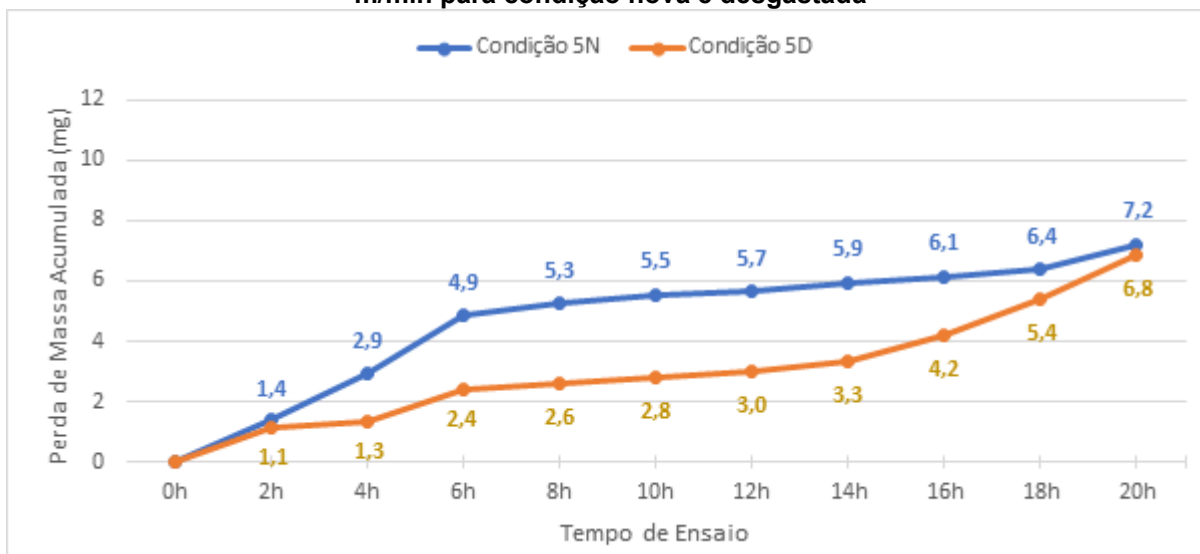


Fonte: Autor

4.3.5 Desempenho Superfícies Geradas nas Condições 5N e 5D

A perda de massa das amostras geradas pelas condições de usinagem 5N e 5D é apresentada no gráfico 11.

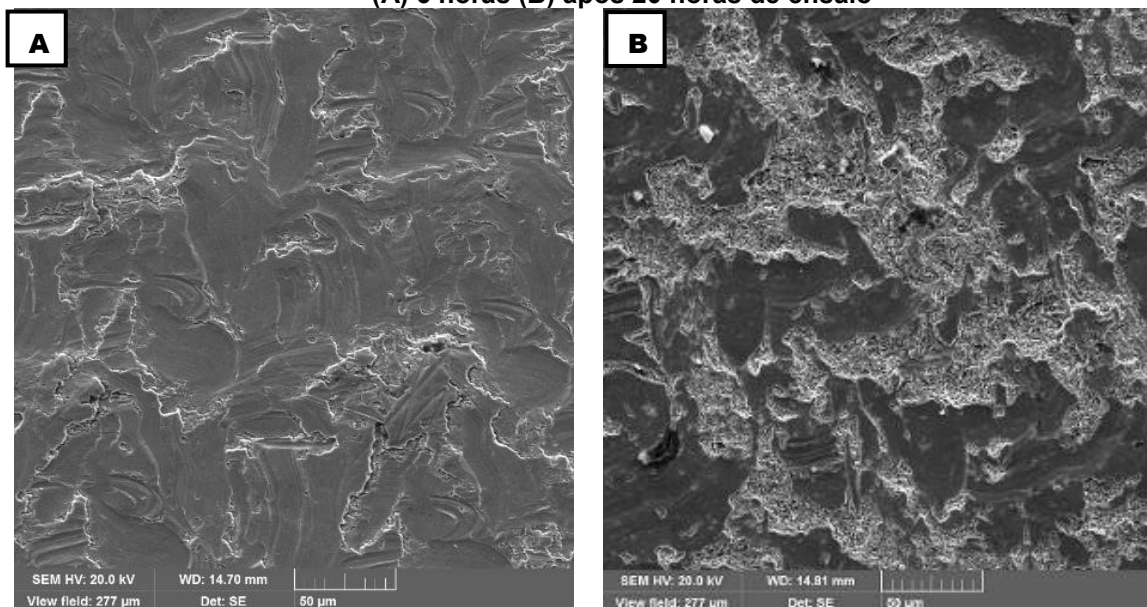
Gráfico 11 – Curvas de perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostras usinadas, utilizando ferramenta de inserto intercambiável, com f_z 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min para condição nova e desgastada



Fonte: Autor

A amostra 5N apresentava grande quantidade de marcas típicas de fresamento, que foram o local principal de formação do processo erosivo, como visto na figura 38A. O dano evoluiu seguindo tendência de arrancamento de material inicialmente aderido, progredindo para formação e nucleação de pites, tendo culminado finalmente em uma erosão mais profunda, removendo grande parte da região prévia, como visto na figura 38B.

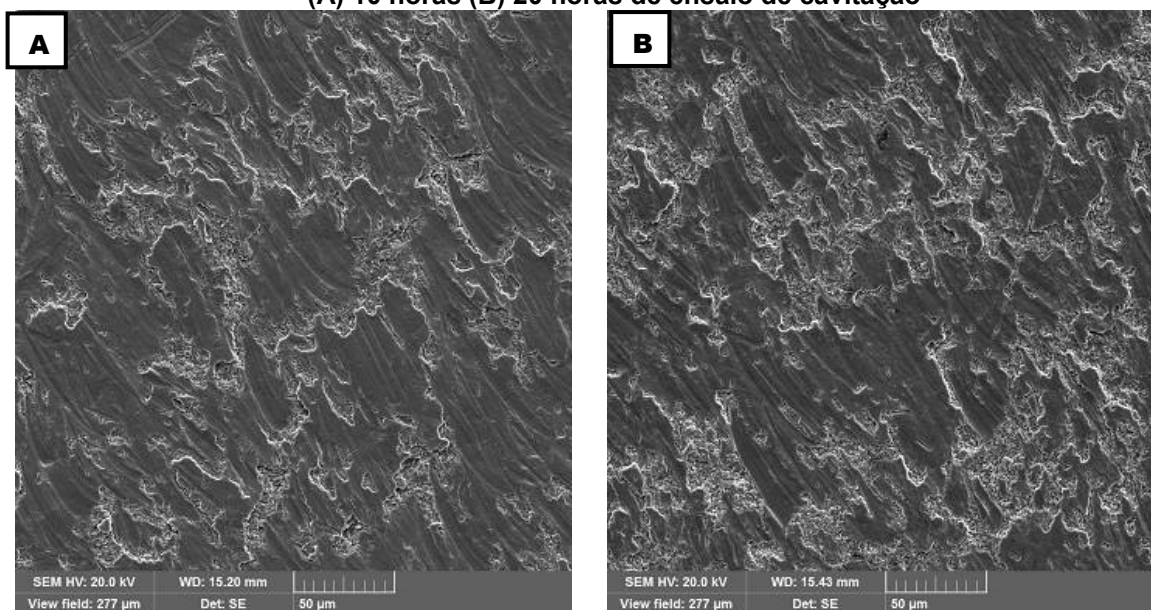
Figura 38 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição nova após (A) 6 horas (B) após 20 horas de ensaio



Fonte: Autor

Na amostra 5D houve o aparecimento de poros na superfície nas primeiras horas de ensaio, elevando a perda de massa. Com 10 horas de ensaio, a remoção de material se acentuou em virtude das diferentes alturas nas marcas de usinagem (figura 39A), tendo em 20 horas de ensaio preservação de uma parte da zona usinada (figura 39B). O mecanismo de desgaste é similar ao da amostra 5N.

Figura 39 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável em condição desgastada' após (A) 10 horas (B) 20 horas de ensaio de cavitação

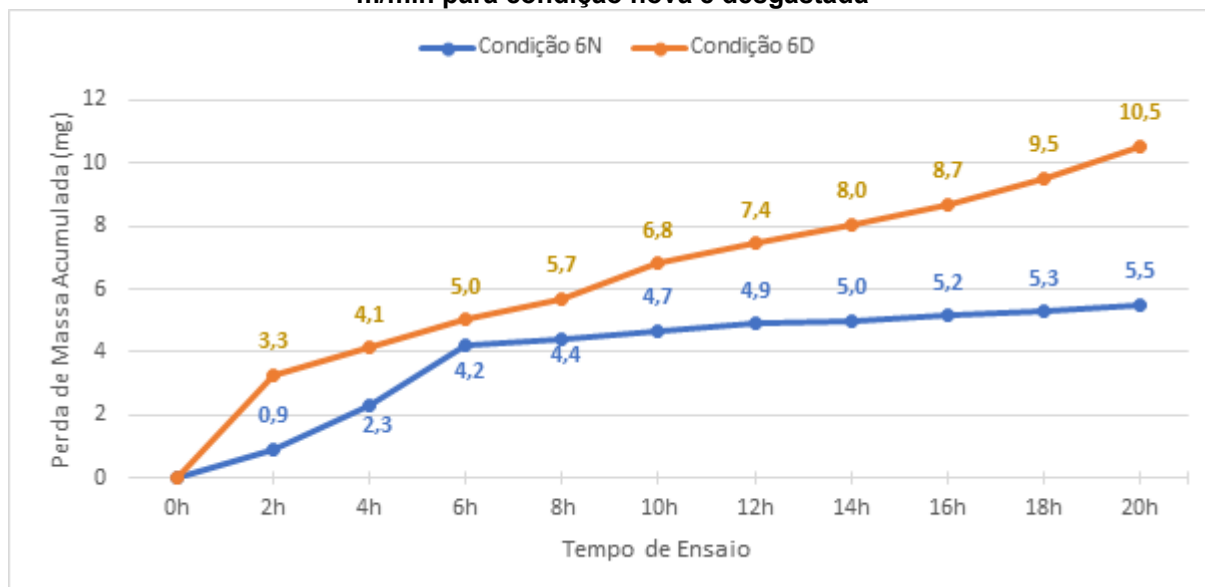


Fonte: Autor

4.3.6 Desempenho Superfícies Geradas nas Condições 6N e 6D

As curvas de perda de massa das amostras obtidas com condições de usinagem 6N e 6D são mostradas no gráfico 12.

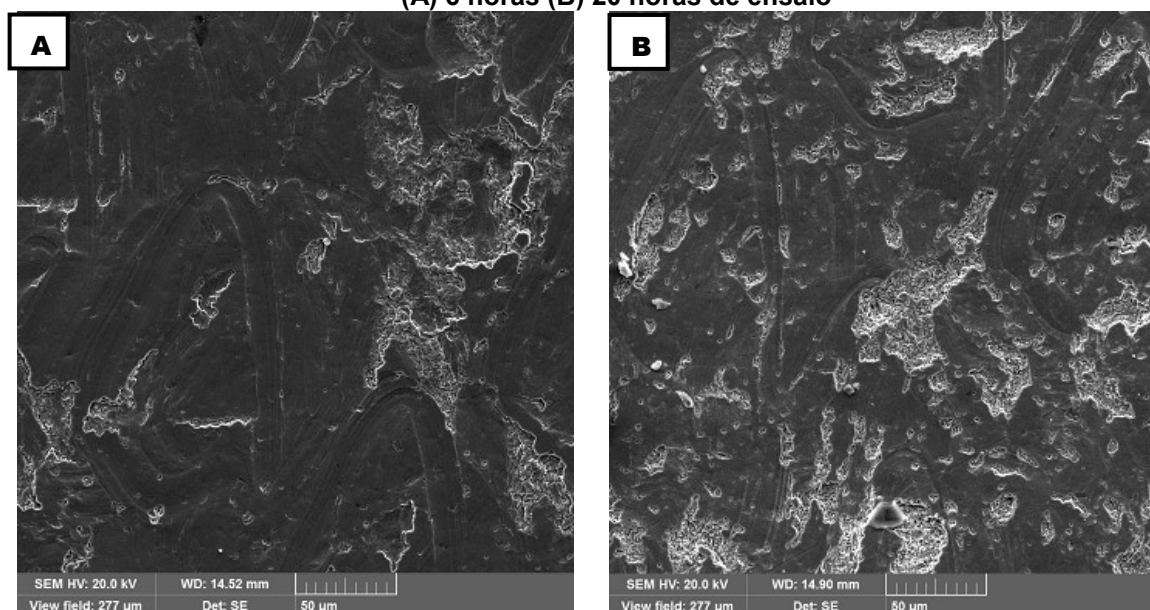
Gráfico 12 – Curvas de perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostras usinadas, utilizando ferramenta de cabeça intercambiável, com f_z 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min para condição nova e desgastada



Fonte: Autor

Na amostra 6N ocorreu incubação do processo de cavitação nas regiões com falhas de usinagem, observado no intervalo de 6 horas de ensaio (figura 40A), onde observou-se também grande formação de pequenos pites, que nuclearam ao longo do tempo formando crateras, resultando num aspecto final muito similar a condição 4N após 20 horas de ensaio (figura 40B).

Figura 40 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição nova após (A) 6 horas (B) 20 horas de ensaio

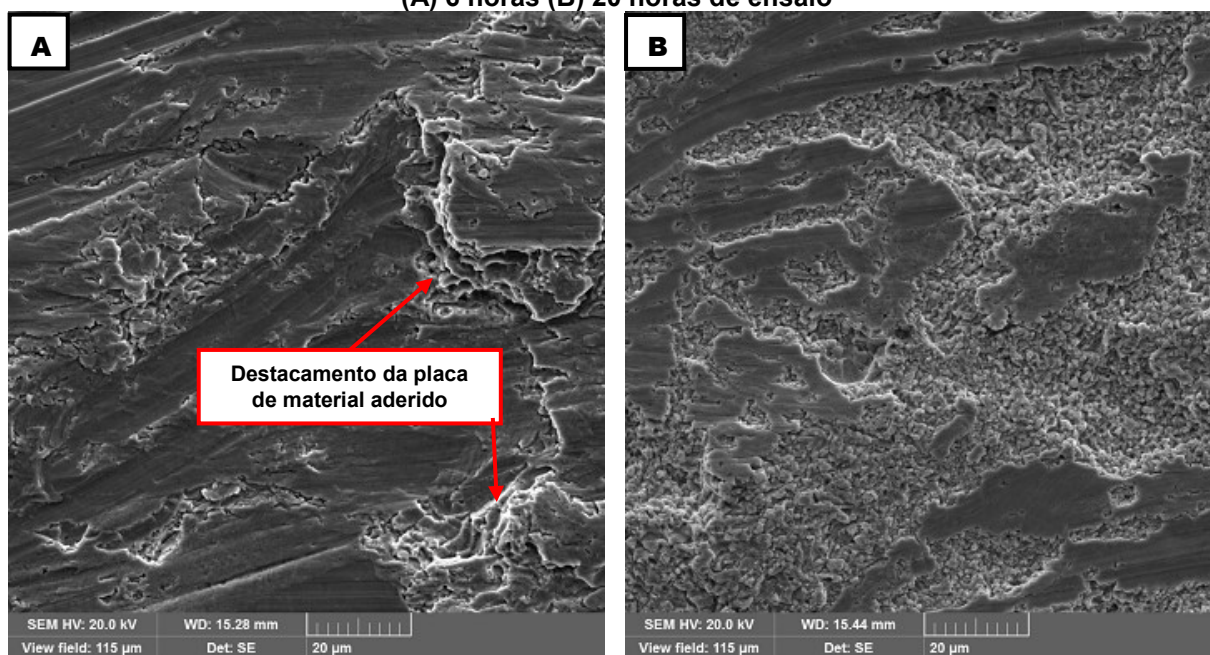


Fonte: Autor

A amostra 6D apresentou muitas diferenças de altura na sua superfície, sendo essas causadoras de um efeito muito intenso de erosão. Observa-se que, com apenas seis horas de ensaio de cavitação, as regiões das bordas já apresentavam desgaste, praticamente, no regime permanente, enquanto que as regiões vizinhas ainda mantêm o aspecto do usinado, porém com aparecimento de pites. O motivo para esta diferença se deve ao fato que as bordas, em função do efeito de entalhe, deformam-se e encruam de forma mais acelerada e, portanto, possibilitam nucleação de microtrincas muito antes que as regiões proximais.

Em 20 horas o dano evoluiu significativamente a ponto de remover quase por completo a região usinada (figura 41B). O mecanismo principal de desgaste durante todo o ensaio foi a microfratura por fadiga superficial ocorrendo por meio do destacamento de placas de cavaco aderido pela usinagem.

Figura 41 – Superfície obtida com os parâmetros de usinagem f_z de 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável em condição desgastada após (A) 6 horas (B) 20 horas de ensaio



Fonte: Autor

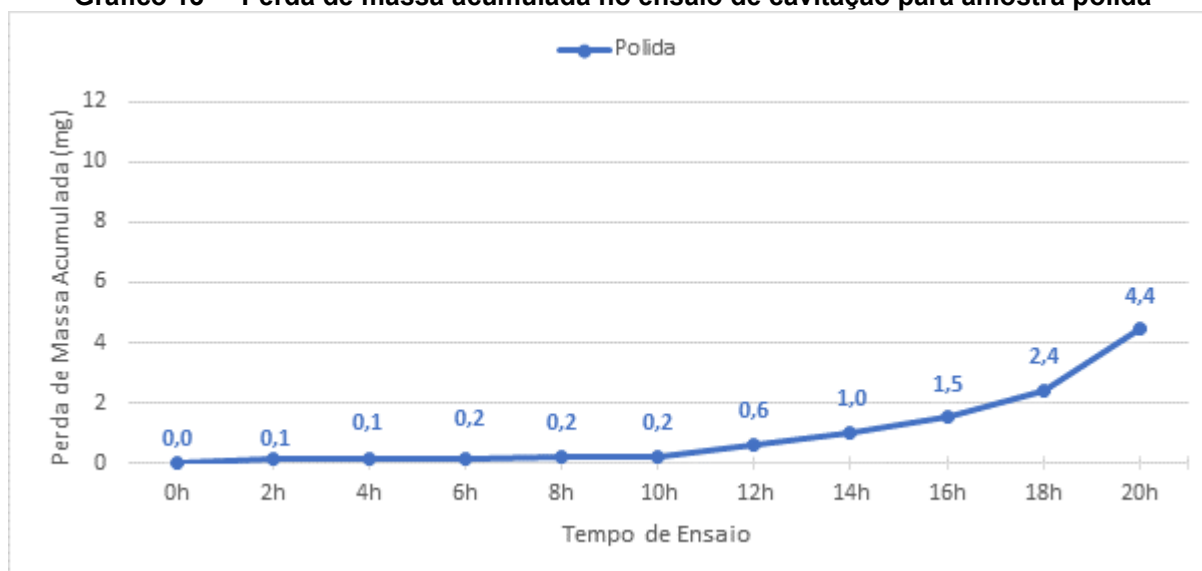
4.3.7 Desempenho da Superfície Polida

A superfície polida não apresentou perda de massa significativamente mensurável no início do ensaio, sendo possível observar formação de curva apenas

a partir da décima hora do ensaio. O erro associado a medição com o equipamento utilizado pode justificar a pequena porção medida nas primeiras horas.

A curva de perda de massa acumulada para o período de ensaio na amostra polida é apresentada no gráfico 13.

Gráfico 13 – Perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostra polida



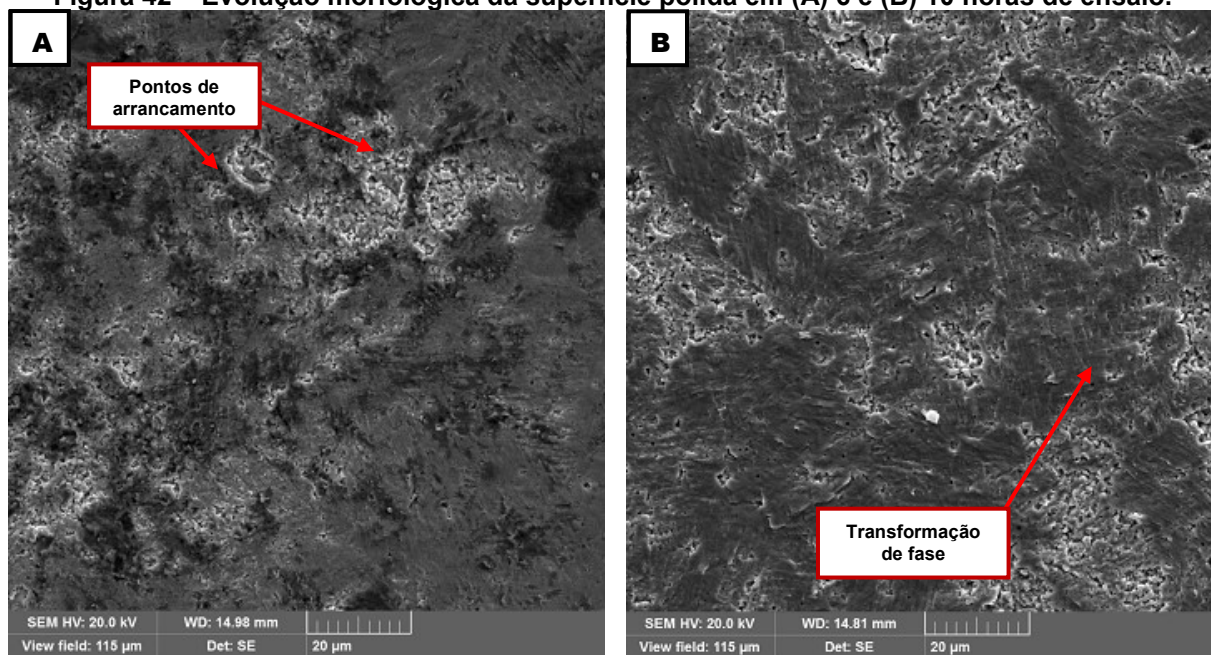
Fonte: Autor

A curva tem uma alteração brusca na faixa das 10 horas de ensaio, aumentando novamente sua inclinação na décima oitava hora. A literatura estabelece que para determinação do período de incubação, deve-se observar o intervalo de tempo compreendido entre o cruzamento da linha formada pelo coeficiente de inclinação da reta (taxa máxima de erosão) e o eixo das abcissas (ASTM G32, 2006). Essa metodologia sugere um intervalo entre 15 e 16 horas, estando abaixo do tempo nominal de incubação do CaviTec, determinado em 20 a 24 horas (PROCOPIAK, 1997; WILL, 2008; SANTA, 2011). As micrografias, porém, sugerem um estágio de incubação mais adiantado. Não é possível a determinação da hora exata em virtude do reduzido número de pontos para formação da curva.

O resultado aponta que houve incubação acelerada do efeito da cavitação, possivelmente ocorrido pela presença acentuada de microporosidades, presença de inclusões, bem como pela preparação da amostra ter sido realizada sob um espécime pré-usinado podendo este estar pré-encruado. Na figura 42 (A) após 6 horas de ensaio, observou-se arrancamento de material na superfície, condizente com erosão em zonas de inclusões ou porosidade, preexistentes na amostra.

Observa-se na figura 42 (B) após 10 horas de ensaio, a formação de estruturas triangulares típicas de indicação da transformação de fase na cavitação com consequente deformação superficial. Ainda se observa através das bandas de escorregamento muito finas o início da fratura por fadiga, aliado ao arrancamento acelerado das zonas pré erodidas.

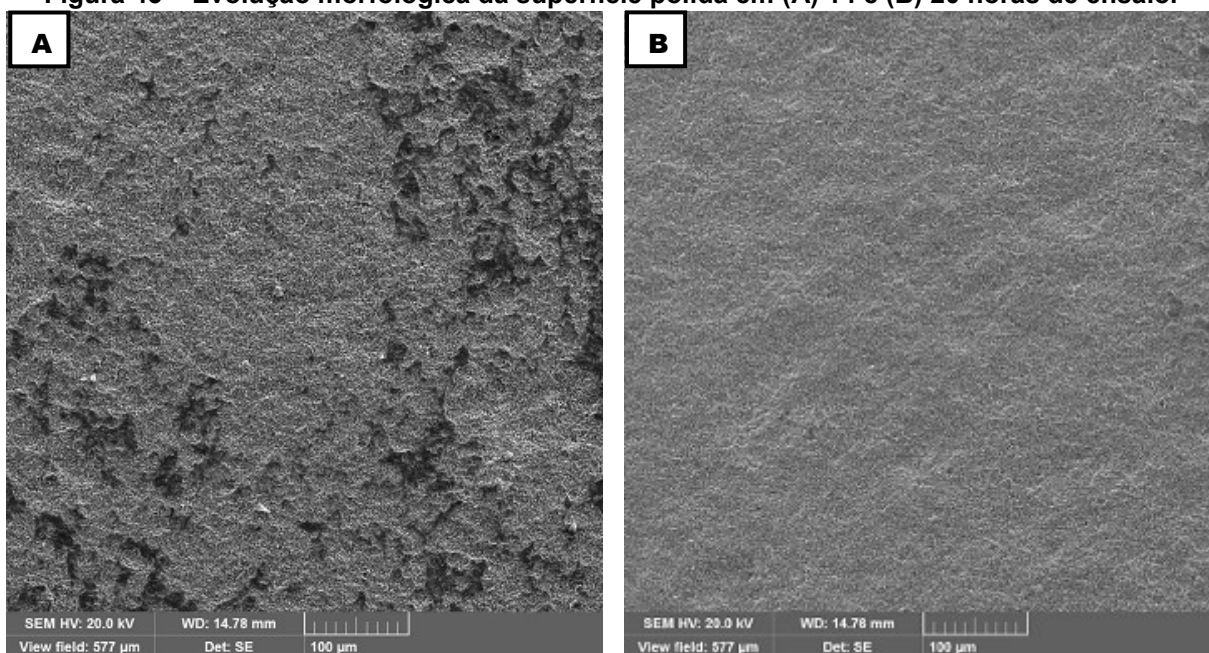
Figura 42 –Evolução morfológica da superfície polida em (A) 6 e (B) 10 horas de ensaio.



Fonte: Autor

Com o avanço do ensaio, a amostra apresentou perda de massa mais agressiva que nas amostras usinadas, tendo sido removido uma poção muito significativa da região polida na marca de 14 horas de ensaio, e extraindo por completo a zona polida na marca de 20 horas. Uma visualização da morfologia é observada na figura 43 em (A) 14 horas de ensaio, (B) 20 horas de ensaio.

Figura 43 –Evolução morfológica da superfície polida em (A) 14 e (B) 20 horas de ensaio.

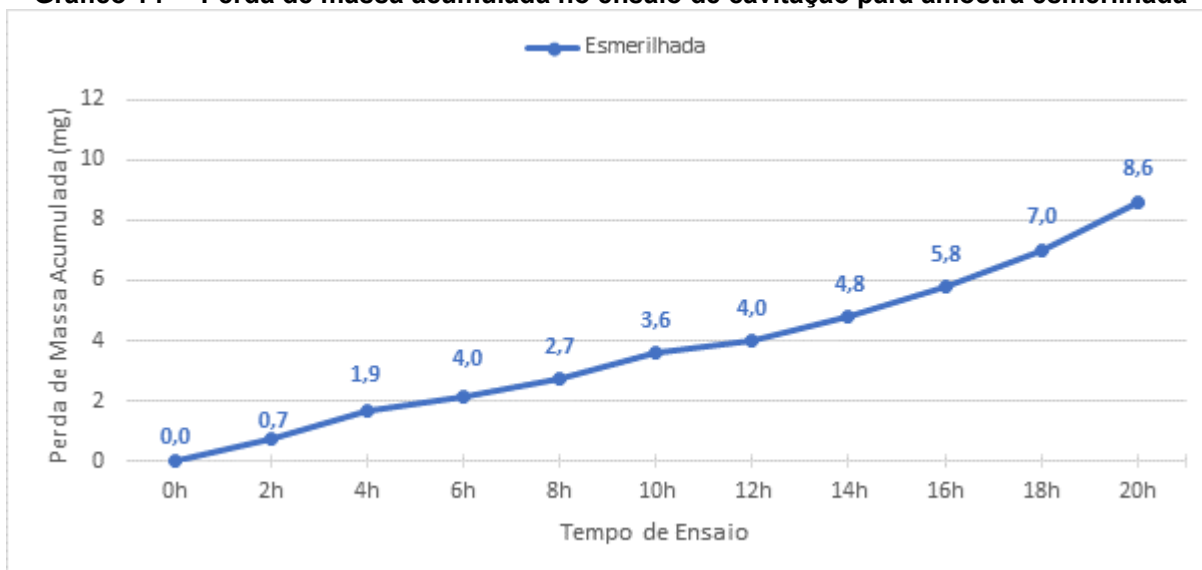


Fonte: Autor

Como o dano foi progressivo a partir da décima hora, sugere-se que o período compreendido entre 10 e 14 horas seria o ponto de incubação da cavitação comprovado pelas imagens da superfície após o ensaio, embora a inclinação da curva de perda de massa no ponto de 18 para 20 horas sugira outra interpretação. O resultado indica que o processo de fresamento influencia fortemente a resistência a cavitação.

4.3.8 Desempenho da Superfície Esmerilhada

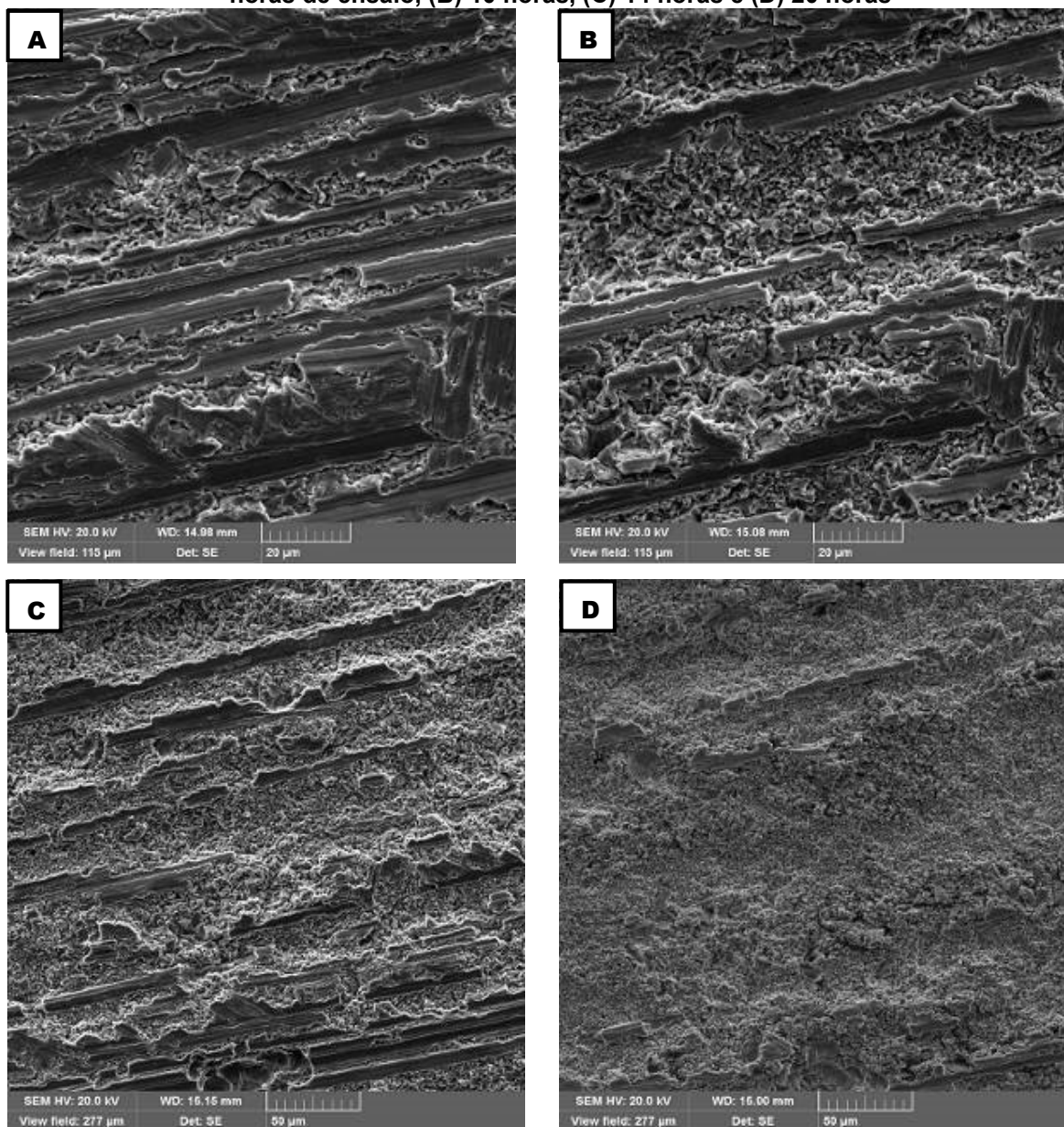
A curva de perda de massa acumulada para a amostra esmerilhada é apresentada no gráfico 14.

Gráfico 14 – Perda de massa acumulada no ensaio de cavitação para amostra esmerilhada

Fonte: Autor

Uma quantidade pequena do revestimento foi removida da amostra nas primeiras 6 horas de ensaio em comparação com as amostras usinadas, comprovando novamente o fenômeno da remoção de escamas de material aderido nas amostras fresadas, e inexistência desta no acabamento esmerilhado. Para a amostra esmerilhada, a evolução do dano em relação a taxa de perda de massa permaneceu relativamente constante ao longo do ensaio, tendo uma leve elevação próximo da marca de 16 horas. Uma visualização do estado de superfície ao longo do ensaio é mostrada na figura 44 (A) 6 horas, (B) 10 horas, (C) 14 horas e (D) 20 horas.

Figura 44 –Evolução morfológica da superfície esmerilhada no ensaio de cavitação após (A) 6 horas de ensaio, (B) 10 horas, (C) 14 horas e (D) 20 horas



Fonte: Autor

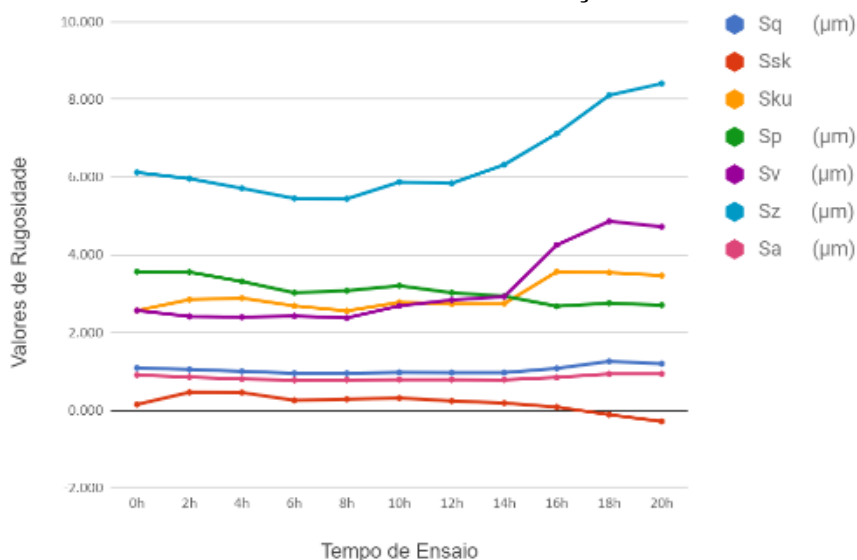
Nota-se a incubação do processo erosivo nas regiões com riscos mais profundos, evoluindo progressivamente com arrancamento de material através do mecanismo de fadiga por microfratura, até a remoção quase completa da superfície esmerilhada ao final do ensaio. Um material com imperfeições e alto nível de rugosidade aumenta a probabilidade de início da cavitação e também a perda de massa devido ao colapso da bolha a longo prazo (BETANCUR, 2019). Não se percebe transformação de fase e o mecanismo da perda de massa é predominantemente o arrancamento de material em zonas de tensão, não havendo

em nenhuma etapa a formação de pites. O mecanismo de desgaste neste caso foi fortemente influenciado através da técnica de usinagem empregada.

4.4 ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA RUGOSIDADE

A evolução da superfície foi analisada extraindo dados dos parâmetros de superfície e amplitude. Os parâmetros de superfície tiveram comportamento muito similar aos parâmetros de amplitude observados, tendo curvas bastante semelhantes. A avaliação da rugosidade é uma ferramenta bastante útil para a análise do efeito da cavitação ao longo do tempo (TZANAKIS et al, 2017). Nem todos os parâmetros apresentam comportamento específico, devendo a análise dos parâmetros de rugosidade ter um objetivo bem definido, como estudar os estágios da cavitação, a evolução da topografia, o mecanismo de dano etc. As curvas de rugosidade de superfície “S” para a amostra 1N são apresentadas no gráfico 15.

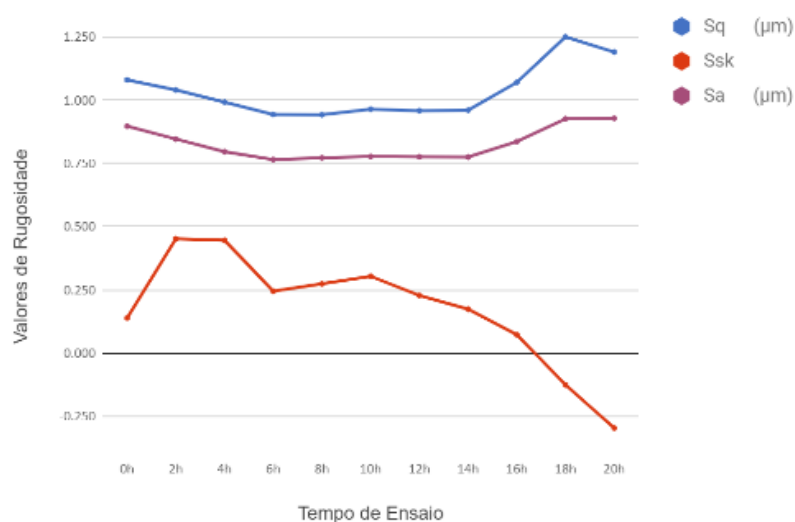
Gráfico 15 – Curva da evolução dos parâmetros de rugosidade de superfície obtidos para amostra nos parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição nova



Fonte: Autor

Os parâmetros Sa, Ssk, e Sq possuem um intervalo de variação dos dados menor o que leva a necessidade da observação em uma faixa de escala apropriada para interpretação. A representação em escala apropriada para a evolução ao longo do ensaio dos parâmetros Sa, Ssk e Sq é demonstrada no gráfico 16.

Gráfico 16 – Curva de rugosidade de superfície nos parâmetros Sa, Ssk e Sq, da amostra obtida nos parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição nova

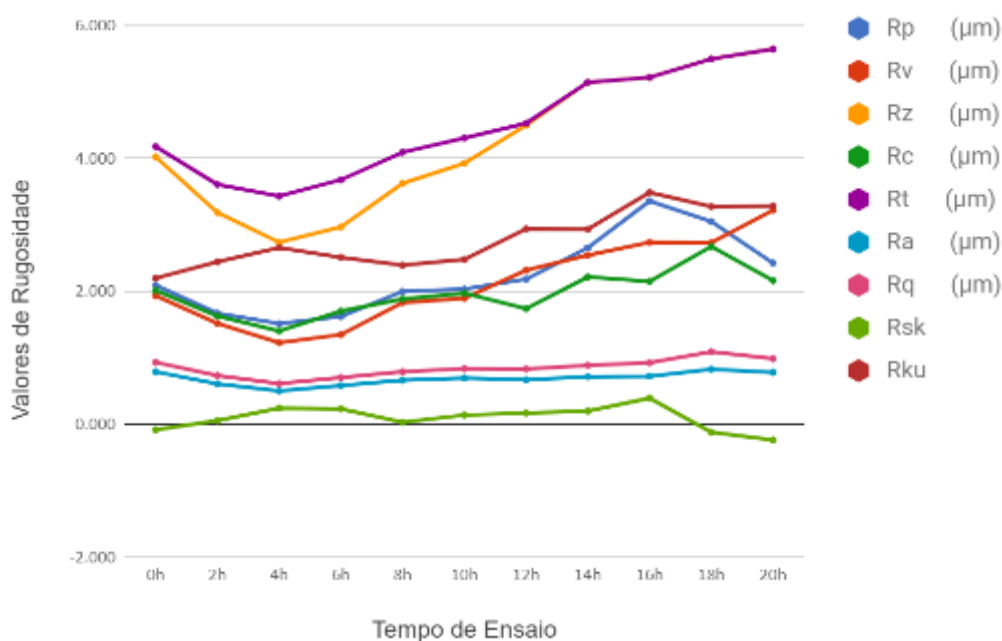


Fonte: Autor

O padrão de evolução para as amostras seguiu o modelo dos parâmetros Sa e Sz, tendo também para todas as amostras, negatificação do parâmetro Ssk. A negatificação de Ssk indica que a superfície está inclinada abaixo da linha média, padrão topográfico de remoção de material condizente com o ensaio.

Tendo um comportamento aproximado nos parâmetros equivalentes, as curvas de rugosidade de amplitude da amostra 1N apresentaram-se como mostrado no gráfico 17.

Gráfico 17 – Curva da evolução dos parâmetros de rugosidade de amplitude para amostra obtida nos parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição nova



Fonte: Autor

Nota-se que nem todos os parâmetros extraídos, tanto em superfície quanto em amplitude, fornecem uma relação clara do processo de cavitação ao longo do tempo em relação aos estágios e a perda de massa. Algumas curvas representam melhor a evolução da superfície frente ao dano erosivo visualizado na morfologia da superfície das amostras, enquanto outras mostram-se aleatórias.

De modo geral, os parâmetros que demonstraram melhor sensibilidade e correlação com a superfície observada e curva gerada (dentro da faixa de amplitude) para o ensaio de cavitação acelerada foram Sz, Rz e Rt, Sa e Ra. Para a análise das amostras, foi utilizado o parâmetro Sz, em virtude da maior capacidade de correlação com o processo, maior área útil compreendida, bem como a melhor capacidade de reprodução do estado de superfície analisado. A escolha é baseada na literatura, que sugere média aritmética ou altura máxima de irregularidades (AHMED, 1990).

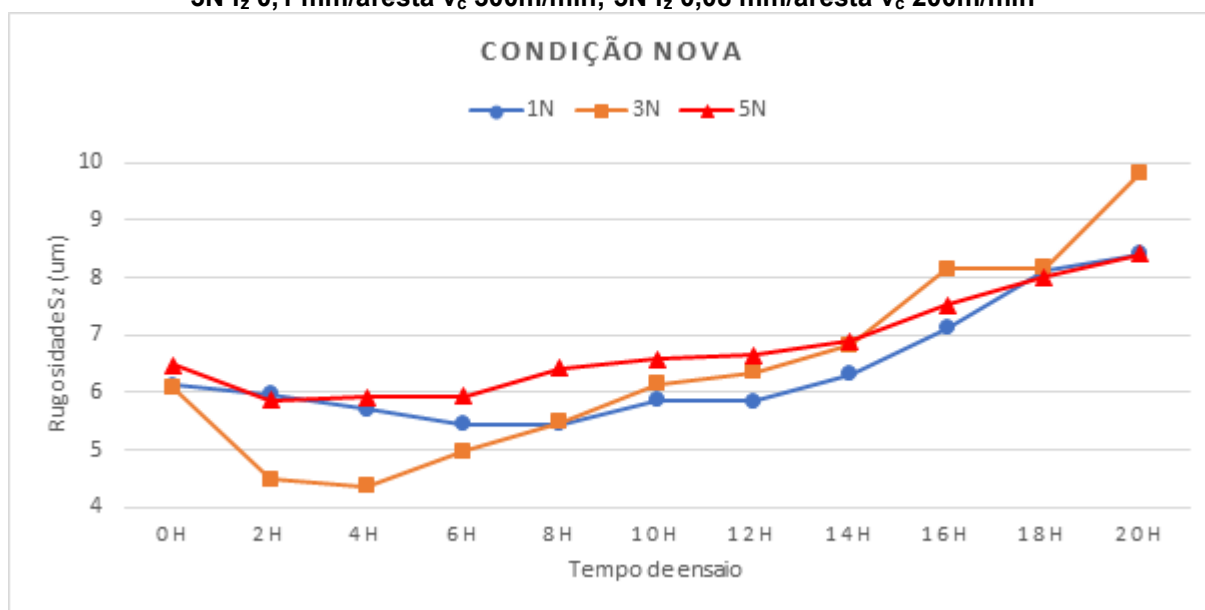
4.4.1 Ferramenta de Inserto Intercambiável Nova

Para as superfícies geradas por ferramentas de inserto intercambiável, as análises foram feitas em relação as condições de ferramenta nova (1N, 3N e 5N) e desgastada (1D, 3D e 5D).

4.4.1.1 Condição nova

Uma visualização das curvas de rugosidade de superfície no parâmetro S_z para as amostras produzidas com a ferramenta de inserto intercambiável com parâmetros de usinagem 1N, 3N e 5N ao longo do ensaio de cavitação, é apresentada no gráfico 18.

Gráfico 18 – Curva de rugosidade de amplitude S_z para as amostras usinadas com ferramenta de inserto intercambiável na condição nova, nos parâmetros 1N: f_z 0,1 mm/aresta v_c 200m/min; 3N f_z 0,1 mm/aresta v_c 300m/min; 5N f_z 0,08 mm/aresta v_c 200m/min

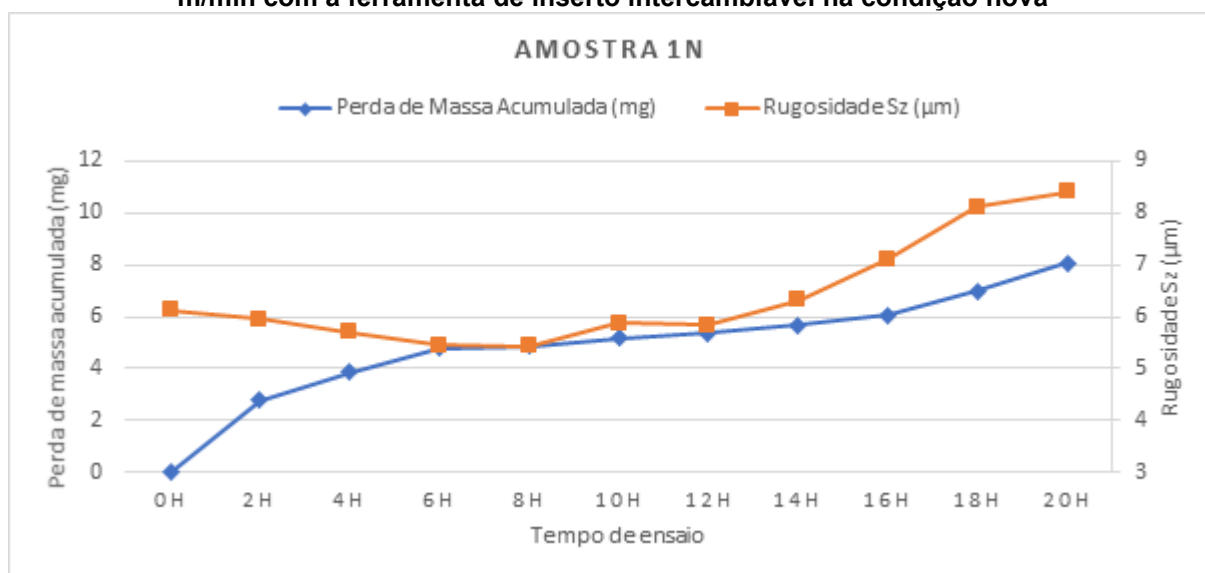


Fonte: Autor

Nota-se que para as condições de usinagem que mantiveram o avanço mais elevado (1N e 3N), obteve-se comportamento similar, com decréscimo da rugosidade no período inicial, e elevação posterior, intensificando nas horas finais do ensaio. A amostra 5N apresentou aumento da rugosidade, não demonstrando decréscimo.

Os resultados verificados na curva reforçam a teoria sobre o fenômeno da remoção de material aderido pela usinagem. Com a remoção das escamas/placas aderidas, a diferença de altura da superfície tende a diminuir, fazendo com que a rugosidade diminua, o que de fato ocorreu. Após esta remoção, a tendência é o aumento progressivo da rugosidade, conforme avança o processo erosivo, o que foi verificado no decorrer das medições. A literatura sugere 3 intervalos distintos para modificação da rugosidade superficial, sendo aumento discreto, elevação substancial e estabilização (CHIU, 2005). Estes intervalos devem coincidir com os intervalos representados na curva de perda de massa, porém nos resultados obtidos, houve um fenômeno distinto: a redução da rugosidade nas horas iniciais, sugerindo remoção de picos de rugosidade dispersos (microrrebarbas e/ou defeitos pontuais) que reduziram o patamar de rugosidade máxima observada, estando de acordo com a teoria de remoção de material aderido. Este fenômeno é melhor visualizado na sobreposição dos dados de perda de massa e rugosidade em escala, conforme observado no gráfico 19 para a amostra 1N.

Gráfico 19 – Sobreposição das curvas de rugosidade de amplitude Sz e perda de massa acumulada para amostra obtida nos parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição nova



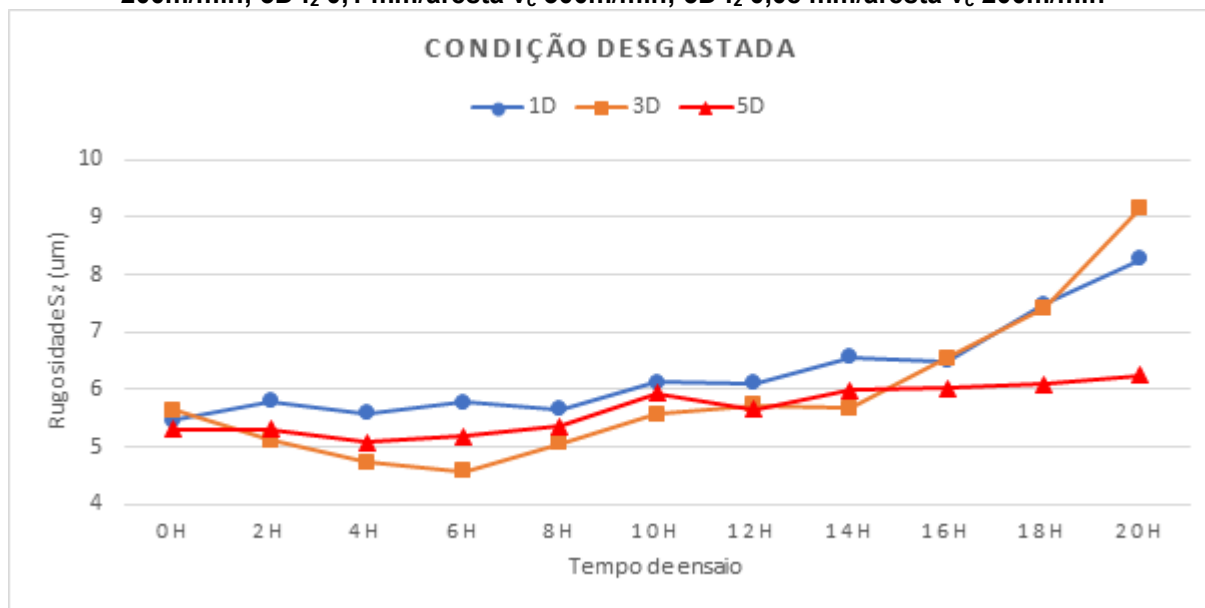
Fonte: Autor

O mesmo efeito é obtido na amostra 3N e 5N.

4.4.1.2 Condição desgastada

Uma visualização das curvas de rugosidade de superfície no parâmetro Sz para as amostras 1D, 3D e 5D é apresentada no gráfico 20.

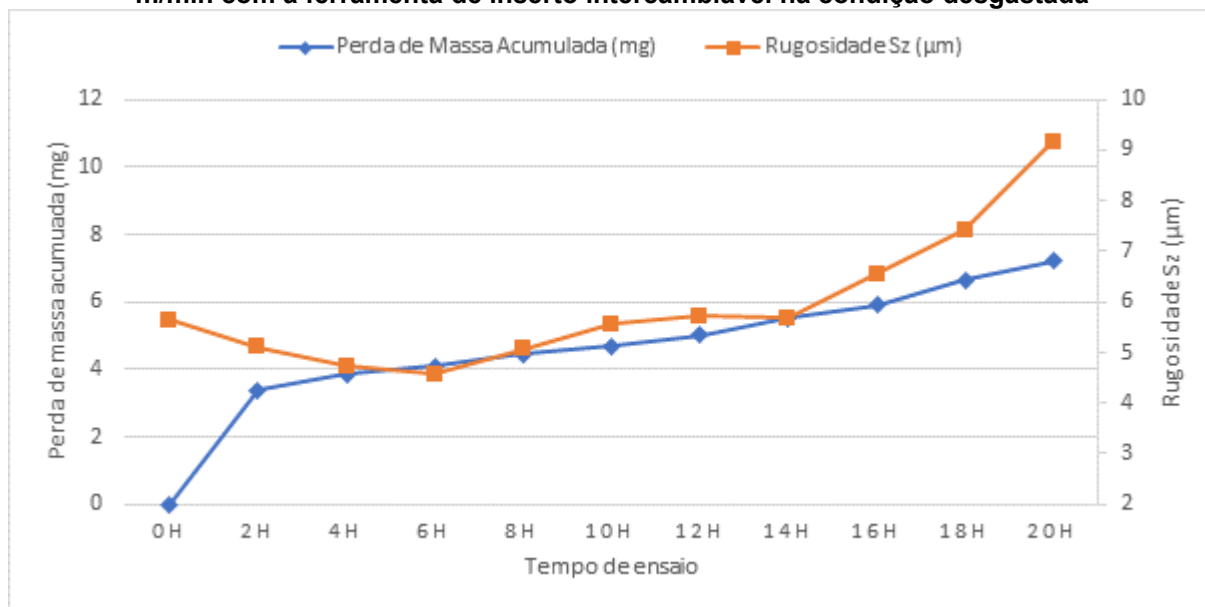
Gráfico 20 – Curva de rugosidade de amplitude Sz para as amostras usinadas com ferramenta de inserto intercambiável na condição desgastada, nos parâmetros 1D: f_z 0,1 mm/aresta v_c 200m/min; 3D f_z 0,1 mm/aresta v_c 300m/min; 5D f_z 0,08 mm/aresta v_c 200m/min



Fonte: Autor

A amostra 3D apresentou a curva característica que vem de encontro a evolução do dano observado através das micrografias nas amostras: redução de rugosidade pela remoção de cristas/material de aderido seguido de uma elevação progressiva através da erosão. A amostra 1D apresentou evolução da curva em menor acentuação, não sendo verificado o efeito de redução de rugosidade nas seis primeiras horas de ensaio. A amostra 5D acompanhou este aspecto, tendo, porém, elevação discreta no patamar de rugosidade ao fim do ensaio em comparação ao observado inicialmente. Quando da sobreposição dos dados, a amostra 3D foi a única a apresentar correlação da rugosidade com a perda de massa conforme observado no gráfico 21.

Gráfico 21 – Sobreposição das curvas de rugosidade de amplitude Sz e perda de massa acumulada para amostra obtida nos parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de inserto intercambiável na condição desgastada



Fonte: Autor

A amostra 5D teve patamar de rugosidade praticamente constante ao longo do ensaio, não sendo possível correlacionar conjuntamente a sobreposição dos dados com períodos do processo de erosão. A amostra 1D teve acentuação da curva de Sz na décima sexta hora de ensaio com discreta elevação da perda de massa na respectiva hora, indicando aceleração do processo erosivo.

Os resultados sugerem que a diminuição do avanço promove resultados indiretamente melhores na resistência à cavitação, sendo está otimizada em virtude do melhor acabamento da superfície. A alteração da velocidade de corte não se mostrou muito significativa na resistência a erosão para condição desgastada.

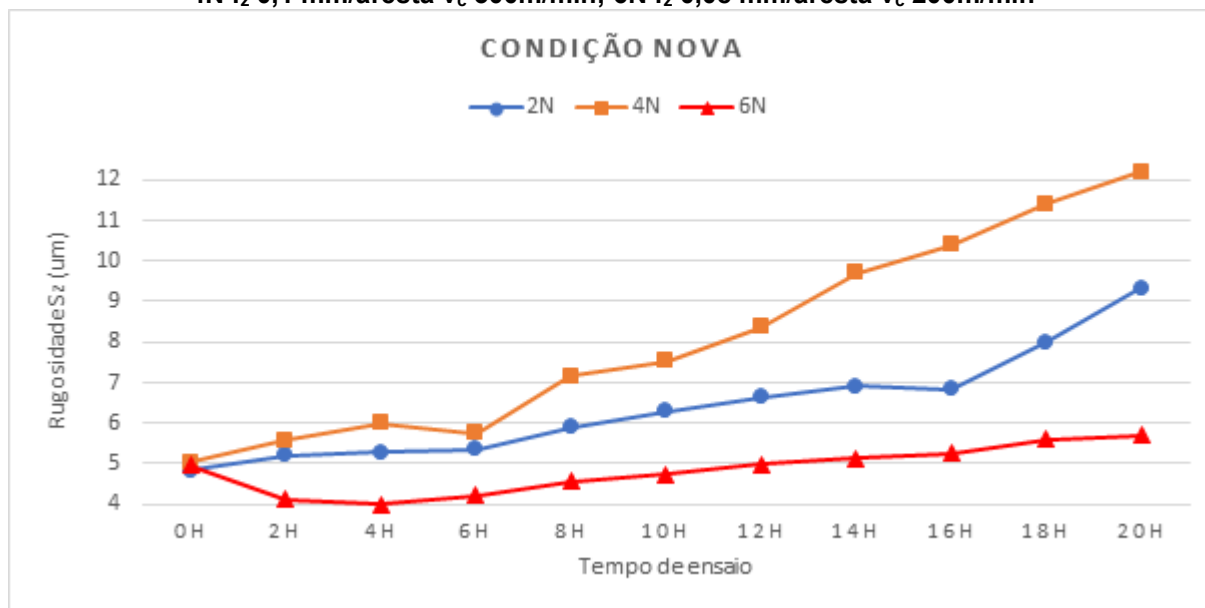
4.4.2 Ferramenta de Cabeça Intercambiável

A análise das superfícies geradas pela ferramenta de cabeça intercambiável foi realizada utilizando as condições de ferramenta nova (2N, 4N e 6N) e desgastada (2D, 4D e 6D).

4.4.2.1 Condição nova

A curva de evolução de rugosidade S_z para a ferramenta de cabeça intercambiável nas condições 2N, 4N e 6N é apresentada no gráfico 22.

Gráfico 22 – Curva de rugosidade de amplitude S_z para as amostras usinadas com ferramenta de cabeça intercambiável na condição nova, nos parâmetros 2N: f_z 0,1 mm/aresta v_c 200m/min; 4N f_z 0,1 mm/aresta v_c 300m/min; 6N f_z 0,08 mm/aresta v_c 200m/min

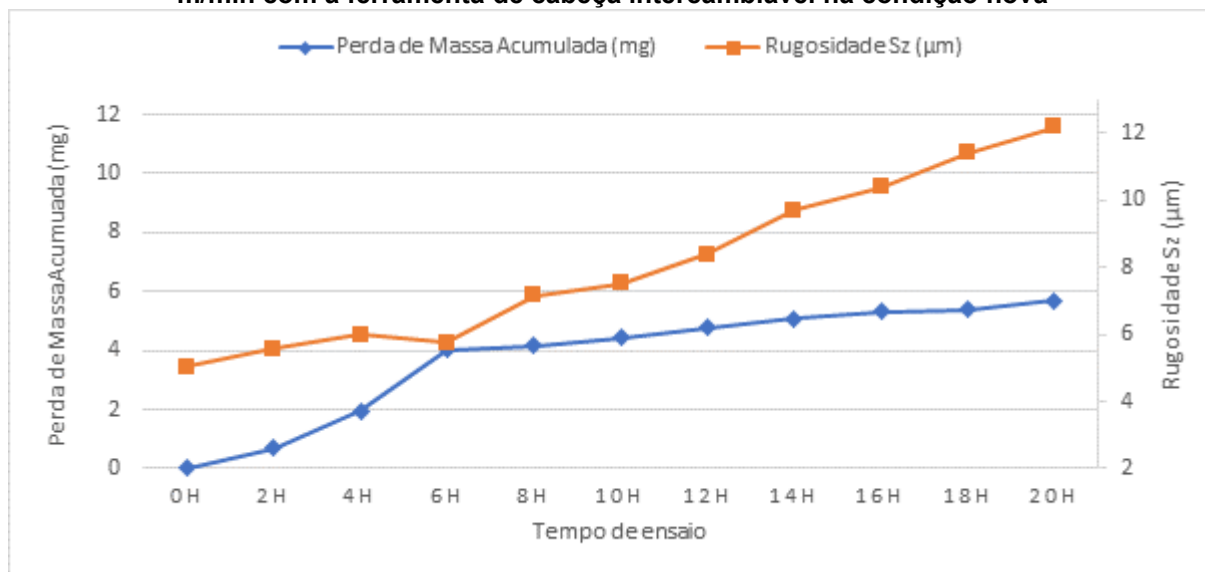


Fonte: Autor

A amostra de ensaio 2N apresentou elevação contínua da rugosidade ao longo do ensaio, não sendo possível a correlação desta com o processo erosivo até a décima sexta hora de ensaio, onde há uma alteração na inclinação da curva, sugerindo erosão mais agressiva, o que é comprovado pela morfologia da superfície das micrografias.

A evolução do perfil de rugosidade é bastante expressiva nas condições de usinagem 4N, que envolve ajuste dos parâmetros de corte no nível superior. O comportamento da curva na condição 4N expressa um efeito de aumento sequencial da rugosidade, sendo possível verificar evolução mais intensa a partir da sexta hora de ensaio, o que sugere a incubação do efeito de cavitação propriamente dito conforme sugere a literatura (AHMED, 1990) (BORDEASU, 2016). Os dados convergem quando a comparação com a sobreposição da perda de massa conforme observado no gráfico 23.

Gráfico 23 – Sobreposição das curvas de rugosidade de amplitude Sz e perda de massa acumulada para amostra obtida nos parâmetros de usinagem f_z de 0,1 mm/aresta e v_c 300 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável na condição nova



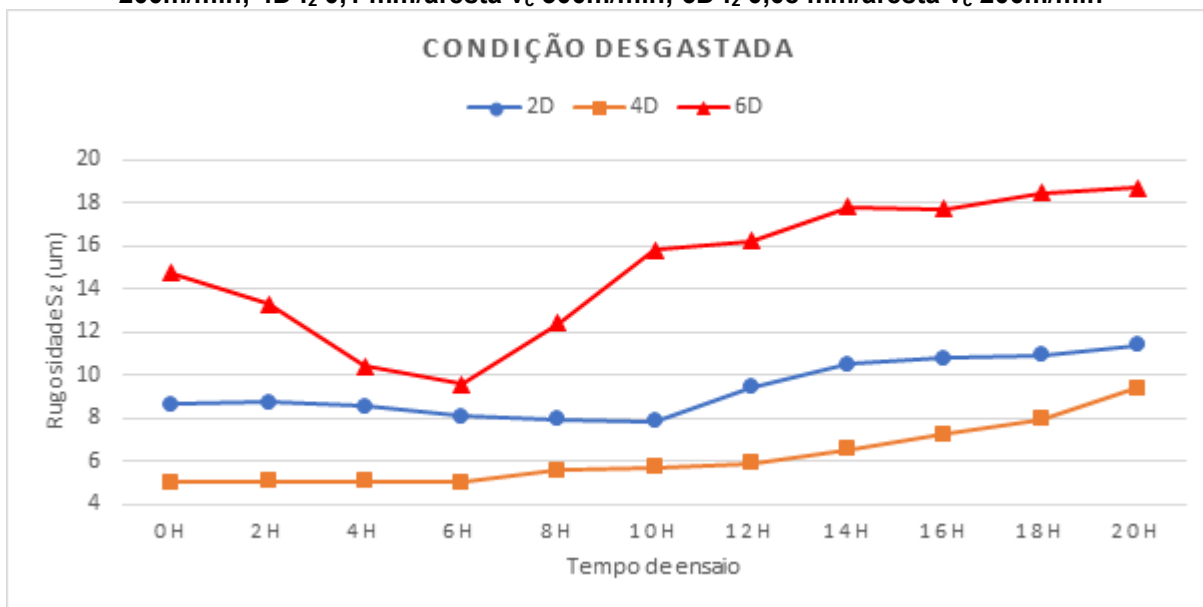
Fonte: Autor

Na amostra 6N seguiu-se o padrão de alteração visto nas amostras usinadas por ferramenta com inserto intercambiável, sendo a redução discreta na rugosidade até a sexta hora de ensaio, evoluindo para um aumento de rugosidade até o fim do ensaio, sendo este aumento acentuado para o conjunto 6N.

4.4.2.2 Condição desgastada

Os dados relativos à evolução da rugosidade para as amostras 2D, 4D e 6D, no parâmetro Sz é observado no gráfico 24.

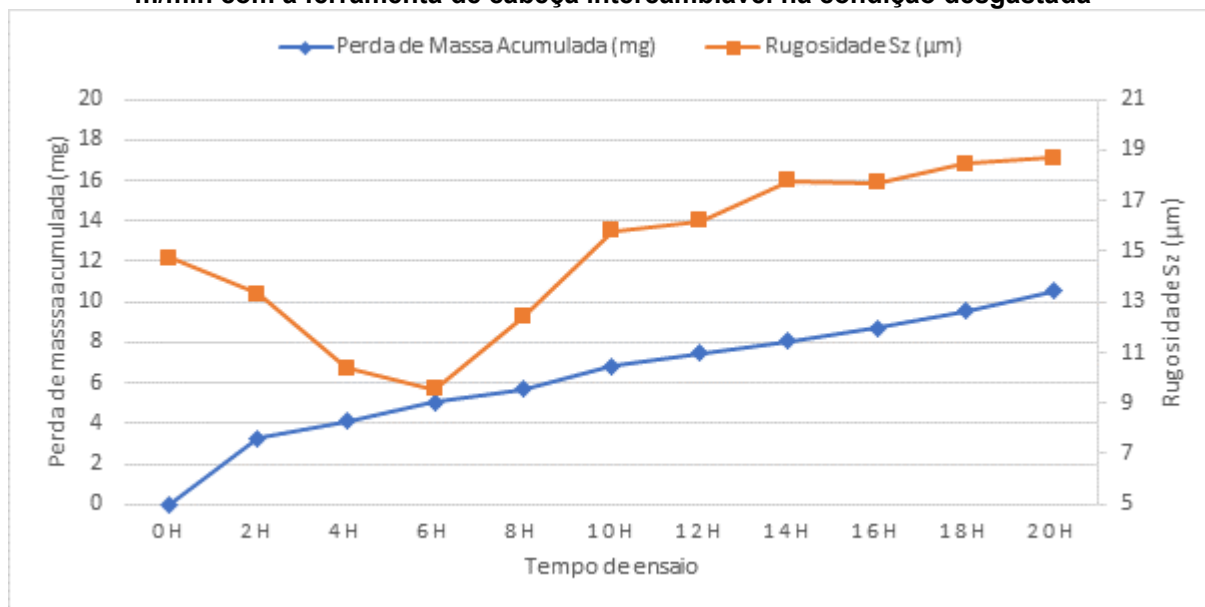
Gráfico 24 – Curva de rugosidade de amplitude Sz para as amostras usinadas com ferramenta de cabeça intercambiável na condição desgastada, nos parâmetros 2D: f_z 0,1 mm/aresta v_c 200m/min; 4D f_z 0,1 mm/aresta v_c 300m/min; 6D f_z 0,08 mm/aresta v_c 200m/min



Fonte: Autor

Percebe-se a influência da geometria de corte da ferramenta muito mais agressiva no parâmetro do avanço em comparação com a velocidade de corte (GÖKKAIA, NALBANT). Na amostra 6D, que possui parâmetros de corte inferiores (menor avanço e menor velocidade de corte), os resultados de rugosidade obtidos ao longo do ensaio mostram uma queda muito brusca de Sz quando das 6 primeiras horas de ensaio, evidenciando grande remoção de picos de rugosidade (provenientes cavaco aderido na usinagem) associado a baixa perda de massa através de erosão por cavitação propriamente dita. A afirmação se baseia na comparação com a sobreposição dos dados de perda de massa, que não demonstra grandes acúmulos de material perdido conforme visualizado no gráfico 25.

Gráfico 25 – Sobreposição das curvas de rugosidade de amplitude Sz e perda de massa acumulada para amostra obtida nos parâmetros de usinagem f_z de 0,08 mm/aresta e v_c 200 m/min com a ferramenta de cabeça intercambiável na condição desgastada



Fonte: Autor

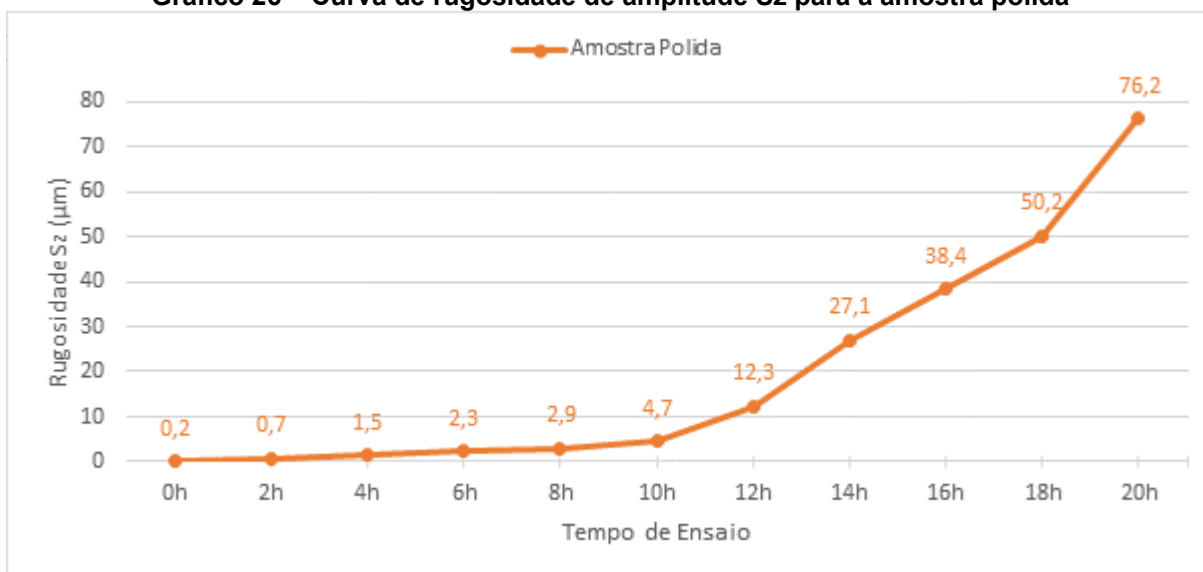
Em comparação a mesma condição na ferramenta nova, percebe-se que a geometria de corte comprometida influencia muito mais o resultado da usinagem que o ajuste de avanço em si.

As amostras 2D e 4D apresentaram comportamento mais atenuado no que se refere a evolução de Sz evoluindo de forma muito similar entre si e divergindo nos valores iniciais de rugosidade. A influência do desgaste de flanco para as condições de variação apenas da velocidade de corte não se mostrou efetivamente significativa.

4.4.3 Amostra Polida

A amostra polida demonstrou evolução da rugosidade em patamar lento até o ponto de 12 horas de ensaio, alterando drasticamente a inclinação da curva observada, sugerindo, portanto, que a incubação ocorreu neste intervalo de tempo. A curva de evolução da rugosidade no parâmetro Sz é mostrada no gráfico 26.

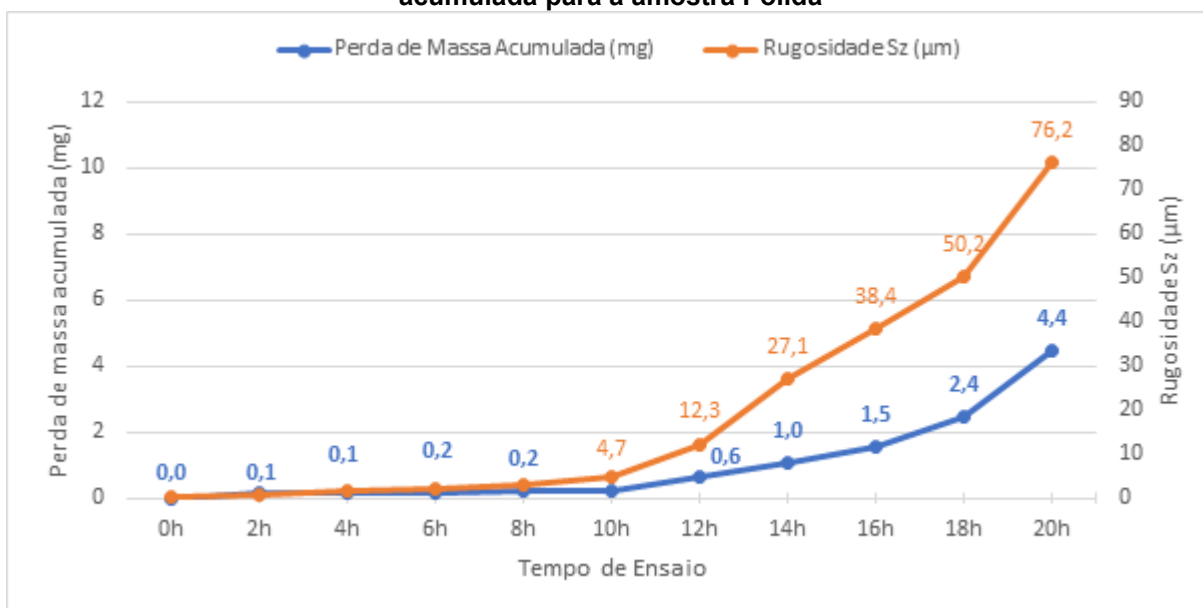
Gráfico 26 – Curva de rugosidade de amplitude Sz para a amostra polida



Fonte: Autor

O comportamento obtido demonstra correlação entre a evolução da rugosidade medida e o fenômeno da cavitação observado nas micrografias, divergindo porem do tempo nominal de incubação dado pela literatura. Dados sobrepostos de perda de massa e evolução de rugosidade fomentam essa conclusão conforme visualizado no gráfico 27.

Gráfico 27 – Sobreposição das curvas de rugosidade de amplitude Sz e perda de massa acumulada para a amostra Polida

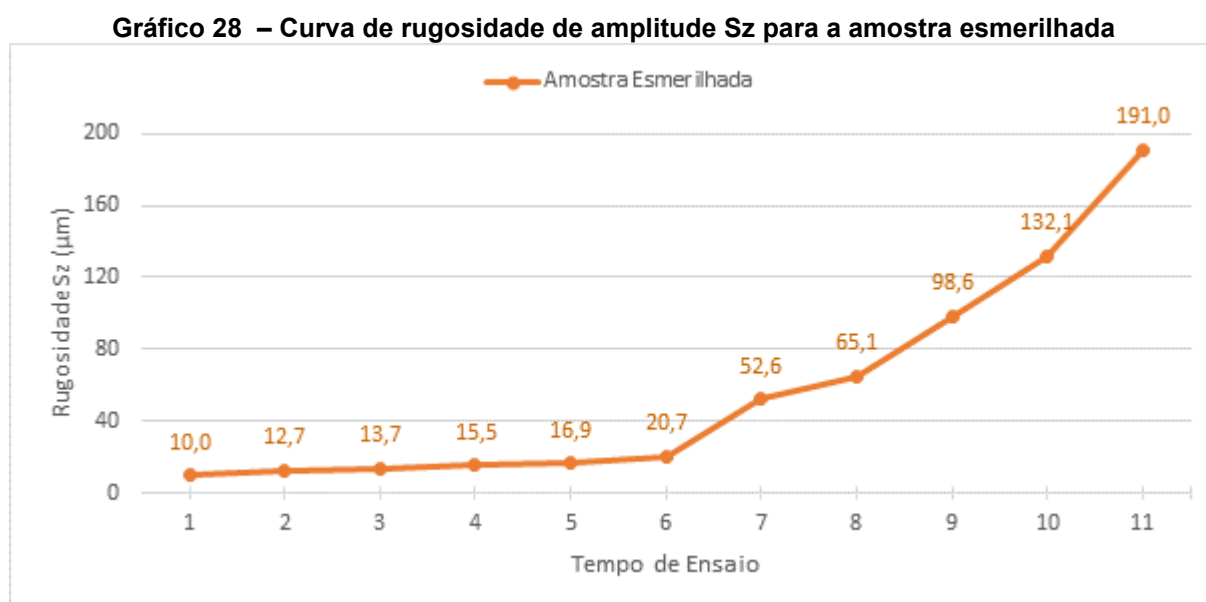


Fonte: Autor

Observa-se que na décima hora de ensaio, a rugosidade duplicou seu valor original, quadruplicando até a décima quarta hora e continuando a aumentar acompanhando a tendência da perda de massa acumulada. Os resultados estão coerentes com o que afirma (BOCCANERA, 1999).

4.4.4 Amostra Esmerilhada

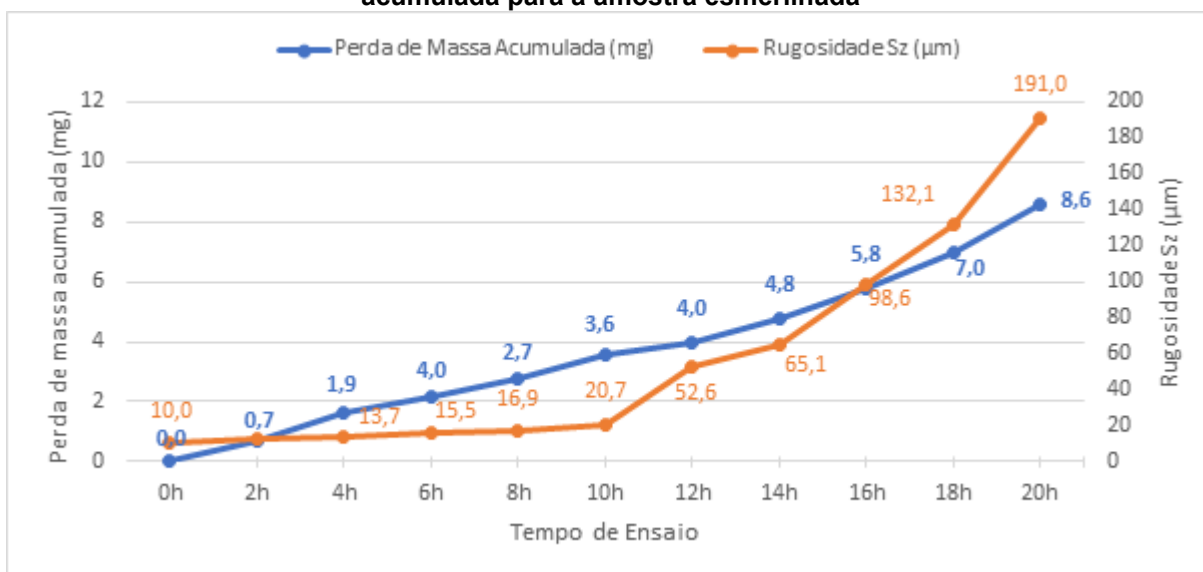
A amostra esmerilhada teve uma progressão contínua de rugosidade, em valores muito mais elevados frente comparação com a amostra polida e as amostras usinadas. A curva de rugosidade da amostra esmerilhada para o parâmetro Sz é apresentada no gráfico 28.



Fonte: Autor

Os valores absolutos de rugosidade são muito superiores do que para outras amostras, o que é algo esperado visto que o esmerilhamento é o pior processo de acabamento utilizado como comparação. Na sobreposição dos dados de rugosidade e perda de massa obtém-se um comportamento muito similar ao da amostra polida, acompanhando a progressão do dano ao longo da perda de massa conforme observado no gráfico 29.

Gráfico 29 – Sobreposição das curvas de rugosidade de amplitude Sz e perda de massa acumulada para a amostra esmerilhada

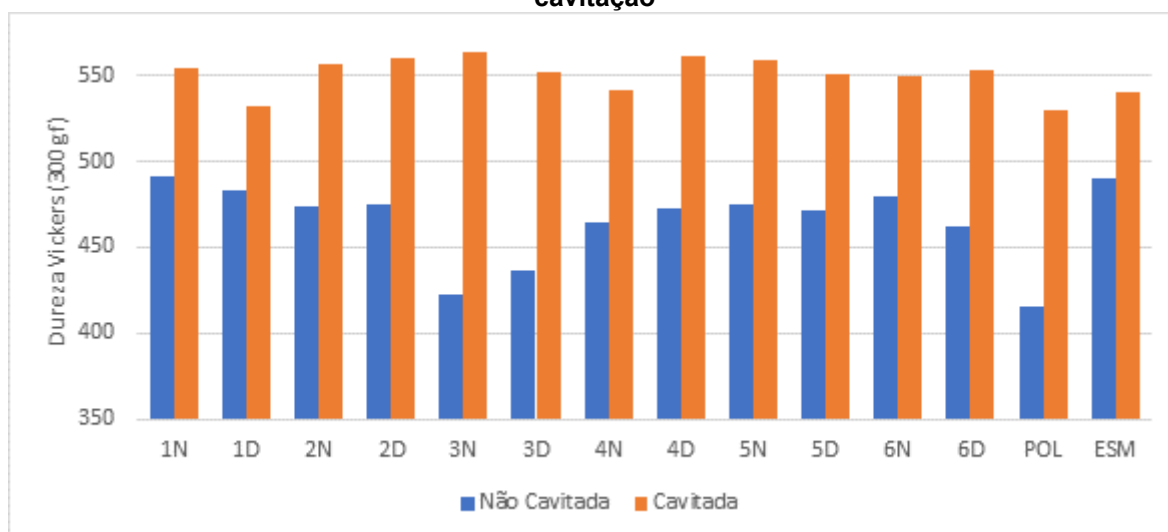


Fonte: Autor

4.5 ANÁLISE DA MICRODUREZA

Com a análise da microdureza Vickers, realizada após a finalização dos ensaios de cavitação acelerada, pode-se observar que houve uma elevação do perfil de dureza na região cavitada em comparação a zona livre de cavitação. Todas as amostras apresentaram este comportamento. A perfil de dureza média Vickers, antes e depois da cavitação é observado no gráfico 30.

Gráfico 30 – Dureza média das amostras ensaiadas na região não cavitada e submetida a cavitação



Fonte: Autor

As diferentes durezas observadas nas amostras pós-usinagem podem ser explicadas em duas vertentes: pelas condições de resfriamento oriundas do processo de deposição por soldagem; pela formação de martensita oriunda do processo de usinagem. A variação da dureza inicial nas amostras é explicada pelos parâmetros utilizados, bem como pelo estado da ferramenta de corte, onde uma condição de maior velocidade de corte promove redução da dureza, enquanto que a ferramenta desgastada forma mais martensita pelo efeito do trabalho de conformação mecânica.

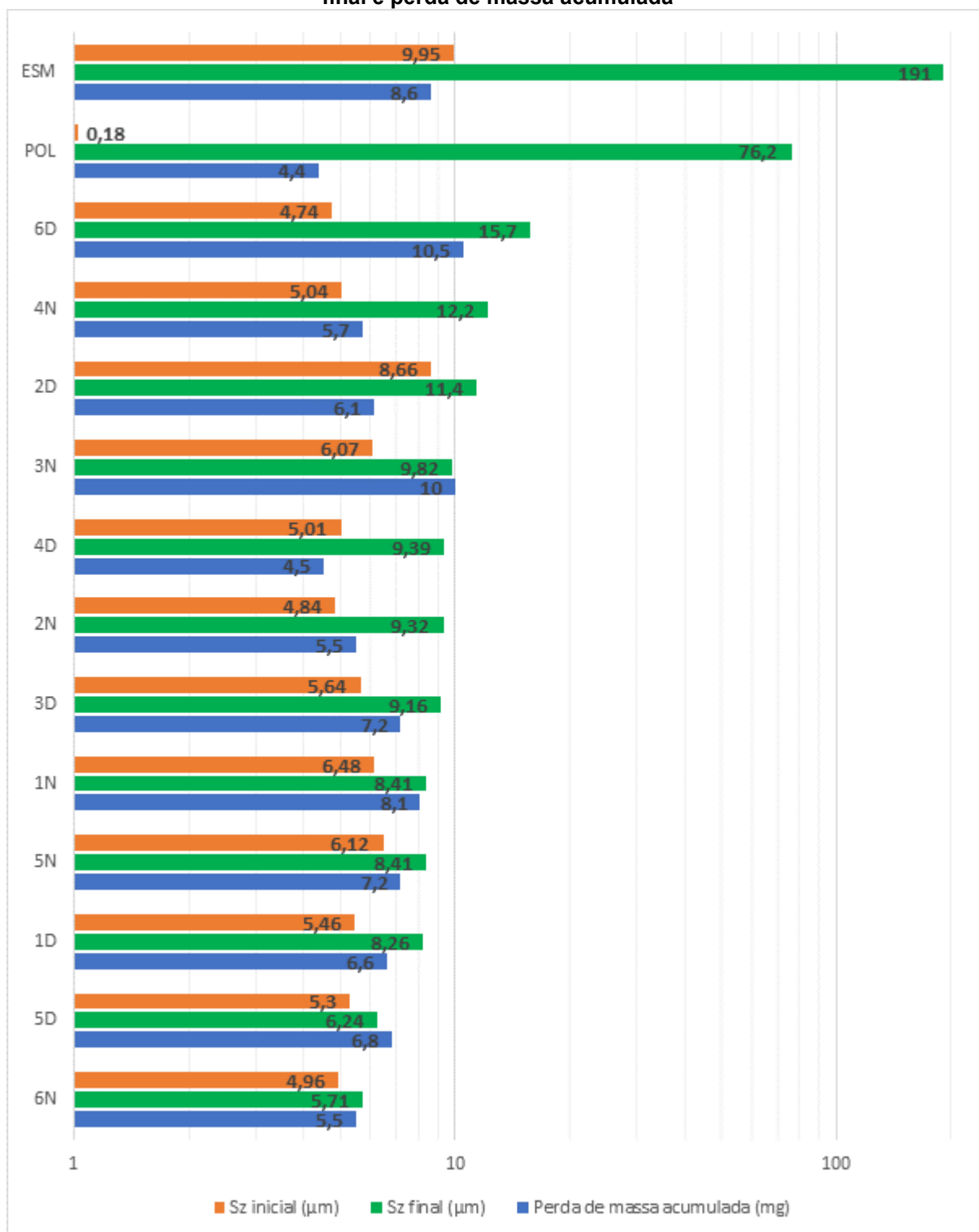
O aumento da dureza após o ensaio de cavitação está relacionado com a mudança de fase do material, promovida pelo endurecimento induzido por deformação. As curvas de desgaste demonstram esse efeito, visto que todas as amostras tiveram mudança nos períodos de evolução da cavitação, atingindo o estágio de aceleração. Logo aponta-se que todas as amostras encruaram pelo trabalho produzido com as implosões/jatos das bolhas de cavitação.

Embora todas as amostras tenham demonstrado endurecimento, não há uma relação quanto a dureza inicial medida e a resistência a cavitação, ao passo em que todas as amostras tiveram patamares muito semelhantes nos valores de dureza.

4.6 COMPARATIVO

As amostras estudadas apresentaram comportamentos distintos, sendo necessário o uso de mais de uma técnica de avaliação para determinação da melhor performance. Um resumo dos valores de perda de massa acumulada, rugosidade (S_z) final e inicial é apresentado em escala logarítmica por meio do gráfico 31.

Gráfico 31 – Gráfico de performance para as amostras ensaiadas em termos de Sz inicial, Sz final e perda de massa acumulada

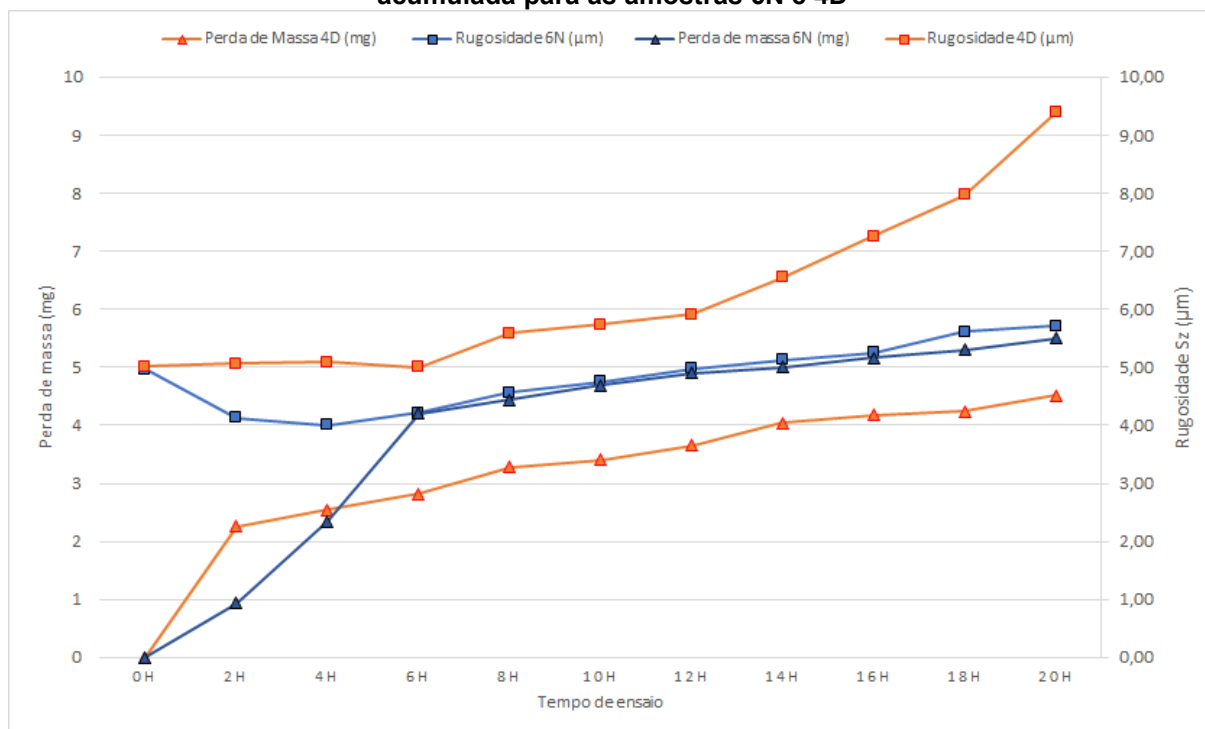


Fonte: Autor

O melhor resultado em termos de rugosidade final foi obtido com uso da ferramenta nova na condição 6N (f_z de 0,08 mm/aresta, a_p de 0,5 mm e v_c de 200 m/min). Em contrapartida, a menor perda de massa para as amostras fresadas foi

conseguida com a ferramenta desgastada na condição 4D (f_z de 0,1 mm/aresta, a_p de 0,5 mm e v_c de 300 m/min). Sobrepondo dados, é possível observar uma evolução mais suave e constante para as curvas de perda de massa e Sz na amostra 6N conforme visto no gráfico 32.

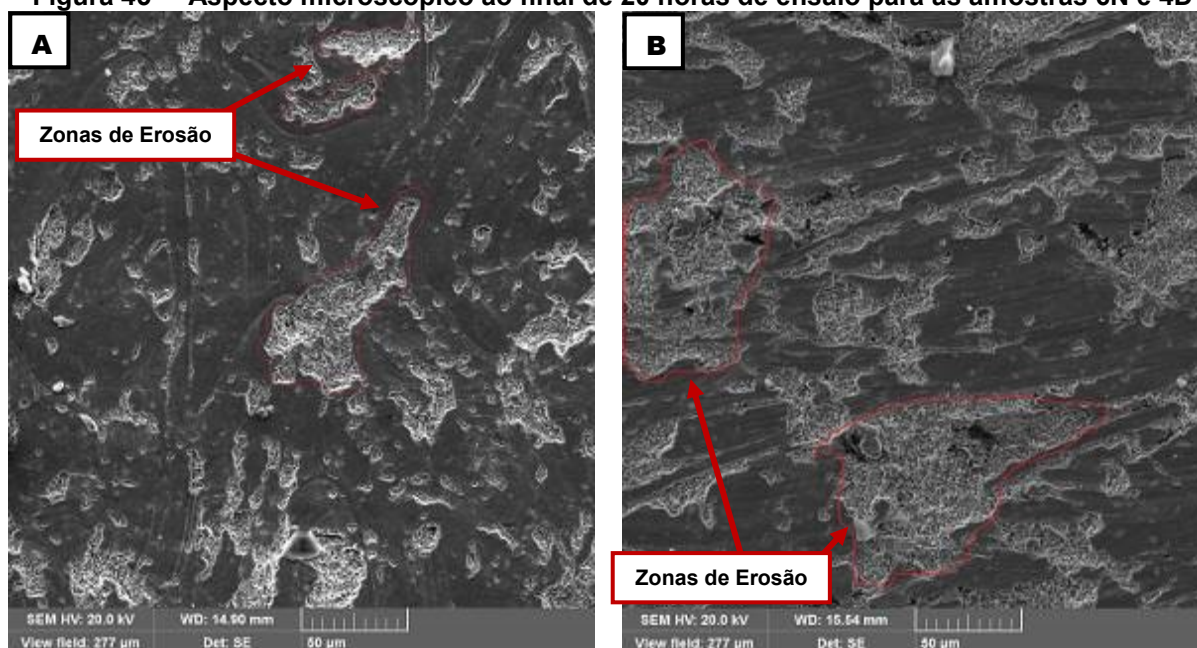
Gráfico 32 – Sobreposição das curvas de rugosidade de amplitude Sz e perda de massa acumulada para as amostras 6N e 4D



Fonte: Autor

A visualização do aspecto final da superfície das amostras 6N e 4D, mostrada na figura 45, leva a observação de uma maior preservação da área usinada na condição (A) 6N comparativamente a superfície (B) 4D. Ainda nota-se na superfície 4D uma maior coalescência das regiões erodidas, com menor incidência de pontos isolados, sugerindo menor resistência da superfície no caso de continuidade dos ensaios.

Figura 45 – Aspecto microscópico ao final de 20 horas de ensaio para as amostras 6N e 4D



Fonte: Autor

O pior resultado geral é da amostra esmerilhada como previsto. O pior resultado entre as superfícies fresadas se deu com a amostra 6D, levando a concluir que os parâmetros de usinagem têm influência menor no resultado do que as condições de integridade da ferramenta. Por se tratar de ferramenta desgastada, certamente os ângulos típicos da geometria de corte estavam comprometidos, promovendo cisalhamento incompleto no corte, o que promove conformação mecânica na superfície usinada, prejudicando a resistência, que indiretamente refletiu na resistência a cavitação.

5 CONCLUSÕES

Com relação as superfícies usinadas, a melhor resposta em termos de rugosidade final observada foi conseguida na superfície fresada por ferramenta de cabeça intercambiável na condição nova, com velocidade de corte em nível inferior e avanço em nível inferior (condição 6N: f_z de 0,08 mm/aresta, a_p de 0,5 mm e v_c de 200 m/min).

A melhor performance em termos de perda de massa acumulada foi conseguida com a superfície gerada pela ferramenta de cabeça intercambiável, nos parâmetros: f_z de 0,1 mm/aresta, a_p de 0,5 mm e v_c de 300 m/min.

Os mecanismos de remoção de material que ocorrem nas superfícies usinadas sujeitas à cavitação são a fratura dúctil, iniciada principalmente nas regiões de rebarba ou trilhas grosseiras de usinagem, e a erosão de pites, que não apresentam região preferencial para o surgimento.

A preferência pelo mecanismo de remoção de material é influenciada pela presença de esmagamento de material na superfície usinada. Quanto menor a porção de material esmagado/aderido, maior a tendência de formação de pites oriundos do colapso das bolhas de cavitação. Quanto maior a porção de material esmagado/aderido, mais intensa a presença de fratura de rebarba.

O período de incubação da cavitação é o mais afetado nas amostras usinadas, sendo complexo afirmar um intervalo de tempo exato em virtude da perda de massa nas primeiras horas de ensaio. Nas amostras usinadas, não se percebe claramente a distinção do período de incubação do período de aceleração dentro do tempo ensaiado apenas com a observação da perda de massa, sendo necessário maior tempo de ensaio ou utilização de curvas de rugosidade para conclusões mais contundentes.

O parâmetro de altura máxima da superfície (S_z) apresentou maior correlação com a análise dos períodos de evolução da cavitação.

A dureza das superfícies não se mostra relacionada com a resistência a cavitação.

O esmerilhamento apresenta-se como a pior alternativa, dentre as estudadas, para acabamento superficial em superfícies que estarão sujeitas ao fenômeno da cavitação estando em concordância com estudos similares. O posto de

pior alternativa se justifica pelo alto nível de rugosidade ao final do ensaio, bem como a morfologia da superfície obtida ao longo das 20 horas ensaiadas.

REFERÊNCIAS

AHMED, S. M., K. HOKKIRIGAWA, R. OBA Y. MATSUDARIA; Developing Stages of Ultrasonically Produced cavitation Erosion and Corresponding surface Roughness. **JSME**, v. 33, n. 1, p11-16, 1990

ASTM - G32. **Standard Test Method for cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus**. Annual Book of ASTM Standard, 97-110. 2006.

BETANCUR, J. D.; RUIZ, A.; VALDES, M. J.; Cavitation in materials used in the manufacture of hydraulic turbines: Review, **International Journal of Civil Engineering an Tecnology**, v. 10, n. 4, p. 2251-2258, 2019

BOCANNERA, L. F.; **Resistência a erosão por cavitação de revestimentos depositados por soldagem e aspensão térmica**. 1999. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

BORDEASU, I.; POPOVICIU, M. O.; MITELEA, I.; et al. Researches upon the cavitation erosion behavior of austenite steels. **Materials Science and Engineering**, v. 106, n. 1, p. 12001-12010, 2016.

BRENNEN, C. E; **Cavitation and Bubble Dynamics**, New York, Oxford University Press, 1995

CELEBIOGLU, K. et al. Numerical research of cavitation on Francis turbine runners. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 28, p. 17771–17781, 2017.

CHEN, J. S., HUANG, Y. K., e CHEN, M. S.; Feedrate optimization and tool profile modification for the high-efficiency ball-end milling process, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 45, n. 9, p. 1070- 1076, 2005.

CHEN, J.S.; HUANG, Y.K.; CHEN, M.S. A study of the surface scallop generating mechanism in the ball-end milling process, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, vol. 45, n. 9, p. 1077-1084, 2005

CHERNIN, L.; VAL, D. V.; DONG, P. Probabilistic evaluation of cavitation inception on rotor blades of tidal stream turbines, **Renewable Energy**, v. 113, n.1, p. 688–696, 2017.

CHIU, K. Y.; CHENG, F. T.; MAN, H. C. Evolution of surface roughness of some metallic materials in cavitation erosion. **Ultrasonics**, v. 43, n. 9, p. 713–716, 2005.

CHURKIN, S. A.; et al. Cavitation on NACA0015 hydrofoils with different wall roughness: high-speed visualization of the surface texture effects. **Journal of Visualization**, v. 19, n. 4, p. 587–590, 2016.

COPEL, **Copel & Sustentabilidade, Revista Sustentabilidade**, Curitiba 16 .ed, Paraná, 2016

COSTA, A. S.; **Uma contribuição ao estudo do fresamento frontal em blocos de motores de ferro fundido cinzento**, 2009, 162 f. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009

CRUZ, J. R. DA; HENKE, S. L.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Effect of Cold Work on Cavitation Resistance of an Austenitic Stainless Steel Coating. **Materials Research**, v. 19, n. 5, p. 1033–1041, 2016.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.; **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Artliber, 2006.

DROZDA, T. J.; WICK, C. (Ed.) **Tool and Manufacturing Engineers Handbook – Machining**. 4. ed. Dearborn, Michigan : Society of Manufacturing Engineers, v. 1,n.1, p. 11166-11176, 1983

ESCALER, X.; EGUSQUIZA, E.; FARHAT, M.; AVELLAN, F.; COUSSIRAT, M. Detection of cavitation in hydraulic turbines. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, n. 4, p. 983–1007, 2006.

FEDUMENTI, N.; **Efeito da cavitação sobre a corrosão em aços inoxidáveis utilizados em turbinas hidráulicas**, 2010, 86 f. Dissertação de mestrado; Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

FRANC, J.-P.; RIONDET, M.; KARIMI, A.; CHAHINE, G. L. Material and velocity effects on cavitation erosion pitting. **Wear**, v. 274, n. 1, p. 248–259, 2012.

GOHIL, P. P.; SAINI, R. P. Numerical Study of Cavitation in Francis Turbine of a. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, v. 9, n. 1, p. 357–365, 2016.

BEN HAMIDA, Sarra et al. Eco-friendly bleaching of indigo dyed garment by advanced oxidation processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 158, n. 4, p. 134–142, 2017.

HATTORI, S., ISHIKURA, R., ZHANG, Q., Construction of database on cavitation erosion and analyses of carbon steel data, **Proceedings of the 5th International Symposium on Cavitation**, Osaka, Japão, 2003

HAO, J.; ZHANG, M.; HUANG, X. The influence of surface roughness on cloud cavitation flow around hydrofoils. **Acta Mechanica Sinica**, v. 34, n. 1, p. 10-21, 2017.

HÜBNER, H. B.; **Estimação da rugosidade gerada no processo de fresamento frontal via redes neurais artificiais**, 2016, 125 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

GÖKKAYA, H.; NALBANT M.; The Effects of Cutting Tool Coating on the Surface Roughness of AISI 1015 Steel Depending on Cutting Parameters, **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, v 30, n. 1, p. 307-3016 2006

GURMEET, K., JATINDER, M.; JAGTAR, S.; TEJINDER, P.; Effects of cutting tool parameters on surface roughness. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology**, v. 1, n. 1, p. 182–189, 2010.

ZHANG, X. et. al. Cavitation erosion behavior of WC coatings on CrNiMo stainless steel by laser alloying, **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 16, n. 2, p.203-207, 2009

KANG, C. et al. Investigation of submerged waterjet cavitation through surface property and flow information in ambient water. **Applied Surface Science**, v. 425, n. 1, p. 915–922, 2016.

KANT G.; SANGWAN, K. S.; Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining, **Journal of Cleaner Production**, v. 83, n. 1, p. 151 -164, 2014

- KISHOR, B.; CHAUDHARI, G. P.; NATH, S. K. Cavitation erosion of thermomechanically processed 13 / 4 martensitic stainless steel. **Wear**, v. 319, n. 1–2, p. 150-159, 2014.
- KOGA G.Y.,WOLF W.,SCHULZ R., SAVOIE S., BOLFARINI C., KIMINAMI C.S., BOTTA W.J.; Corrosion and wear properties of FeCrMnCoSi HVOF coatings, **Wear**, v. 357, n. 1, p. 993-1003, 2019
- KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren, Band 1: Drehen, Fräsen, Bohren**. 6. Auflage. Berlin : Springer - Verlag, 2008
- KUMAR, P.; SAINI, R. P. Study of cavitation in hydro turbines—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 374–383, 2010.
- KUMAR, R. K.; SEETHARAMU, S.; KAMARAJ, M. Quantitative evaluation of 3D surface roughness parameters during cavitation exposure of 16Cr – 4Ni hydro turbine steel. **Wear**, v. 320, n. 1, p. 16–24, 2014.
- LAMANA, M. S.; PUKASIEWICZ, A. G.; SAMPATH, S. Influence of cobalt content and HVOF deposition process on the cavitation erosion resistance of WC-Co coatings. **Wear**, v. 398, n.1, p. 209-219, 2018
- LAUWERS, B.; KLOCKE, F.; KLINK, A.; et al. Hybrid processes in manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 63, n. 2, p. 561–583, 2014.
- LAVIGNE, S.; POUGNOM, F.; SAVOI, S.; MARTINU, L.; SCZHULZ, R.; Cavitation Erosion Behavior of HVOF CaviTec Coatings, **Wear**, v. 386-387, n. 1, p. 90-98, 2017
- LIN, J., WANG, Z., CHENG, J., KANG, M., FU, X., & HONG, S.; Effect of Initial Surface Roughness on Cavitation Erosion Resistance of Arc-Sprayed Fe-Based Amorphous/Nanocrystalline Coatings. **Coatings**, v. 7, n. 1, p. 110-119, 2017
- LUO, X.; JI, B.; TSUJIMOTO, Y. A review of cavitation in hydraulic machinery. **Journal of Hydrodynamics**, v. 28, n. 3, p. 335–358, 2016.
- MESA, D. H.; GARZÓN, C. M.; TSCHIPTSCHIN, A. P., Influence of cold-work on the cavitation erosion resistance and on the damage mechanisms in high-nitrogen austenitic stainless steels. **Wear**, vol. 271, no. 9–10, p. 1372–1377, 2011.

MEZLINI, S.; MZALI, S.; SGHAIER, S.; BRAHAM, C.; KAPSA, P. Effect of a combined machining/burnishing tool on the roughness and mechanical properties. **Lubrication Science**, v. 26, n. 3, p. 175–187, 2014.

NAUDÉ, C. F.; ELLIS, A. T.; On the mechanism of cavitation damage by non-hemispherical cavities collapsing in contact with a solid boundary. **Journal of Basic Engineering**: v. 83, n. 4, 1961.

NEŞELI, S.; YALDIZ, S.; TÜRKEŞ, E. Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology. **Measurement**: v. 44, n. 3, p. 580–587, 2011.

OKADA, T., IWAI, Y. AWAZU, K.; A study of cavitation bubble pressures and erosion part 1: a method for measurement of collapse pressures. **Wear**, vol 133, n. 2, p. 219-243, 1989.

PLESSET, M.S.; ELLIS, A.T.; On the mechanism of cavitation damage, Trans. **ASME**, 77, 1055-1084, 1955.

POHL, M. Cavitation erosion, **Practical Metallographic** v. 33, n. 33, p. 168-187. 1996

PROCOPIAK, L. A. J.; **Resistência a cavitação de três revestimentos soldados**, 1997, 101 f. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

RAYLEIGH, L.; On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity, **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 34, p. 94-98, 1917

RICHMAN, R. H.; McNAUGHTON, P.: Correlation of Cavitation Erosion Behavior with Mechanical Properties of Metals. **Wear**, v. 140, n. 1, p, 63-82, 1990

SANDVIK COROMANT; Technical Guide: Turning, Milling, Drilling, Boring, Tool Holding, **AB Sandvik Coromant**, Sandviken, Sweeden. 2011

SANDVIK COROMANT, Manual Técnico - Tecnologia da Usinagem de Metais - C2900:7-POR/01, **AB Sandvik Coromant**, Sandviken, Sweeden, 2010.

SANTA, J.F., BLANCO, J.A., GIRALDO, J.E., TORO, A. . Cavitation erosion of martensitic and austenitic stainless steel welded coatings. **Wear**, v. 271, n. 9-10 p. 1445-1453, 2011

SIMONEAU, R.; LAMBERT,P; SIMONEAU M.; DICKSON J. I. and L'ESPERANCE G. L. Cavitation erosion and deformation mechanisms of Ni and Co austenitic stainless steels. **IREQ**, v.7, n. 1, p-102-112, 1987

SOUZA, Z.; **Projeto de Maquinas de Fluxo**: Tomo IV Turbinas hidráulicas com rotores axiais. 1. ed, Interciência, 2012.

SREEDHAR, B. K.; ALBERT, S. K.; PANDIT, A. B. Cavitation damage: Theory and measurements – A review. **Wear**, v. 372–373, n.1, p. 177–196, 2017.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 7. ed. Florianópolis, Editora da UFSC, 1995.

TOH, C.K., A Study of the Effects of Cutter Path Strategies and Orientations in Milling, **Materials processing technology**, v. 152, n.1, 346-356, 2004

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K.; **Metal cutting**. 4th ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 446 p, 2000.

TZANAKIS, I. et al. Evaluation of Cavitation Erosion Behavior of Commercial Steel Grades Used in the Design of Fluid Machinery. **Metallurgical and Materials Transactions**, v. 48, n. 5, p. 2193–2206, 2017

XIAOJUN, Z. **Effect of surface modification processes on cavitation erosion resistance**, 2002 112 f. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

WILL, C. R.; **ligas Inoxidáveis Resistentes à Cavitação Depositadas por Plasma – PTA – Arame**, 2008, 111 f. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008

ZHANG, S. J.; TO, S.; WANG, S. J.; ZHU, Z. W. A review of surface roughness generation in ultra-precision machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 91, n.1, p. 76–95, 2015.