



Ivan Fernney Ibañez Aguilar

**Medição e influência da cavitação induzida por ultrassom
na erosão de materiais de engenharia**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Mauricio Nogueira Frota
Co-orientador: Bajram Zeqiri

Rio de Janeiro
Novembro de 2014



Ivan Fernney Ibañez Aguilar

**Medição e influência da cavitação induzida por ultrassom
na erosão de materiais de engenharia**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio (Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação). Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Mauricio Nogueira Frota

Orientador

Programa de Pós-graduação em Metrologia-PósMQI/PUC-Rio

Dr. Rodrigo Pereira Barretto da Costa-Félix

Inmetro

Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Programa de Pós-graduação em Metrologia-PósMQI/PUC-Rio

Dr. Marcelo Piza

Petrobras

José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico-PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de novembro de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Ivan Fernney Ibañez Aguilar

Formado em Engenharia Mecânica pela Universidad del Atlântico, Colômbia em 2012. Estágio de pesquisa para desenvolvimento da parte experimental da dissertação de mestrado no Laboratório de Acústica do National Physical Laboratory (NPL/UK), Teddington, Middlesex, UK 2014.

Ficha Catalográfica

Ibañez Aguilar, Ivan Fernney

Medição e influência da cavitação induzida por ultrassom na erosão de materiais de engenharia / Ivan Fernney Ibañez Aguilar ; orientador: Mauricio Nogueira Frota ; co-orientador: Bajram Zeqiri. – 2014.

87 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, 2014.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Metrologia. 3. Cavitação. 4. Erosão. 5. CaviMeter. 6. Materiais de engenharia. 7. Norma ASTM G32:2010. I. Frota, Mauricio Nogueira. II. Zeqiri, Bajram. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: metrologia para a Qualidade e Inovação. IV. Título.

CDD: 389.1

Para minha mãe Gloria e meu pai *David, este in memorian.*

Agradecimentos

A Deus, por sempre se fazer presente.

À CAPES (Coordenadora de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior) e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem a qual não teria sido possível concluir o mestrado.

Ao meu orientador, o professor Mauricio Nogueira Frota, pelo acompanhamento, orientação, estímulo para participar de uma experiência científica no Reino Unido e pelas muitas horas dedicadas na orientação, compartilhando e sinalizando o melhor caminho a ser perseguido no desenvolvimento desta dissertação.

Ao meu co-orientador, Dr. Bajram Zeqiri, pela oportunidade de me engajar na instigante pesquisa relacionada à erosão de materiais de engenharia e pela competente e dedicada acolhida no Laboratório de Acústica do National Physical Laboratory (NPL).

Ao NPL, pela oportunidade única de participar de um projeto de pesquisa científica e pelo apoio financeiro durante meu estágio de pesquisa em Londres.

À minha mãe Gloria, por seu amor incondicional, seus sacrifícios durante toda uma vida dedicada a seus filhos.

Aos meus irmãos Samir, Wilber, Jazmin, pela motivação constante.

A meus sobrinhos, David, Luis e Esteban, pelo carinho.

A Mark Hodnett pelo decisivo apoio técnico durante todas as fases de concepção da pesquisa experimental e medições realizadas no Laboratório de Acústica do NPL. Sem o seu tirocínio científico, o desenvolvimento teria sido mais árduo.

A Dan Sarno, pelo suporte técnico durante a realização dos experimentos conduzidas no Laboratório de Acústica.

A John Nunn e Roger Pearce, pela amizade e momentos compartilhados durante minha estada na Inglaterra.

Aos professores do Programa de pós-graduação em Metrologia, pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Professor Dr. Carlos Hall (PósMQI/PUC-Rio), Dr. Rodrigo Costa-Félix (Chefe do Laboratório de Ultrassom do INMETRO) e Dr. Marcelo Piza (Engenheiro *Senior* de Equipamentos do CENPES/Petrobras), por terem gentilmente aceitado participar da Banca Examinadora e pelo tempo dedicado à análise do trabalho.

Aos amigos do mestrado, em particular a Khrissy e Javier, pelo companheirismo.

À Pilar, pela amizade e apoio durante minha estada na cidade do Rio de Janeiro e em Londres.

Ao José, pelos anos de amizade e por ter-me introduzido ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia.

Resumo

Aguilar, Ivan Fernney Ibañez; Frota, Mauricio Nogueira (Orientador); Bajram Zeqiri (Co-orientador). **Medição e influência da cavitação induzida por ultrassom na erosão de materiais de engenharia**. Rio de Janeiro, 2014. 87p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação de mestrado tem por **objetivo** avaliar e determinar a influência da cavitação no fenômeno da erosão de materiais de engenharia à luz das recomendações da norma ASTM G32:2010. O trabalho foi **motivado** pelo interesse do Programa de Metrologia em participar, no âmbito da cooperação celebrada com o Instituto de Metrologia do Reino Unido, de um novo desafio no campo da metrologia científica relacionado à medição de cavitação. A **metodologia** utilizada baseou-se em trabalhos experimentais realizados com o medidor de cavitação recentemente desenvolvido pelo Laboratório de Acústica do NPL, que foi pioneiramente utilizado para mapear os níveis de cavitação nos experimentos de erosão de materiais de engenharia para diferentes amplitudes (δ) de pulsação do transdutor e diferentes posicionamentos (λ) da haste do transdutor em relação ao espécime submetido à erosão. Dentre os **resultados** destaca-se a perda de massa mensurada para cada um dos três materiais de engenharia submetidos à erosão por cavitação: 101,4 mg no Alumínio; 66,0 mg na Liga Alumínio-Bronze e 6,80 mg no Aço inoxidável 304. Três são as **conclusões** mais relevantes do trabalho (i) no que concerne a perda de massa (medida da erosão), o parâmetro δ mostrou-se mais crítico que o parâmetro λ ; (ii) os materiais de menor dureza são os mais susceptíveis à erosão por cavitação e (iii) quanto maior a resistência à erosão menor é a uniformidade da cavitação.

Palavras-chave

Metrologia; cavitação; erosão; CaviMeter; materiais de engenharia; norma ASTM G32:2010.

Abstract

Aguilar, Ivan Fernney Ibañez; Frota, Mauricio Nogueira (Advisor); Bajram Zeqiri (Co-Advisor) **Measurement and influence of the cavitation induced by ultrasound on erosion of engineering materials.** Rio de Janeiro, 2014. 87p. MSc. Dissertation – Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The **aim** of this dissertation is to evaluate and assess the influence of the cavitation on the erosion of engineering materials in line with recommendations of the ASTM G32:2010 standard. The work was motivated by the interest of the postgraduate Metrology Programme to participate, within the framework of the cooperation celebrated with the National Metrology Institute of the United Kingdom (National Physical Laboratory, NPL), in a new metrology challenge related to measurement of cavitation. The **methodology** used was based on experimental work carried out with the cavitation meter recently developed by the Laboratory of Acoustics of the NPL, which was first used to map the levels of cavitation inducing erosion in engineering materials for different amplitude of the transducer (δ) and displacement (λ) of the transducer horn relative to the specimen subjected to erosion. Among the **results** is emphasized the mass loss measured for each of the three engineering materials submitted to cavitation erosion: 101.4 mg for the aluminium; 66.00 mg for the Alloy Aluminium-Bronze and 6.80 mg for the stainless steel 304. Three are the main findings of the work (i) with respect to loss of mass (a measure of erosion), the parameter δ was more critical than the parameter λ ; (ii) the lower the hardness of the engineering material eroded, the most susceptible it becomes to cavitation erosion and (iii) the higher the erosion resistance the lower the uniformity of cavitation.

Keywords

Metrology; cavitation; erosion; CaviMeter; engineering materials; standard ASTM G32:2010.

Sumário

1 Introdução	15
1.1. Definição do problema da pesquisa	15
1.2. Objetivos: geral e específicos	15
1.3. Motivação	16
1.4. Metodologia	16
1.5. Estrutura da dissertação	17
2 Fundamentos do fenômeno da cavitação e da erosão	18
2.1. Cavitação	18
2.2. Cavitação induzida por meio acústico	19
2.3. Geração de onda acústica: potência ultrassônica	20
2.4. Erosão induzida pela cavitação	21
2.5. Experimentos de erosão realizados com materiais de engenharia	25
3 Técnicas de medição de cavitação	27
3.1. Técnica associada ao <i>Chlorine Release Test</i>	27
3.2. Técnica associada ao <i>Ceramic Ring Test</i>	28
3.3. Técnica associada ao <i>Aluminum Foil Test</i>	29
3.4. Hidrofone (<i>Hydrophone</i>)	30
3.5. CaviMeter [®]	31
4 Estudo da cavitação na erosão de materiais de engenharia	34
4.1. Cavitação induzida por ultrassom na ausência de erosão	34
4.1.1. Cavitação em função da amplitude de pulsação do transdutor	35
4.1.1.1. Experimentos realizados com o transdutor de 40 kHz	36
4.1.1.2. Experimentos realizados com o transdutor de 20 kHz	37
4.1.2. Cavitação para uma amplitude fixa de pulsação do transdutor	38
4.1.3. Cavitação em função do posicionamento do transdutor	39
4.1.4. Análise estatística do nível da cavitação	41
4.2. Cavitação induzida por ultrassom na presença da erosão	43

4.2.1. Materiais de engenharia selecionados	43
4.2.1.1. Composição química	43
4.2.1.2. Características físicas	44
4.2.2. Procedimento experimental: passo-a-passo do experimento	44
4.2.3. Amplitude de pulsação (δ) e afastamento do transdutor (λ)	46
4.2.4. Análise com enfoque na erosão	48
4.2.4.1. Perda de massa na Condição #1 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$]	48
4.2.4.2. Perda de massa na Condição #2 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]	52
4.2.4.3. Perda de massa na Condição #3 [$\delta = 21,7 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]	56
4.2.4.4. Perda de massa por erosão dos materiais estudados	57
4.2.4.5. Resistência à erosão induzida pela cavitação	60
4.2.4.6. Efeito da erosão na superfície dos materiais (espécimes)	61
4.2.5. Análise com enfoque na cavitação	64
4.2.5.1. Medição da cavitação na presença do Espécime em Aço Inox	64
4.2.5.2. Medição da cavitação na presença do espécime liga Al-bronze	66
4.2.5.3. Medição da cavitação na presença do Espécime em Alumínio	67
4.2.5.4. Teste estatístico (Qui-quadrado) das medições de cavitação	68
4.2.5.5. Incerteza padrão de ajuste do nível de cavitação	71
4.2.5.6. Interação cavitação-material do espécime:considerações finais	75
5 Conclusões e recomendações	78
5.1. Conclusões	78
5.1.1. Técnicas de medição e os fenômenos da cavitação e erosão	78
5.1.2. Aparato experimental e mensuração da cavitação	79
5.1.3. Comportamento da erosão induzida por cavitação	79
5.1.4. Relação entre a erosão de materiais de engenharia e a cavitação	80
5.2. Recomendações para desdobramentos do trabalho	81
Referências bibliográficas	82
Anexo: Método dos mínimos quadrados	86

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de fases de uma substância pura	18
Figura 2. Início da cavitação em um Venturi	19
Figura 3. Diagrama dos processos estável e transiente da cavitação	20
Figura 4. Ilustração do efeito piezoelétrico inverso	21
Figura 5. Passo-a-passo da erosão induzida pela cavitação	22
Figura 6. Fases do processo da erosão	23
Figura 7. Espécime ancorado na haste do transdutor	23
Figura 8. Espécime estacionário afastado da haste do transdutor	24
Figura 9. Possíveis geometrias da haste do transdutor	25
Figura 10. Materiais de engenharia em experimentos de erosão	26
Figura 11. Técnica de liberação de iodo para medição de cavitação	28
Figura 12. Esquema da técnica do anelo cerâmico	29
Figura 13. Escala de referencia na técnica do anelo cerâmico	29
Figura 14. Esquema da técnica da folha de alumínio	30
Figura 15. Folha de alumínio após sua exposição à cavitação	30
Figura 16. Medidores de cavitação	31
Figura 17. CaviMeter e sensor de cavitação	31
Figura 18. Configuração geométrica e características do sensor	32
Figura 19. Esquema geral do funcionamento do CaviMeter	33
Figura 20. Esquema da montagem CaviMeter-Sensor de cavitação	35
Figura 21. Nível de cavitação e campo indutor, transdutor de 40 kHz	36
Figura 22. Nível de cavitação e campo indutor, transdutor de 20 kHz	37
Figura 23. Campo indutor em função do nível de cavitação	37
Figura 24. Nível de cavitação e campo indutor (Amplitude fixa de pulsação)	38
Figura 25. Vista superior do sensor e diferentes posições do transdutor	40
Figura 26. Nível de cavitação versus posicionamento do transdutor	40
Figura 27. Montagem do experimento de erosão induzida por cavitação	44
Figura 28. Sistema de posicionamento do transdutor	45
Figura 29. Mapeamento dos domínios de atuação da instrumentação utilizada	47
Figura 30. Experimento #1: perda de massa e taxa de erosão	49

Figura 31. Experimento #2: perda de massa e taxa de erosão	50
Figura 32. Profundidade média de erosão na Condição #1	51
Figura 33. Experimento #3: perda de massa e taxa de erosão	52
Figura 34. Experimento #4: perda de massa e taxa de erosão	53
Figura 35. Experimento #5: perda de massa e taxa de erosão	54
Figura 36. Profundidade média de erosão, Condição #2	55
Figura 37. Experimento #6: Perda de massa e Taxa de erosão	56
Figura 38. Profundidade média de erosão na Condição #3	57
Figura 39. Perda de massa em todos os experimentos	58
Figura 40. Perda de massa: intercomparação de resultados	59
Figura 41. Profundidade media de erosão: intercomparação de resultados	60
Figura 42. Resistência à erosão por cavitação dos materiais utilizados	60
Figura 43. Distribuição espacial das bolhas em função de λ	64
Figura 44. Nível de cavitação na Cond. #1 [$\delta=43,5 \mu\text{m}$; $\lambda=0,5 \text{ mm}$], Aço	65
Figura 45. Nível de cavitação na Cond. #2 [$\delta=43,5 \mu\text{m}$; $\lambda=1,0 \text{ mm}$], Aço	65
Figura 46. Nível de cavitação na Cond. #1 [$\delta=43,5 \mu\text{m}$; $\lambda=0,5 \text{ mm}$], Al-bronze	66
Figura 47. Nível de cavitação na Cond. #2 [$\delta=43,5 \mu\text{m}$; $\lambda=1,0 \text{ mm}$], Al-bronze	66
Figura 48. Nível de cavitação na Cond. #2 [$\delta=43,5 \mu\text{m}$; $\lambda=1,0 \text{ mm}$], Al	67
Figura 49. Nível de cavitação na Cond. #3 [$\delta=21,73 \mu\text{m}$; $\lambda=1,0 \text{ mm}$], Al	67
Figura 50. Incerteza u_s associada ao nível de cavitação [Aço; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$]	73
Figura 51. Incerteza u_s associada à cavitação [Aço; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]	73
Figure 52. Incerteza u_s associada à cavitação [Al-bronze; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$]	73
Figura 53. Incerteza u_s associada à cavitação [Al-bronze; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]	74
Figura 54. Incerteza u_s associada à cavitação [Alumínio; $\delta = 43,5 \mu\text{m}$]	74
Figura 55. Incerteza u_s associada à cavitação [Alumínio; $\delta = 21,7 \mu\text{m}$]	74
Figura 56. Média do nível de cavitação e espécime	75

Lista de tabelas

Tabela 1. f_i e e_i do nível de cavitação [Transdutor 20 kHz]	42
Tabela 2. f_i e e_i do nível de cavitação [Transdutor 40 kHz]	42
Tabela 3. Estatística dos experimentos com transdutor de 20 e 40 kHz	42
Tabela 4. Composição química dos materiais estudados	43
Tabela 5. Propriedades dos materiais	44
Tabela 6. Periodicidade da medição dos outputs do CaviMeter	46
Tabela 7. Duração dos experimentos para diferentes materiais	48
Tabela 8. Profundidade media da erosão nos experimentos #1 e 2	51
Tabela 9. Profundidade media da erosão nos experimentos #3, 4, 5	55
Tabela 10. Profundidade media da erosão no experimento #6	57
Tabela 11. Comparação entre experimentos de erosão por cavitação	59
Tabela 12. Mudança na superfície do aço após sua exposição à erosão	61
Tabela 13. Mudança na superfície da Liga após sua exposição à erosão	62
Tabela 14. Mudança na superfície do Al após sua exposição à erosão	63
Tabela 15. Teste Qui-quadrado: Alumínio 6082 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]	68
Tabela 16. Teste Qui-quadrado: Alumínio 6082 [$\delta = 21,7 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]	69
Tabela 17. Teste Qui-quadrado: Liga Al-Bronze [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]	69
Tabela 18. Teste Qui-quadrado: Liga Al-Bronze [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$]	70
Tabela 19. Teste Qui-quadrado: Aço Inox 304 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]	70
Tabela 20. Teste Qui-quadrado: Aço Inox 304 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$]	71
Tabela 21. Análise estatística ANOVA	76
Tabela 22. Nível de Cavitação mensurado	86
Tabela 23. Coeficientes da matriz de mínimos quadrados	86
Tabela 24. Coeficientes dos polinômios de ajuste	87
Tabela 25. Nível de cavitação ajustado	87
Tabela 26. Desvio médio quadrático	87

Lista de Siglas

Símbolo	Descrição	Unidade
λ	Afastamento entre a haste do transdutor e a superfície do espécime	mm
δ	Amplitude de pulsação do transdutor	μm
θ	Campo Indutor (Driving field)	V
\emptyset	Diâmetro	mm
Q	Estatística do teste Qui-quadrado	Adimensional
fi	Frequência Real no intervalo I do teste Qui-quadrado	Adimensional
ei	Frequência teórica no intervalo I do teste Qui-quadrado	Adimensional
u_s	Incerteza padrão de ajuste do nível de cavitação	V
η	Nível de Cavitação (Cavitation level)	V
P0	Pressão hidrostática	Pa
P _B	Pressão necessária para provocar o colapso da bolha	Pa
ξ	Profundidade média da erosão	μm
R ₀	Raio inicial das bolhas	m
σ	Tensão superficial do líquido	Kg/s^2

1 Introdução

No contexto da contínua evolução das ferramentas de melhoria de processos, faz-se necessário estudar as características dos materiais de engenharia usados na indústria (e.g., indústrias de papel e celulose, plantas térmicas, processos petroquímicos). Pesquisas sobre a resistência dos materiais à torsão, flexão, tensão, dureza e erosão direcionam o melhor uso de um dado material de engenharia. Esta pesquisa de mestrado concentra-se no estudo da resistência à erosão induzida por cavitação, cuja norma aplicável é a ASTM G32 (geração da cavitação por meio de ultrassom).

Esta pesquisa de mestrado relaciona-se ao estudo da evolução da erosão induzida pela cavitação em materiais de engenharia. A parte experimental do trabalho desenvolveu-se no Laboratório de Acústica do Laboratório Nacional de Metrologia do Reino Unido (National Physical Laboratory, NPL), no âmbito de uma parceria existente com o Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio.

1.1. Definição do problema da pesquisa

No contexto do estudo da erosão gerada pela cavitação, o trabalho buscou responder as seguintes questões: (i) a cavitação mantém-se estável durante o processo de erosão? (ii) qual é a influência do material de engenharia erodido no comportamento da cavitação? Para responder aos questionamentos, experimentos foram realizados fazendo uso do sensor de cavitação (*CaviMeter*) desenvolvido pelo NPL.

1.2. Objetivos: geral e específicos

Esta pesquisa de mestrado, que estuda o fenômeno da erosão induzida pela cavitação, tem dois objetivos centrais: (i) determinar o desgaste de diferentes

materiais de engenharia e (ii) avaliar o comportamento da cavitação durante o processo de erosão. A pesquisa desenvolvida para cumprir esses objetivos desenvolveu-se em conformidade às recomendações da norma ASTM G32:2010, intitulada: *Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus*.

Esses objetivos foram perseguidos com base nas seguintes ações:

- Contribuir para o entendimento dos fenômenos de cavitação e erosão e recensear as técnicas utilizadas para medição de cavitação e suas aplicações para promover a erosão de materiais de engenharia.
- Construir um aparato experimental em conformidade às recomendações da ASTM G32:2010 aplicável à erosão induzida pela cavitação em materiais de engenharia e mensurar a cavitação gerada pela fonte de energia ultrassônica nesses experimentos, fazendo uso do *Cavimeter* desenvolvido pelo NPL;
- Avaliar e caracterizar o fenômeno da erosão por cavitação imposta a diferentes materiais de engenharia;
- Correlacionar a erosão dos materiais de engenharia e a cavitação indutora desse processo para diferentes montagens do transdutor (indutor da cavitação) e diferentes materiais dos espécimes (materiais de engenharia) estudados.

1.3. Motivação

Contribuir para a ampliação do escopo de aplicação de sensores de cavitação, originalmente utilizados essencialmente na avaliação de sistemas de limpeza ultrassônica com aplicações no setor da saúde e na fabricação de dispositivos médicos.

1.4. Metodologia

Quanto aos fins, a pesquisa é descritiva (evolução do fenômeno da erosão em materiais de engenharia) e exploratória (mapeamento da cavitação e estudo da influência de materiais erodidos no comportamento da cavitação). Quanto aos meios, a pesquisa pode ser classificada como (i) bibliográfica, (ii) documental, e (iii) experimental, esta desenvolvida nas instalações da subdivisão de acústica do NPL. Quanto à natureza, a pesquisa é predominantemente qualitativa já que foi baseada em experimentos que permitiram estabelecer padrões do comportamento da cavitação e da erosão.

A pesquisa desenvolveu-se em três fases: exploratória e descritiva; aplicada e conclusiva. A fase exploratória e descritiva refere-se à fundamentação conceitual da cavitação e da erosão em conformidade à norma ASTM G32:2010; caracterização das técnicas de medição da cavitação e identificação dos materiais de engenharia utilizados nos experimentos. A fase aplicada refere-se ao trabalho experimental, que permitiu avaliar a cavitação e erosão, a influência da cavitação na erosão de materiais de engenharia e a resistência à erosão dos materiais utilizados.

Na fase conclusiva, os resultados foram analisados consolidando as conclusões e encaminhando recomendações para desdobramentos futuros do trabalho.

1.5. Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, abrangendo esta introdução, dois capítulos de fundamentação de conceitos, um capítulo que descreve o trabalho experimental desenvolvido e um capítulo de conclusões e recomendações.

O capítulo 2 desenvolve a fundamentação teórica relacionada aos fenômenos da erosão e da cavitação (cavitação induzida por meio acústico, potencia ultrassônica e fases da erosão em um material).

O capítulo 3 caracteriza o instrumento e a técnica de medição utilizada, bem como outras técnicas de medição comumente utilizadas na indústria.

O capítulo 4 apresenta a avaliação da cavitação durante o processo de erosão de materiais de engenharia, estudo desenvolvido segundo duas vertentes: cavitação na ausência e na presença da erosão.

O capítulo 5 discute os resultados, apresenta as conclusões do trabalho e encaminha recomendações para possíveis trabalhos futuros.

2 Fundamentos do fenômeno da cavitação e da erosão

A norma técnica para a realização de ensaio de erosão pelo método padrão por impacto de partículas sólidas (ASTM G76:2013) define erosão pela perda progressiva de material de uma superfície sólida devido à interação mecânica entre aquela superfície e um fluido, um fluido de componentes múltiplos, ou partículas sólidas.

O desenvolvimento da erosão tem relação direta com o fenômeno da cavitação. Cavitação é o nome que se dá ao fenômeno da vaporização de um líquido pela redução de pressão durante o seu escoamento no interior de um equipamento. Este é um fenômeno frequentemente observado no interior de bombas e turbinas hidráulicas. Nesse processo de cavitação, é a redução da pressão que provoca a vaporização do fluido formando bolhas de vapor no interior do fluido em escoamento. A norma ASTM G32:2010 define a cavitação pela formação e subsequente colapso de bolhas que se formam numa mistura das fases líquido-vapor.

2.1. Cavitação

O fundamento da cavitação resulta da mudança de fase líquido-vapor, ilustrada no diagrama de fase da figura 1 para uma substância pura.



Figura 1. Diagrama de fases de uma substância pura

Fonte: Adaptado de Franc, 2006

A cavitação pode ser gerada por um fenômeno hidrodinâmico ou acústico (Lauterborn, 1980). Pela via hidrodinâmica, é fortemente dependente da velocidade do fluido, como pode ser compreendido pelo Princípio de Bernoulli (a pressão diminui com o aumento da velocidade do fluido). A figura 2 ilustra o fenômeno da cavitação em um Venturi.

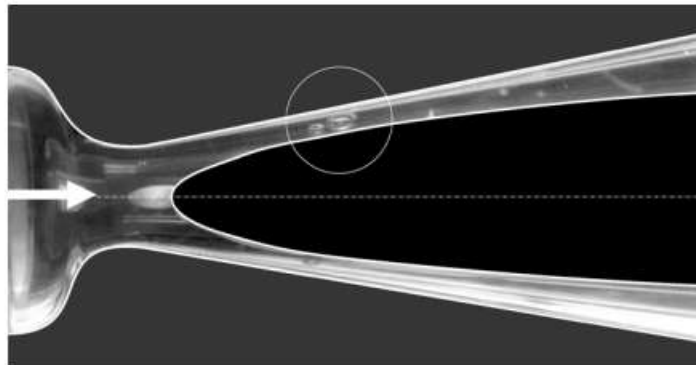


Figura 2. Início da cavitação em um Venturi

Fonte: (Franc, 2006)

Já a cavitação induzida por um meio acústico ocorre quando uma onda acústica se propaga em um fluido submetendo-o a uma redução de pressão (rarefação) em relação à pressão de saturação do vapor (King, 2010).

No contexto desta dissertação de mestrado, experimentos foram realizados para gerar o fenômeno da erosão por cavitação. Esta pesquisa de mestrado concentra-se no estudo da erosão em materiais de engenharia causada pela cavitação induzida por um efeito acústico externo.

2.2. Cavitação induzida por meio acústico

De acordo com Young (1989), existem dois modos de cavitação acústica: estável e transiente.

A cavitação estável é aquela que ocorre na ausência de colapso das bolhas formadas durante o processo de mudança de fase líquido-vapor, podendo, entretanto, ocorrer crescimento ou decréscimo do raio das bolhas (Tiong, 2012)

A cavitação transiente ocorre quando o sistema consegue alcançar a pressão P_B necessária para provocar o colapso das bolhas, definido pela equação 1 (Atchley *et al.*, 1988):

$$P_B = P_0 + 0,77 \frac{\sigma}{R_0} \quad (1)$$

Nesta equação:

P_0 = Pressão hidrostática (medida em Pa)

σ = Tensão superficial do líquido (medida em Kg/s^2)

R_0 = Raio inicial das bolhas (medida em m)

A figura 3 ilustra os processos da cavitação estável e transiente da cavitação.

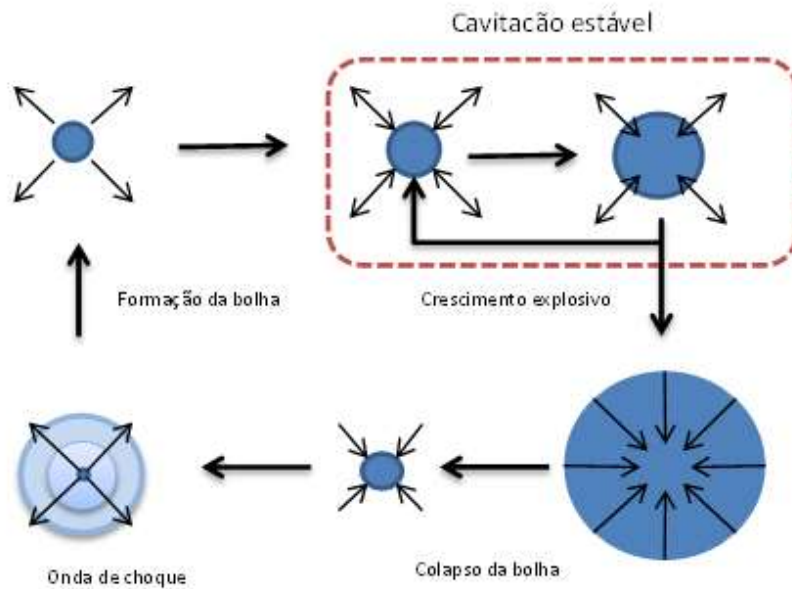


Figura 3. Diagrama dos processos estável e transiente da cavitação

Fonte: Adaptado de King (2010)

2.3.

Geração de onda acústica: potência ultrassônica

O ultrassom são vibrações mecânicas que podem ocorrer em um sólido ou líquido, cuja frequência de vibração é maior do que a faixa audível para os seres humanos (>20 kHz). O ultrassom é uma onda longitudinal que requer um meio para se propagar. Quando propagado em um meio, as partículas vibram paralelamente à direção da onda sonora dando origem à formação de uma onda de pressão acústica que imprime velocidade às partículas do meio.

Dois são os tipos de ultrassom: de alta e de baixa intensidade de potência por área empregados para diferentes aplicações de ultrassom. O uso do ultrassom de alta intensidade induz a expansão e contração de moléculas nos meios, induzindo o fenômeno da cavitação pelo colapso das bolhas e possuindo aplicações (Young, 1989) em diversos processos (e.g.: limpeza ultrassônica,

erosão, emulsificação, degradação molecular, sonoluminescência, efeitos biológicos e químicos).

A técnica de ultrassom para diagnóstico é não destrutiva. Fazendo uso da reflexão de uma onda de som permite medir comprimentos que revelam informação para diagnóstico (sonografia) com enorme aplicação em medicina.

A produção de ultrassom é possível pela conversão da energia elétrica em ondas sonoras; a energia elétrica em corrente alternada de alta frequência é convertida em vibrações mecânicas produzindo o ultrassom. O processo de conversão da energia é comumente feito pela utilização de transdutores magnetostrictivos ou piezoelétricos.

Os transdutores piezoelétricos funcionam com base no efeito piezoelétrico inverso a fim de gerar ultrassom. O efeito piezoelétrico inverso é entendido como a indução de potencial elétrico através de um cristal para induzir um esforço dinâmico (e.g.: vibrações). O esquema do efeito piezoelétrico inverso está ilustrado na figura 4.

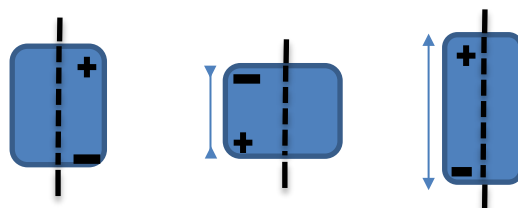


Figura 4. Ilustração do efeito piezoelétrico inverso

Fonte: Adaptado de King (2010)

Os transdutores magnetostrictivos são baseados na magnetostricção, que consiste em submeter uma barra de material ferromagnético a um campo magnético, assim induzindo mudanças de comprimento na barra (similarmente ao que ocorre em transdutores piezoelétricos).

2.4. Erosão induzida pela cavitação

A norma ASTM G32:2010 define erosão induzida pela cavitação como a perda progressiva de material de uma superfície sólida, devido a sua exposição contínua à cavitação.

A erosão sobre uma superfície sólida resulta da ação de um líquido cavitante que impõe o colapso assimétrico de bolhas na vizinhança de uma superfície sólida

(Tat, 1998). Os colapsos assimétricos ocorrem na forma de micro jatos dirigidos sobre a superfície sólida. A intensidade cíclica desses impactos resulta na transferência de energia proveniente das bolhas para o material sólido ou dissipada como ondas de choque para o próprio líquido (Tat, 1998).

A transferência de energia segue a seguinte sequência de eventos: deformação elástica da superfície, deformação plástica da superfície do material e, posteriormente, a eventual perda de material da superfície. Este último caracteriza o fenômeno da erosão.

A resistência à erosão por cavitação de um determinado material depende da sua propriedade de deformação elástica. A figura 5 ilustra o processo de interação entre as bolhas e a superfície do material.

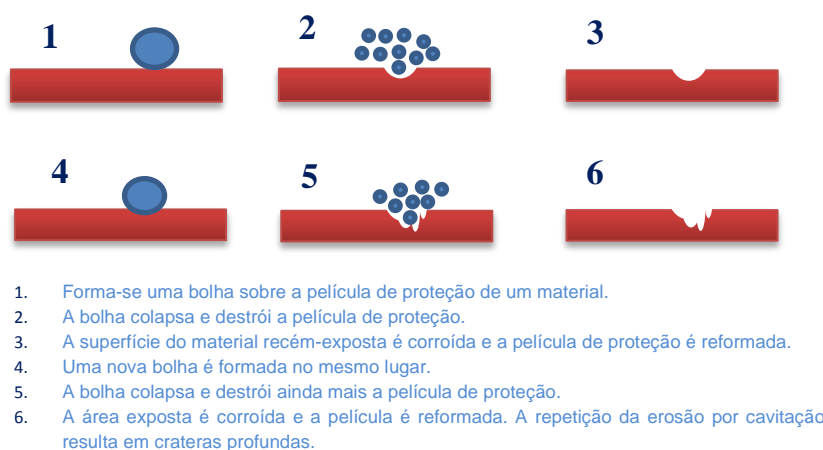


Figura 5. Passo-a-passo da erosão induzida pela cavitação

Fonte: Adaptado de Tat (1998)

A erosão que ocorre em um determinado material desenvolve-se segundo as seguintes fases:

- **Incubação da erosão:** fase inicial da taxa de erosão, durante a qual a taxa de erosão é zero ou negligenciável em comparação com as fases posteriores (ASTM G32:2010).
- **Aceleração da erosão:** fase em que a taxa de erosão aumenta até atingir um máximo (Choi, Jayaprakash e Chahine, 2012).
- **Desaceleração da erosão:** fase em que a taxa de erosão é reduzida em consequência de alteração da rugosidade da superfície erodida. Esta mudança na rugosidade (resultante de pequenas deformações plásticas formadas a partir do material erodido) afeta a dinâmica da erosão amortecendo o colapso das bolhas (Choi, Jayaprakash e Chahine, 2012).

A figura 6 ilustra, para um determinado material de engenharia, as fases da erosão em termos da perda de massa e da taxa de erosão.

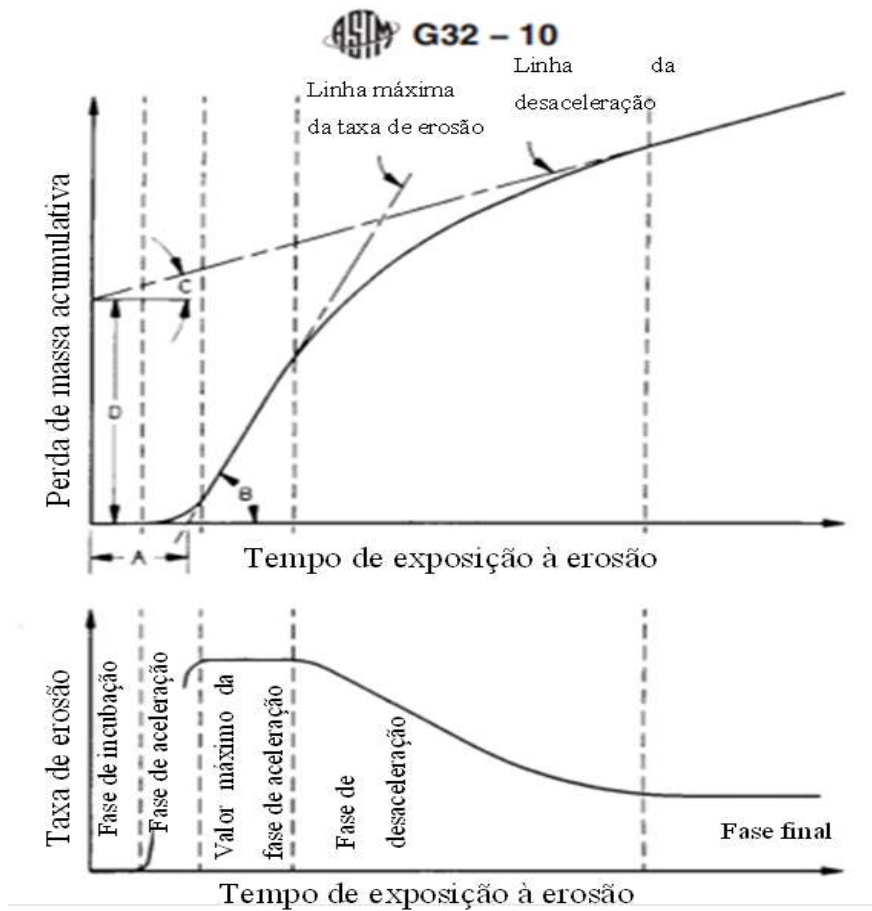


Figura 6. Fases do processo da erosão

Fonte: Adaptado da norma ASTM G32:2010

A norma ASTM G32:2010 descreve a metodologia de ensaio de erosão por cavitação pelo uso de ultrassom como gerador da cavitação, que pode ser realizado de duas formas:

- i) O material que se deseja submeter ao processo de erosão é ancorado na haste de um transdutor imerso em um reservatório com líquido permitindo assim que a vibração do transdutor seja transmitida ao espécime. O esquema da montagem dessa modalidade de ensaio é ilustrado na figura 7.

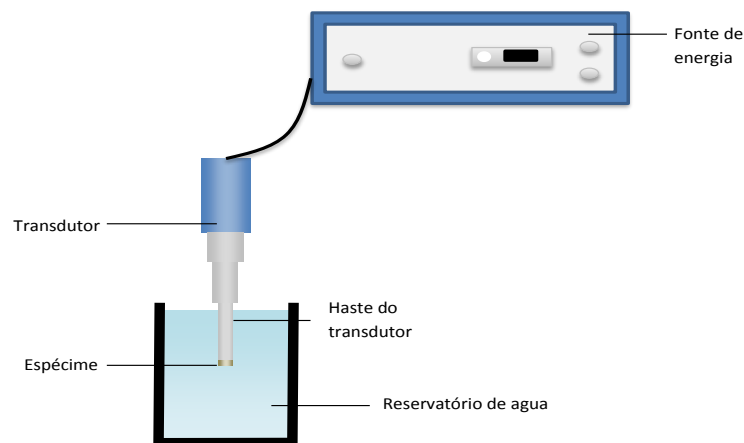


Figura 7. Espécime ancorado na haste do transdutor

- ii) O espécime a ensaiar é posicionado numa plataforma a uma distância de 0,5 ou 1,0 mm da haste do transdutor (figura 8). Neste caso o espécime (não ancorado) permanece estacionário e a cavitação gerada pela vibração da haste do transdutor provoca a erosão.

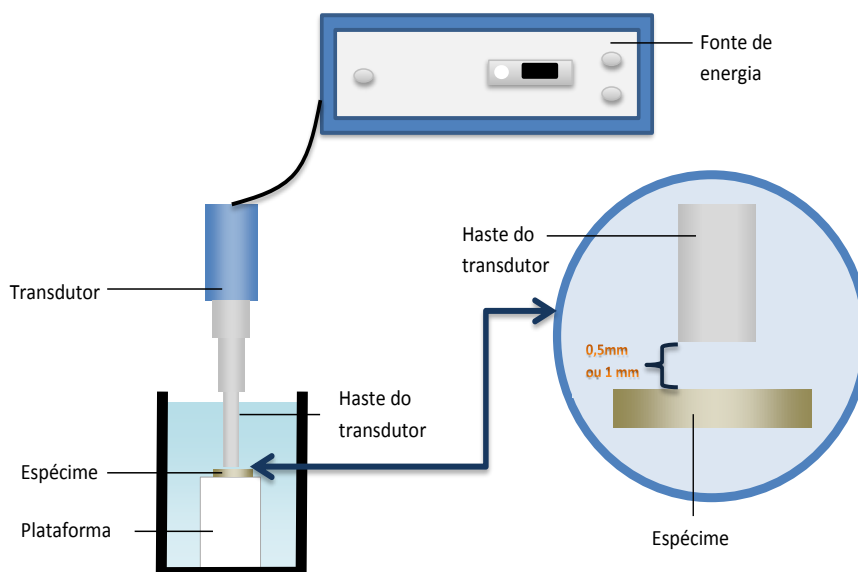


Figura 8. Espécime estacionário afastado da haste do transdutor

Experimentos específicos podem ser realizados em laboratório para avaliar a resistência à erosão induzida pela cavitação em materiais de engenharia, a exemplo do que comumente ocorre em diversos equipamentos (e.g. bombas, turbinas hidráulicas, dinamômetros hidráulicos, válvulas, rolamentos, camisas de cilindro de motores diesel, hélices de navios). Os resultados dos experimentos subsidiam, também, o entendimento sobre a natureza e a evolução da erosão.

A variação de algumas das condições do experimento foi desenvolvida nesta dissertação a fim de estudar o efeito na erosão. O experimento foi realizado utilizando-se um transdutor de 20 kHz, frequência que correspondente à faixa de ultrassom de alta potência.

Para entendimento do experimento, a seguinte nomenclatura se aplica:

- **Amplitude de pulsação do transdutor:** Vibração gerada no transdutor pela potência da fonte de energia.
- **Haste do transdutor:** barra de metal afunilado usado para aumentar a amplitude de pulsação fornecida por um transdutor ultrassônico. A figura 9 ilustra as diferentes configurações possíveis da haste do transdutor.

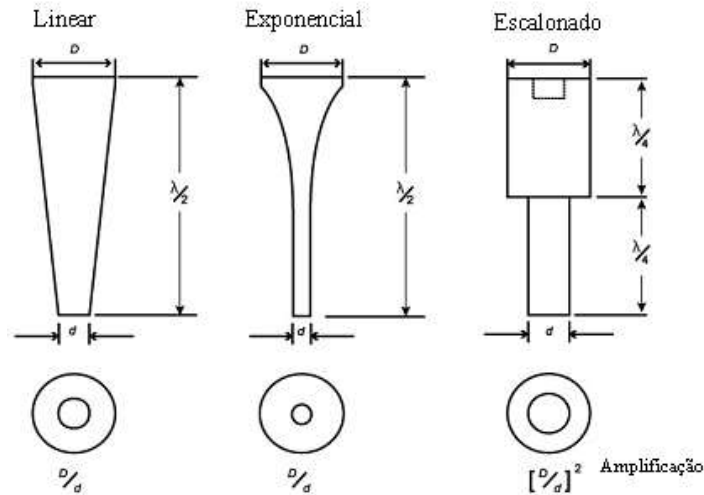


Figura 9. Possíveis geometrias da haste do transdutor

Fonte: (Perkins)

- **Fator de amplificação:** É a relação dos diâmetros da configuração da haste do transdutor (Figura 9).
- **Afastamento:** Distância entre a haste do transdutor e a superfície do espécime a ser estudado.

Os resultados dos experimentos são expressos em função da perda de massa e das seguintes variáveis:

- **Taxa de erosão:** Erosão acumulada em um tempo previamente especificado, dividido pelo tempo de duração do experimento (ASTM G32:2010).
- **Profundidade média da erosão (ξ):** média de espessura do material erodido numa área de superfície especificada (ASTM G32:2010), e é calculada a partir da seguinte equação:

$$\xi (\mu m) = \left(\frac{\text{perda de massa}}{\rho_{\text{espécime}} \times \text{área erodida}} \right) \quad (2)$$

Nesta equação:

$$\rho_{\text{espécime}} = \text{densidade do espécime}$$

- **Taxa da profundidade média da erosão:** profundidade média da erosão em função do tempo.
- **Resistência à erosão por cavitação:** Recíproco da taxa de profundidade média da erosão (Tat, 1998).

2.5.

Experimentos de erosão realizados com materiais de engenharia

Materiais de engenharia são aqueles comumente utilizados na indústria. O fenômeno da erosão por cavitação ocorre em materiais que são empregados em diversos processos de produção, (e.g. tubulações, armazenamento de líquidos em

tanques agitadores, indústria de papel e celulose), dependendo do tipo de uso industrial o material de engenharia utilizado pode ser composto por aços, ligas, polímeros ou cerâmicos.

Processos de melhoria contínua (e.g. fundição, laminação, soldagem, implantação iônica, crescimento de cristais, deposição de filmes finos, sinterização, sopro de vidro) são desenvolvidos a fim de aumentar a resistência à erosão por cavitação dos materiais.

Pesquisa bibliográfica em 26 artigos especializados¹ sobre o tema (erosão por cavitação) mostrou que cerca de 50% dos estudos fez uso de uma liga ou aço inoxidável. A figura 10 resume os resultados da pesquisa.

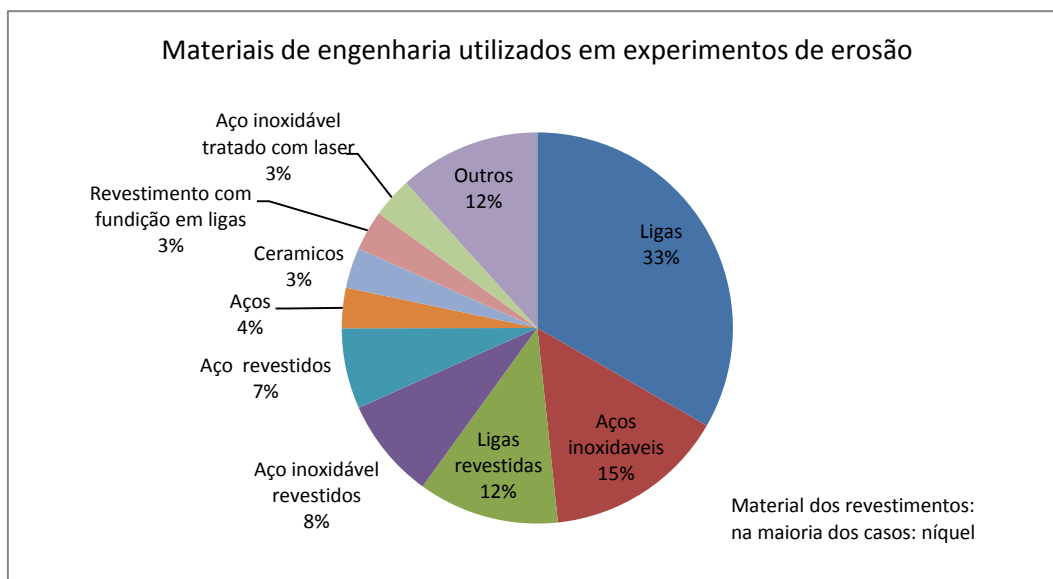


Figura 10. Materiais de engenharia em experimentos de erosão

¹ Pesquisa baseada nos seguintes arquivos: (Wu, Lin e Yeh, 2000); (Hattori, Ishikura e Zhang, 2004);

3 Técnicas de medição de cavitação

Técnicas de medição de cavitação têm sido desenvolvidas em resposta à necessidade de avaliar a eficiência de sistemas ultrassônicos de limpeza². Atribuiu-se à Companhia de Esterilização Americana (*American Sterilizer Company*), na década de 1960, o trabalho pioneiro de concepção e desenvolvimento de sistemas de medição de cavitação.

Contudo, o estudo da bibliografia especializada mostra que a medição de cavitação constitui tema recente e pouco referenciado.

Este capítulo descreve de forma sucinta as técnicas de medição documentadas na literatura, enfatizando o CaviMeter desenvolvido pelo NPL, onde a parte experimental desta pesquisa de mestrado foi desenvolvida no contexto de um protocolo de cooperação existente com o Programa de Pós-graduação em Metrologia da PUC-Rio. Esta técnica encontra-se descrita na seção 3.5 deste capítulo.

3.1. Técnica associada ao *Chlorine Release Test*

De forma original, a cavitação de líquidos em tanques ultrassônicos foi medida pela técnica de liberação de cloro desenvolvida por (Shih-Ping, 1964). O método faz uso de uma solução de iodeto de potássio e tetracloreto de carbono em água deionizada (solvente), em cuja solução o iodeto de potássio reage com o gás de cloro e liberta iodo. A figura 11 ilustra o esquemático do sistema concebido, que utiliza uma amostra da solução de iodo como um indicador de referência. A amostra (solução de KI) contida num recipiente de polietileno é posicionada no tanque ultrassônico, permitindo ao transdutor ultrassônico produzir a cavitação no tanque. Em tempos subsequentes a solução de iodo é monitorada (medição da

² Geração de cavitação a partir de uma onda de som de alta frequência permitindo utilizar o impacto das bolhas geradas pela cavitação para remover as partículas contaminadas de materiais circundantes.

concentração de iodo), sendo que a variação de concentração (medida por espectrofotometria) está diretamente relacionada à intensidade da cavitação.

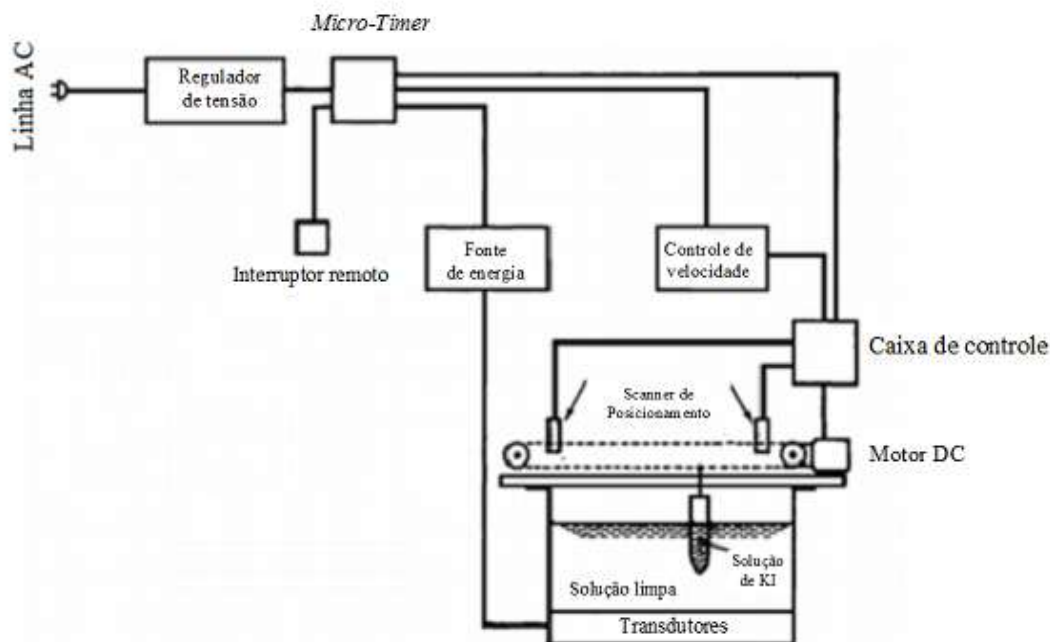


Figura 11. Técnica de liberação de iodo para medição de cavitação

Fonte: (Liu, 1965)

3.2. Técnica associada ao *Ceramic Ring Test*

A medição da cavitação baseada na metodologia do ensaio do anel cerâmico (*Ceramic Ring Test*) foi desenvolvida pela Companhia de Esterilização Americana (*American Sterilizer Company*) na década de 60. O método consiste no uso de anéis cerâmicos contaminados com grafite na remoção de contaminação dos anéis por meio da implosão das bolhas que resultam do processo de cavitação. A medição qualitativa da cavitação é realizada pela comparação do grau de limpeza obtido pelo uso da técnica em anéis cerâmicos com um estado de limpeza padrão pré-determinado e documentado em fotografias que definem uma escala de limpeza. A intensidade da cavitação é então definida em conformidade à escala de limpeza pré-estabelecida.

A figura 12 ilustra o aparato experimental mostrando o reservatório e os anéis cerâmicos submetidos ao processo de limpeza.

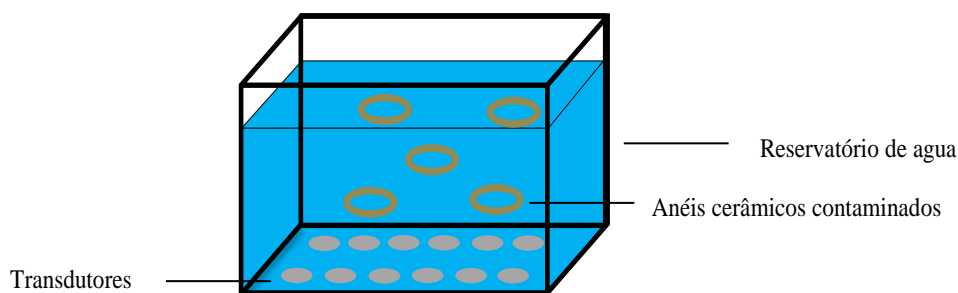


Figura 12. Esquema da técnica do anelo cerâmico

A figura 13 ilustra a escala padrão de limpeza dos anéis cerâmicos propriamente dita.

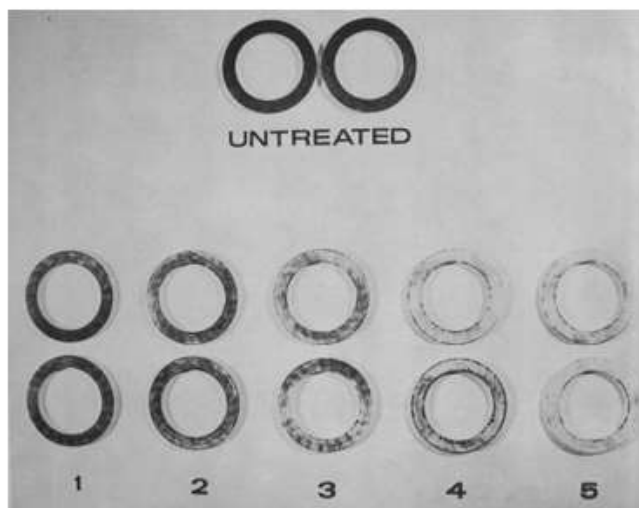


Figura 13. Escala de referencia na técnica do anelo cerâmico

Fonte: (Liu, 1965)

3.3. Técnica associada ao *Aluminum Foil Test*

A técnica de medição de cavitação associada ao ensaio da folha de alumínio (*Aluminum Foil Test*) foi também desenvolvida no início da década de 1960. A figura 14 ilustra o posicionamento vertical da folha de alumínio no reservatório de água no *locus* da cavitação induzida por um transdutor. Para assegurar estabilidade da folha de alumínio no interior do reservatório de água, esta deve ser assegurada. Após um tempo pré-determinado de exposição da folha de alumínio à cavitação induzida, a mesma é retirada do reservatório e submetida à análise para identificar o efeito da cavitação (arranhões, mossas, furos) em sua superfície causado pela implosão das bolhas.

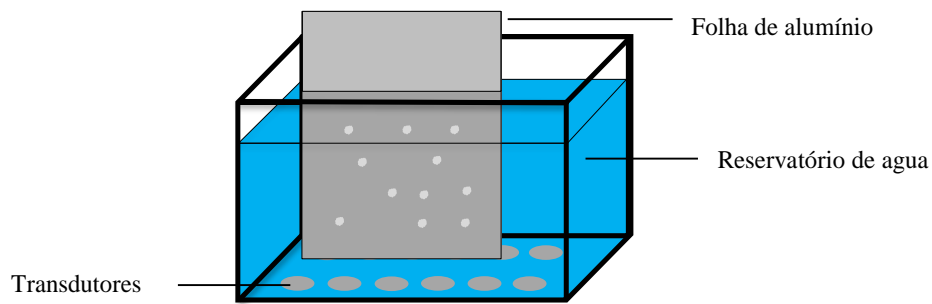


Figura 14. Esquema da técnica da folha de alumínio

A Figura 15 ilustra uma imagem típica de folha de alumínio afetada pela cavitação, que altera a integridade da sua superfície. Consegue-se, assim, uma medida relativa da intensidade da cavitação.

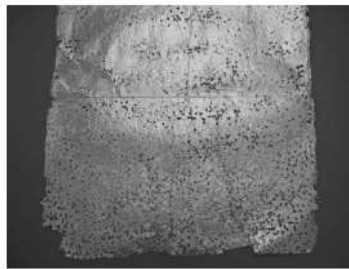


Figura 15. Folha de alumínio após sua exposição à cavitação

3.4. Hidrofone (*Hydrophone*)

A medição de cavitação também é obtida pelo uso de hidrofones. Hidrofones são sensores acústicos que podem ser utilizados para captar o sinal acústico gerado pela implosão das bolhas presentes na cavitação, a intensidade do sinal acústico permite mensurar quantitativamente a cavitação. Uma das limitações desta técnica reside na dificuldade de se identificar quais partes do sinal acústico resultam da implosão das bolhas e quais da frequência ultrassônica do transdutor utilizado. A Figura 16 ilustra três modelos de medidores de cavitação utilizados na indústria (Fig. 16a: Cav-Meter desenvolvido pelo *MRC Laboratory*; Fig. 16b: pb-502, desenvolvido pelo *PPB Megasonics* e Fig. 16c: L-2000, desenvolvido pelo *TM Associates*).



Figura 16. Medidores de cavitação

3.5. CaviMeter[®]

O CaviMeter (patenteado sob o número de registro 2358705B) é o nome atribuído pelo National Physical Laboratory (NPL) para o instrumento desenvolvido³ pelo seu Laboratório de Acústica e utilizado para medição de cavitação nesta pesquisa de mestrado. Este instrumento identifica o sinal acústico gerado pela implosão das bolhas que resultam da cavitação (Hodnett, 2011).

Diferentes são as aplicações possíveis para o CaviMeter. Permite, por exemplo, uma avaliação quantitativa da cavitação produzida nos sistemas de limpeza ultrassônicos (usados em instrumentos médicos) que operam em frequências superiores a 40 kHz e também para sistemas sonoquímicos que operam na faixa intermediária entre 20 e 40 kHz.

A figura 17 ilustra os componentes básicos (sensor conectado por cabo e monitor portátil) que integram o CaviMeter.



Figura 17. CaviMeter e sensor de cavitação

A emissão acústica das bolhas é detectada pelo sensor (polímero piezoelétrico pvdf, Polifluoruro de vinilideno de 110 μm de espessura, recoberto com uma borracha especial (poliuretano) para isolá-lo do meio fluido). Pelo monitoramento dos sinais acústicos gerados pela implosão das bolhas, o

³ Em 2014, NPL e Onda Corporation (fornecedora líder global de instrumentos de medição de ultrassom nos EUA) formalizaram entendimentos para distribuir em todo o mundo o CaviMeter.

CaviMeter pode identificar o nível de cavitação gerado em uma determinada região do fluido (Hodnett, 2006).

O CaviMeter permite:

- Medição do sinal acústico na frequência fundamental (frequência de operação do transdutor, que no caso de sistemas ultrassônicos de limpeza pode ser da ordem de 40 kHz). O CaviMeter identifica esta variável de saída com o nome de campo indutor (*driving field*) e utiliza filtros eletrônicos na faixa de 20-60 kHz, assim delimitando o sinal acústico.
- Medição do sinal acústico produzido (*cavitation level*) pelo colapso das bolhas, que acontece na faixa de frequência entre 1,5 e 8 MHz, faixa de frequência de operação dos filtros eletrônicos do CaviMeter.

A figura 18 ilustra a configuração geométrica e as características técnicas construtivas do sensor de cavitação.

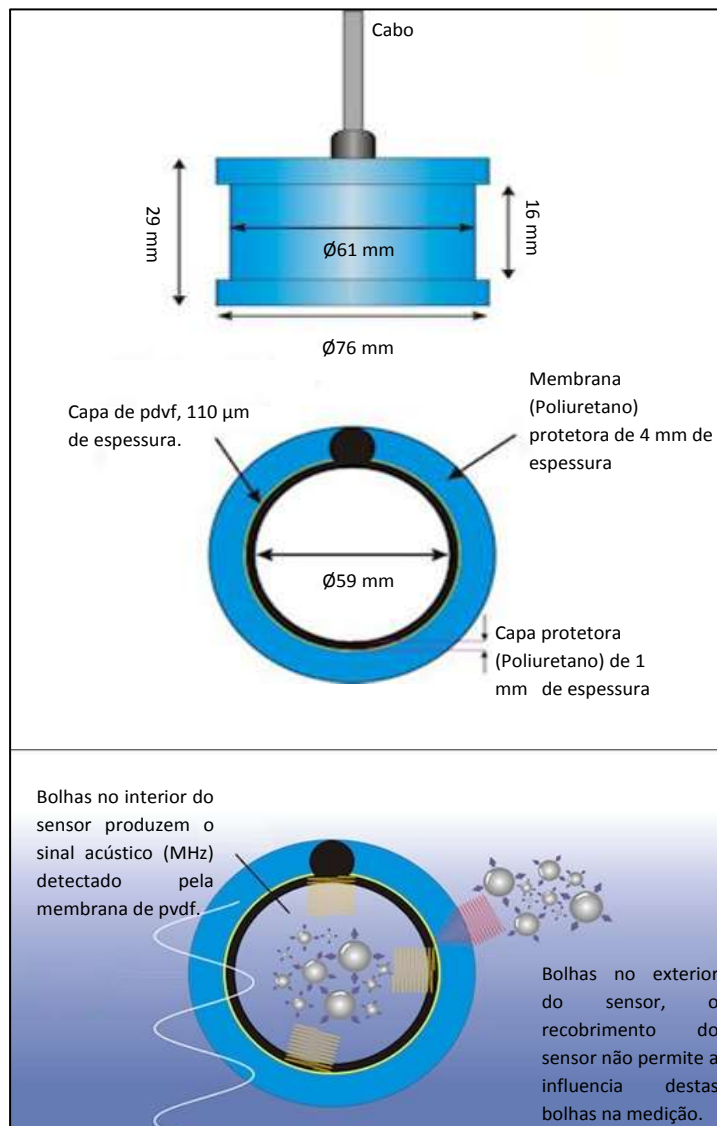


Figura 18. Configuração geométrica e características do sensor

Fonte: Adaptado de Hodnett (2011)

A figura 19 ilustra as características de funcionamento do CaviMeter, explicitando os filtros passe-banda para cada uma das duas saídas (nível de cavitação e campo indutor) do instrumento utilizado.

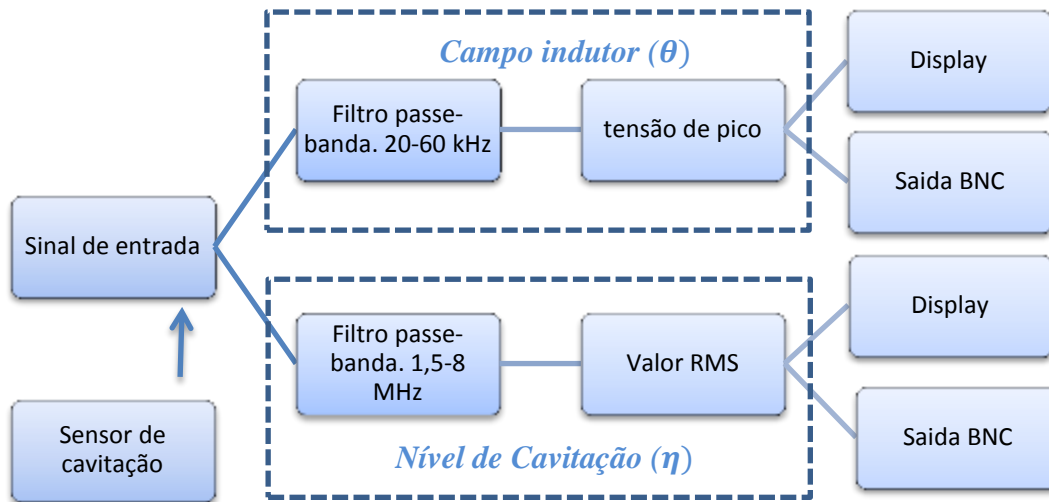


Figura 19. Esquema geral do funcionamento do CaviMeter

Conforme mostrado na figura 19, o campo indutor é exibido em termos do valor de tensão de pico na faixa de 20-60 kHz; enquanto o nível de cavitação em função do valor RMS detectado na faixa de 1,5 a 8 MHz.

No âmbito da cooperação estabelecida entre o Programa de Pós-graduação em Metrologia e o NPL/UK, o CaviMeter aqui descrito foi utilizado para realizar as medições de cavitação que fundamentaram o desenvolvimento desta pesquisa de mestrado cujos resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 4.

4

Estudo da cavitação na erosão de materiais de engenharia

A erosão em materiais de engenharia é um fenômeno frequente, que tem merecido atenção de pesquisadores mais intensamente nas últimas décadas (Wu, et al, 2000; Espitia, et al, 2013; Da Silva, et al, 2013; Bregliozzi, et al, 2005). Dentre os estudos realizados, a caracterização da resistência à erosão de materiais —suscetíveis à perda de massa e alterações na microestrutura— foi um dos motivadores desta pesquisa de mestrado. Esta dissertação estuda a erosão por cavitação tendo como referência a norma ASTM G32:2010 e realiza medições para diferentes níveis de cavitação em distintos materiais de engenharia. Com base em pesquisa experimental⁴, o trabalho objetiva identificar a interação mútua que ocorre entre os processos de erosão e cavitação. Para desacoplar qualquer interação, num primeiro momento da pesquisa é estudado o fenômeno da cavitação na ausência de erosão. Num momento subsequente, é estudada a erosão induzida pelo fenômeno da cavitação analisando-se, notadamente, os seguintes aspectos: perda de massa; taxa de erosão; profundidade média da erosão; taxa da profundidade média da erosão, atendo-se à monitoração e avaliação desses processos.

4.1.

Cavitação induzida por ultrassom na ausência de erosão

Com o propósito de assegurar uma avaliação ampla do fenômeno da cavitação, três estudos de casos (caracterizando diferentes grupos de experimentos) foram desenvolvidos: (i) cavitação em função de diferentes amplitudes de pulsação do transdutor; (ii) cavitação para uma amplitude de pulsação fixa do transdutor (iii) cavitação para diferentes posicionamentos do transdutor. Em todos esses casos, observou-se que a temperatura da água no reservatório manteve-se, naturalmente, entre 20 °C e 23 °C.

⁴ No âmbito de um acordo de cooperação celebrado entre o Programa de Pós-Graduação em Metrologia e o National Physical Laboratory (NPL), os experimentos foram realizados pelo autor no laboratório de Acústica daquela instituição.

4.1.1. Cavitação em função da amplitude de pulsação do transdutor

O experimento foi desenvolvido segundo duas vertentes: (i) medição dos níveis de cavitação (função da frequência de resposta do transdutor) (ii) medição do campo acústico induzido pelo transdutor. As medições foram realizadas fazendo uso de um *cavimeter* (CaviMeter) desenvolvido pelo Laboratório de Acústica do NPL. Para avaliar a influência da resposta do transdutor, experimentos foram realizados nas frequências de 40 kHz e de 20 kHz, obtidas pelo uso de dois transdutores de frequência fixa. Relaciona-se, a seguir, a instrumentação utilizada:

- Transdutor de 40 kHz: Sonic Systems. Modelo: 021940
- Transdutor de 20 kHz: Sonic Systems 23820A, Serial 034
- Fonte/energia (Transdutor, 40 kHz): Sonic Systems. Modelo: SSL-40
- Fonte/energia (Transdutor, 20 kHz): Sonic Systems. P100/3-20, Serial L038
- Termômetro: Omega HH506R
- Reservatório de água deionizada: 25x40x20 cm
- Sensor de cavitação HIFU (High Intensity Focused Ultrasound)
- CaviMeter (instrumento construído para uso interno no NPL, em processo de comercialização).

A figura 20 ilustra o esquema do experimento, destacando o CaviMeter e a haste do transdutor mergulhada em água⁵ na cavidade do sensor. A água funciona, portanto, como o meio para viabilizar o fenômeno da cavitação.

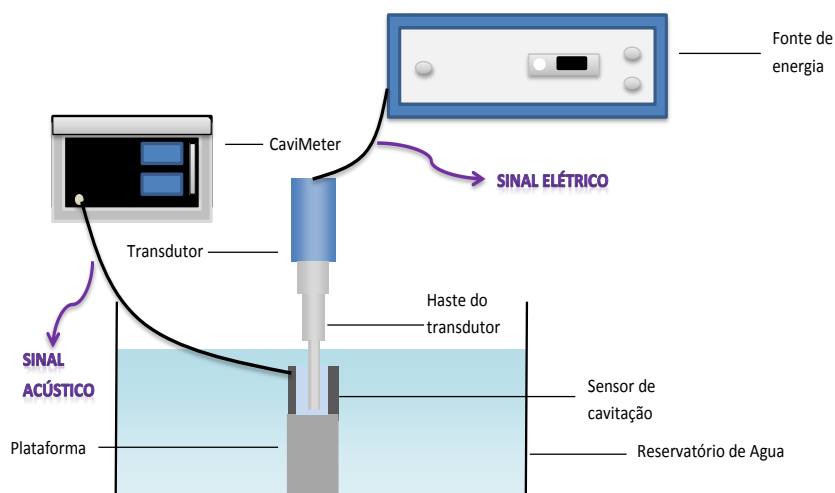


Figura 20. Esquema da montagem CaviMeter-Sensor de cavitação

⁵ Deionizada e com filtração de 95% para eliminar partículas iguais ou superiores a 5 μm

O fenômeno da cavitação foi gerado pela aplicação da energia elétrica imposta pela fonte ao transdutor (que gera um campo acústico indutor do fenômeno da cavitação) durante intervalos de 1 minuto, para diferentes amplitudes do sinal. A figura 21 caracteriza as duas saídas (outputs) do CaviMeter: curva do campo indutor (*driving field*) gerada pelo transdutor e curva do nível de cavitação (*cavitation level*). O eixo das ordenadas apresenta o valor RMS (V) do sinal de saída do CaviMeter (à esquerda, na cor ocre, o sinal do campo indutor e, na cor verde, o do nível de cavitação). O eixo das abcissas refere-se à amplitude de pulsação (μm) experimentada pelo transdutor alimentado pela fonte de energia.

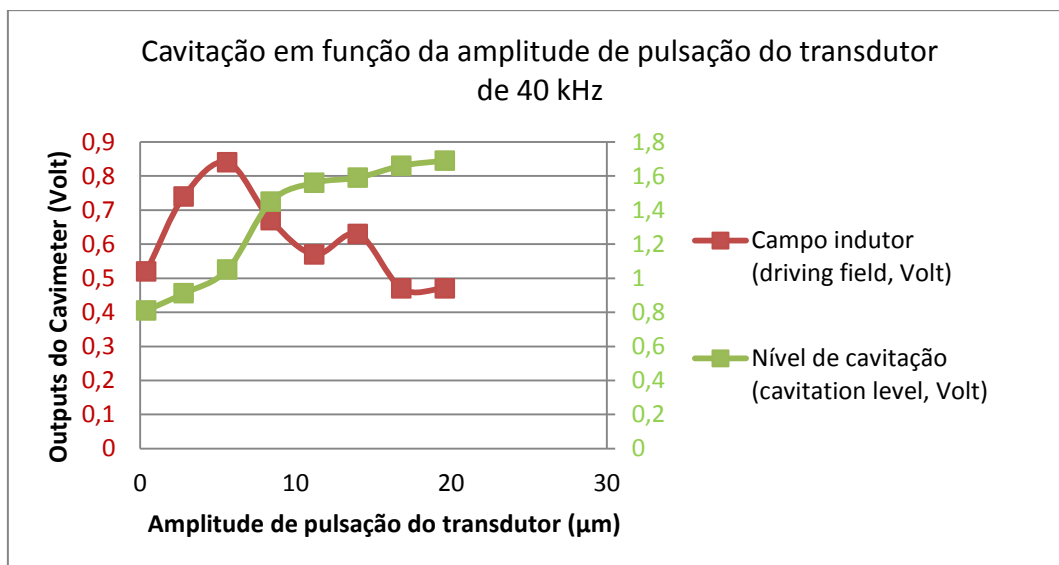


Figura 21. Nível de cavitação e campo indutor, transdutor de 40 kHz

4.1.1.1.

Experimentos realizados com o transdutor de 40 kHz

Para os experimentos realizados com o transdutor de 40 kHz, o CaviMeter apresenta as seguintes saídas (*outputs*):

- **Campo indutor** - atinge um valor máximo (0,840 V) na amplitude de pulsação de 5,6 μm , condição a partir da qual decresce com o aumento da amplitude tendendo a se estabilizar. Este processo se repete (um novo pico parece se formar na condição 0,630 V-14 μm), tendendo a se estabilizar num patamar de 0,470 V a partir da amplitude de pulsação de 16,8 μm .
- **Nível da cavitação** – evolui de um valor incipiente para um valor máximo que se estabiliza na condição de cavitação máxima (1,560 V; 11,2 μm). A curva *cavitation level* caracteriza o processo de formação/crescimento das bolhas evoluindo para uma condição de estabilização (processo de saturação) que corresponde ao auge da cavitação.

4.1.1.2.

Experimentos realizados com o transdutor de 20 kHz

Os experimentos realizados com o transdutor de 20 kHz exibem resultados similares (figura 22).

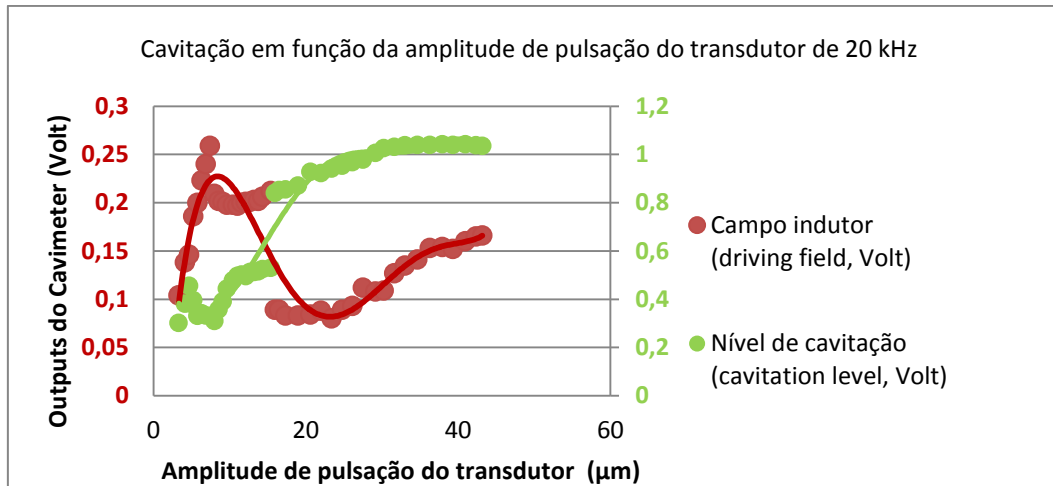


Figura 22. Nível de cavitação e campo indutor, transdutor de 20 kHz

Embora análoga, a estabilização ocorreu de forma mais direta (sem oscilação do campo indutor) na condição 0,15 V e amplitude de pulsação do transdutor de 37,95 μm , condição que corresponde ao máximo da cavitação (1,00 V, a partir de uma amplitude de 27,5 μm).

As figuras 21 e 22 (referentes, respectivamente, a frequências nominais dos transdutores de 20 e 40 kHz) ilustram um comportamento similar do campo indutor. Para ambos os experimentos, observa-se nitidamente um decréscimo abrupto do campo indutor (uma das saídas do CaviMeter) explicado pelo colapso das bolhas que caracteriza o “auge” da cavitação.

A figura 23 ilustra a relação entre ambas as saídas do CaviMeter: os sinais associados ao campo indutor e ao nível de cavitação, para os dois transdutores estudados (40 kHz e 20 kHz).

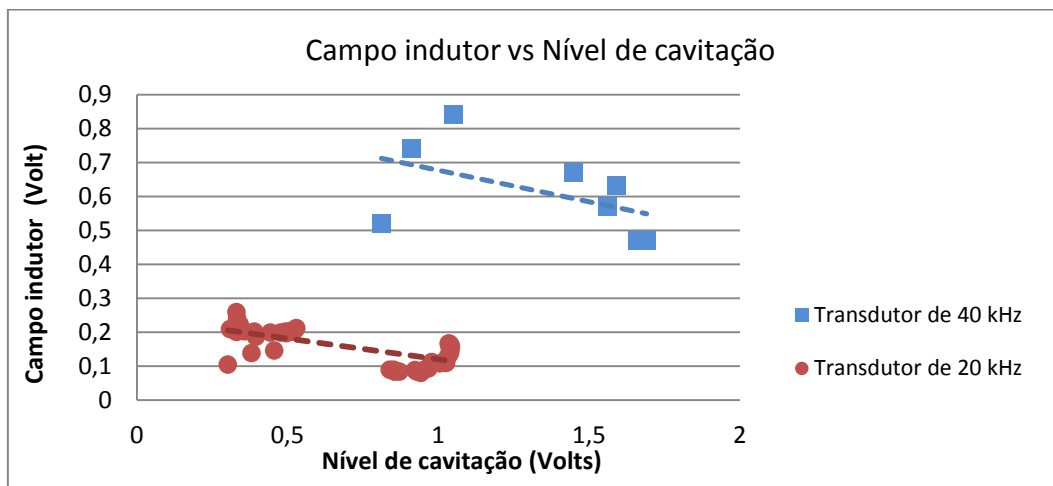


Figura 23. Campo indutor em função do nível de cavitação

4.1.2. Cavitação para uma amplitude fixa de pulsação do transdutor

Contrastando com o estudo anterior em que se variou a amplitude do sinal de alimentação do transdutor (fonte de energia), neste experimento, ao longo de uma hora, manteve-se constante o sinal que alimenta o transdutor e, portanto, a amplitude de pulsação do transdutor. O experimento foi repetido para os dois transdutores considerados, i.e.: 40 e 20 kHz. A figura 24 ilustra os resultados dos experimentos realizados (nível de cavitação e campo indutor) com o transdutor de 40 kHz e de 20 kHz.

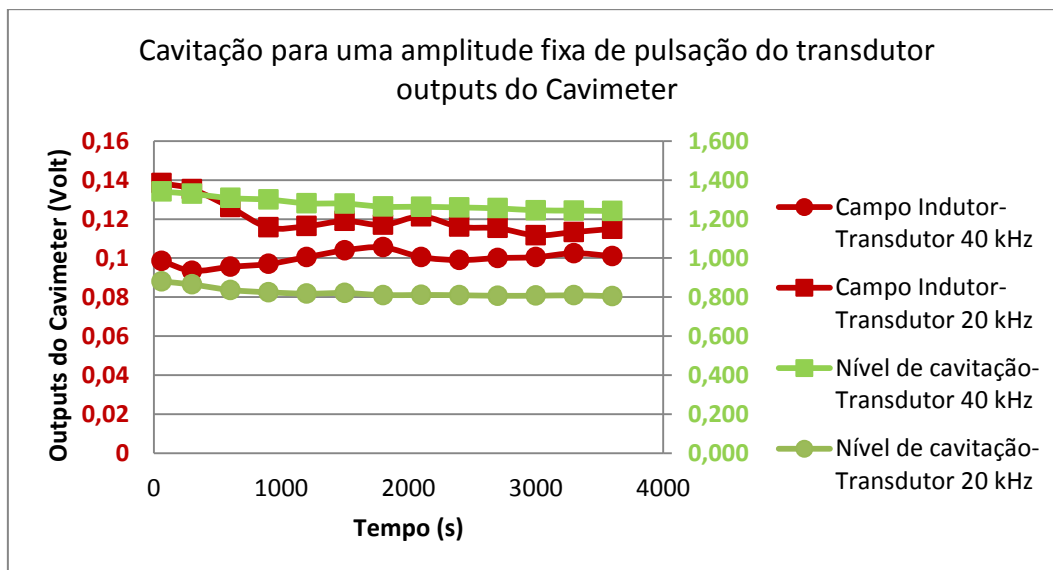


Figura 24. Nível de cavitação e campo indutor (Amplitude fixa de pulsação)

Os resultados obtidos (figura 24) são discutidos a seguir tomando-se como referência o “tempo zero” quando o fenômeno da cavitação já se desenvolvia após um minuto de inicialização da energização da fonte de energia que alimenta o transdutor. A partir dessa condição de referência, as saídas do CaviMeter passaram a ser monitorados.

- **Experimentos realizados com o transdutor de 40 kHz**
 - **Campo indutor** – No início do experimento, com o transdutor já em operação (tempo zero), o campo indutor (output do CaviMeter) registrava um valor de 0,098 V, atingindo o valor de 0,101 V após um intervalo de tempo de 1 hora de observação do fenômeno da cavitação. Ou seja, o sinal manteve-se estável dentro de uma margem de 2%.
 - **Nível da cavitação** – Já a saída do CaviMeter associado ao *nível de cavitação*, indicava um valor de 1,341 V no tempo zero de referência do experimento, atingindo o valor de 1,242 V após o intervalo de 1 hora de observação da cavitação. Ou seja,

estabilidade do sinal numa margem de 7,3% (resultado que foi verificado pela análise estatística desenvolvida na seção 4.1.4).

- **Experimentos realizados com o transdutor de 20 kHz**
 - **Campo indutor** – Após um intervalo de tempo de 1 hora de operação do transdutor o campo indutor (*output* do CaviMeter) manteve-se estável numa margem de 16%.
 - **Nível da cavitação** – A mudança do nível de cavitação após 1 hora de operação do transdutor atingiu um patamar de 8,5%.

4.1.3.

Cavitação em função do posicionamento do transdutor

Entendendo que a cavitação deve ser influenciada pela proximidade da parede da cavidade na posição em que o fenômeno ocorre, um novo experimento foi concebido para investigar o efeito do posicionamento do transdutor na cavidade de cavitação. Tendo em vista que os dados da figura 21 mostraram que a amplitude do sinal de alimentação do transdutor impacta na resposta do CaviMeter, este novo experimento para investigar a influência do posicionamento do transdutor na cavidade foi repetido para 8 valores da amplitude de pulsação do transdutor. Evocando ainda os experimentos anteriores, é possível observar que a frequência do transdutor é menos impactante que a amplitude do sinal de alimentação; por essa razão esse novo conjunto de experimentos foi realizado apenas para o transdutor de 20 kHz.

A figura 25 ilustra o arranjo experimental utilizado, que permitiu medições do nível de cavitação (uma das duas saídas do CaviMeter) em 23 posições ao longo do centro do sensor de cavitação.

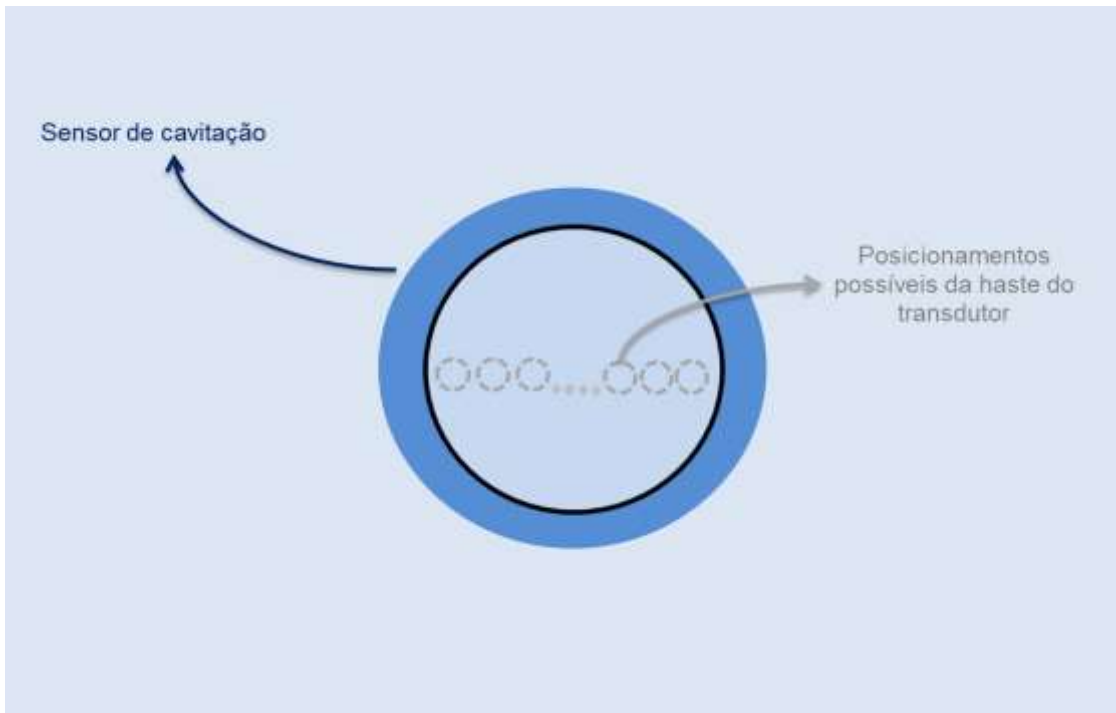


Figura 25. Vista superior do sensor e diferentes posições do transdutor

A figura 26 ilustra os resultados do nível de cavitação para nove valores da amplitude de pulsação do transdutor (δ) gerados pela variação do sinal de alimentação. Os valores são: 3,3 μm ; 11 μm ; 13,75 μm ; 15,13 μm ; 16,5 μm ; 19,25 μm ; 22 μm ; 27,5 μm ; 43,45 μm .

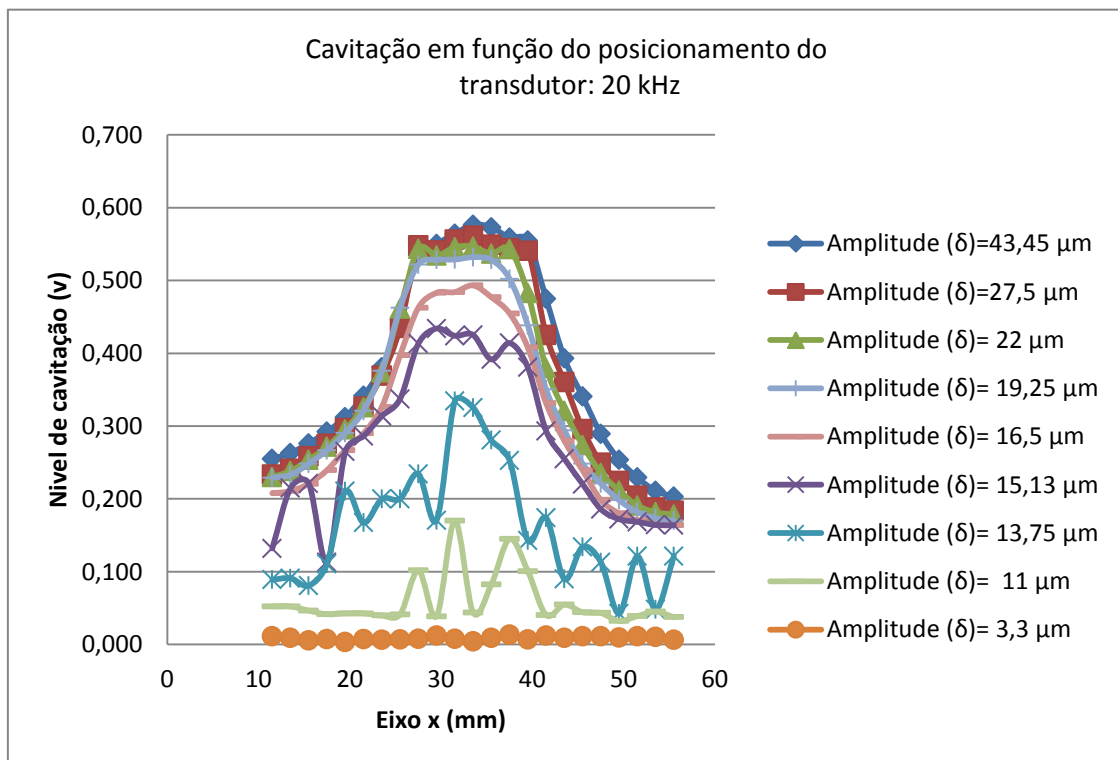


Figura 26. Nível de cavitação versus posicionamento do transdutor

Duas observações distintas resultam da análise dos dados obtidos: uma associada ao padrão de assimetria e outra à intensidade do nível de cavitação. No que concerne o padrão de simetria, este parece se consolidar apenas para deslocamentos do transdutor superiores a 16,5 μm , explicado pelo fato de o auge da cavitação não ter ainda se iniciado (o que sinaliza estabilidade do fenômeno da cavitação). Já no que se refere à intensidade do nível de cavitação para amplitudes de pulsação superiores a 27,5 μm , a simetria é mantida e o nível de cavitação saturado em torno de 0,561 V. A amplitude de saturação de 27,5 μm foi igualmente observada no experimento anteriormente descrito e ilustrado na Figura 21.

4.1.4. Análise estatística do nível da cavitação

O fundamento central desta pesquisa de mestrado está relacionado à estabilidade da cavitação no tempo (valores obtidos nos experimentos da seção 4.1.2.) enquanto agente indutor do processo de erosão em materiais de engenharia. Tendo em vista que a variável crítica deste processo é o *nível de cavitação* (saída do CaviMeter), a análise estatística aqui encaminhada concentra-se nesse resultado.

A análise estatística baseou-se no *teste qui-quadrado* utilizado para determinar se uma determinada série de dados segue a distribuição padrão.

O teste qui-quadrado desenvolveu-se na seguinte sequência:

- i) Definir **n intervalos de frequência**, com cobertura sobre todos os dados da amostra.
- ii) Obter a quantidade de dados contidos em cada intervalo de frequência, estas são as **frequências reais do teste (fi)**.
- iii) Determinar a **frequência teórica (ei)**, definida como a quantidade de dados que em teoria deveria ter cada intervalo de frequência, pelo caso de uma distribuição uniforme a frequência teórica é igual para todos os intervalos.
- iv) **Calcular a estatística do teste (Q)** definida como:

$$Q = \sum \frac{(f_i - e_i)^2}{e_i} \quad (3)$$

- v) Comparar o valor de Q com o **valor da tabela de qui-quadrado (X^2)**, definida em função dos **graus de liberdade**

(n-1) e o nível de confiabilidade. A comparação segue a seguinte condição:

Se $X^2 > Q$, não se pode descartar a hipótese de que, para um determinado nível de confiabilidade, os dados seguem uma distribuição uniforme.

As tabelas 1 e 2 ilustram os valores obtidos das frequências reais e teóricas dos níveis de cavitação (dados obtidos das medições feitas no bloco 4.1.2) pelos transdutores de 20 e 40 kHz.

Tabela 1. f_i e e_i do nível de cavitação [Transdutor 20 kHz]

<i>Intervalos de frequência (Volt)</i>	<i>Frequência real (f_i)</i>	<i>Frequência teórica (e_i)</i>	$(f_i - e_i)^2 / e_i$
(0,805-0,820)	1	4,33	2,56
(0,820-0,835)	7	4,33	1,64
(0,835-0,880)	5	4,33	0,10
		Q	4,31

Tabela 2. f_i e e_i do nível de cavitação [Transdutor 40 kHz]

<i>Intervalos de frequência (Volt)</i>	<i>Frequência Real (f_i)</i>	<i>Frequência teórica (e_i)</i>	$(f_i - e_i)^2 / e_i$
(1,242-1,261)	1	3,25	1,56
(1,261-1,281)	4	3,25	0,17
(1,281-1,301)	4	3,25	0,17
(1,301-1,341)	4	3,25	0,17
		Q	2,08

Para um nível de confiabilidade de 99%, a Tabela 3 classifica a natureza da distribuição do nível de cavitação para os transdutores de 20 e 40 kHz:

Tabela 3. Estatística dos experimentos com transdutor de 20 e 40 kHz

Transdutor	<i>Saída do CaviMeter</i>	Q	χ^2	n-1	Natureza da distribuição
20 kHz	Nível de cavitação	4,31	9,21	2	Uniforme
40 kHz	Nível de cavitação	2,08	11,35	3	Uniforme

4.2. Cavitação induzida por ultrassom na presença da erosão

A interação mútua existente entre a cavitação e determinado material erodido é analisado neste bloco, segundo dois enfoques: (i) análise da erosão induzida pela cavitação nos materiais de engenharia estudados e (ii) análise do comportamento da cavitação (nível de cavitação) durante os experimentos de erosão de cada material utilizado. O procedimento para gerar erosão no material de engenharia baseia-se na norma ASTM G32:2010.

4.2.1. Materiais de engenharia selecionados

Foram selecionados três materiais de engenharia empregados no setor industrial: alumínio 6082, liga alumínio-bronze (liga Al-bronze) e aço inoxidável 304 (aço inox 304).

- **Alumínio 6082:** liga de média resistência com boas características anticorrosivas comparativamente às ligas da série 6000. Conhecido como liga estrutural, este material é comumente utilizado para usinagem, com aplicação na construção de treliças, pontes.
- **Liga alumínio-bronze:** Material de engenharia utilizado na marinha, indústria do petróleo e química, eixos de hélice, conexões de válvulas, parafusos, rolamentos pesados, entre outros usos.
- **Aço inoxidável 304:** é o mais versátil e mais amplamente usado dos aços inoxidáveis, é utilizado para uma grande variedade de aplicações domésticas e comerciais (e.g.: tanques e recipientes para uma variedade de líquidos e sólidos, ferramentas industriais, painéis de arquitetura, recipientes de produtos químicos, trocadores de calor).

4.2.1.1. Composição química

A tabela 4 ilustra a composição química dos materiais empregados.

Tabela 4. Composição química dos materiais estudados

Material de engenharia	Elemento (%)																	
	Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	Al	Sn	Ni	Pb	C	P	S	Si	N	
Alumínio 6082	0,70-1,30	0,60-1,20	0,40-1,00	0-0,50	0-0,25	0-0,20	0-0,10	0-0,05	Bal									
Liga alumínio-bronze			0,80-1,50	3,50-4,50		0,5		Bal	8,50-9,50	0,1	4,00-5,00	0,05						
Aço inoxidável 304			2	Bal	18,00-20,00						8,00-12,00		0,08	0,04	0,03	0,75	0,1	

4.2.1.2. Características físicas

A seguir, na Tabela 5, são referidas as propriedades dos materiais de engenharia que influenciam o desenvolvimento da erosão induzida pela cavitação:

Tabela 5. Propriedades dos materiais

Material de engenharia	Propriedades	
	Densidade (mg/mm ³)	Dureza Brinell (HB)
Alumínio 6082	2,73	89
Liga alumínio-bronze	8,90	170
Aço Inoxidável 304	7,94	201

4.2.2. Procedimento experimental: passo-a-passo do experimento

Na sequência do experimento da erosão induzida pela cavitação foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Transdutor: 20 kHz, Sonic Systems 23820A, Serial 034
- Fonte de energia: Sonic Systems, Processor P100/3-20, Serial L038
- Termômetro: Omega HH506R
- Balança: Sartorius LP1200s, resolução: 1 mg
- Reservatório de água⁶: 25x40x20 cm
- CaviMeter e Sensor de cavitação “HIFU” com cabo de extensão
- Sistema de posicionamento manual

A figura 27 ilustra a configuração geral do experimento.

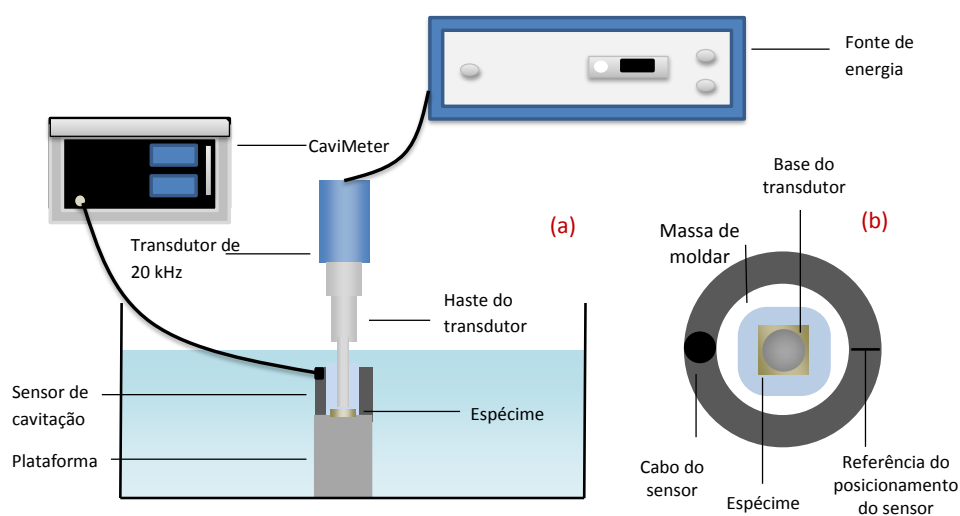


Figura 27. Montagem do experimento de erosão induzida por cavitação

⁶ Deionizada e com filtração de 95% para eliminar partículas iguais ou superiores a 5 µm

O experimento foi realizado a partir das instruções a seguir listadas:

1. Nivelar massa de moldar em cima da plataforma a uma espessura de aproximadamente 1 mm (figura 25b).
2. Pressionar o espécime sobre a massa de moldar utilizada para fixar o espécime na plataforma.
3. Usar o nível de bolha a fim de nivelar o espécime sobre a massa de moldar.
4. Colocar a plataforma e o espécime no reservatório de água.
5. Fixar o sensor de cavitação na plataforma. Verificar a orientação do sensor (figura 25b).
6. Verificar o nivelamento do espécime e a plataforma no reservatório de água.
7. Liberar o sistema de posicionamento ao longo dos eixos x-y (figura 28)



Figura 28. Sistema de posicionamento do transdutor

8. Mover o transdutor sobre o centro do espécime, desapertar o transdutor e descansar nessa seção.
9. Apertar os planos x-y no sistema de posicionamento.
10. Mover o transdutor até 0,5 mm, 1 mm ou 2 mm usando a régua no lado do transdutor, tendo como referência a superfície do espécime. Nota: verificar o nível do transdutor usando o nível de bolha antes de apertar o transdutor em sua posição final.
11. Registrar o ruído de fundo do nível da cavitação e o campo indutor sem a fonte de energia ligada. Anotar a temperatura inicial da água posicionando a sonda próxima do espaçamento haste do transdutor-espécime.
12. Pressionar "Sonics" na fonte de energia para iniciar o transdutor (garantir que a amplitude seja ajustada para o valor previamente definido).
13. Registrar o nível de cavitação e o campo indutor gerado pelo transdutor numa planilha excel. A periodicidade das medições das saídas do Cavimeter depende do tempo de exposição do espécime à cavitação (Tabela 6):

Tabela 6. Periodicidade da medição dos outputs do CaviMeter

Tempo de exposição à cavitação (min)	Periodicidade da medição (s)
15	15
30	15
45	60
60	60
120	60

14. Medir a temperatura final da água após o intervalo de medição.
15. Remover o espécime da plataforma (recomenda-se o uso de luvas).
16. Limpar o espécime com metanol.
17. Medir a massa do espécime (após cada intervalo de medição).

4.2.3.

Amplitude de pulsação (δ) e afastamento do transdutor (λ)

Para a instrumentação disponível, isto é: fonte-transdutor (indutor da cavitação) e CaviMeter (instrumento para medição da cavitação), três condições de experimentos foram concebidas objetivando maximizar o potencial do sistema disponível.

Fazendo uso de um espécime construído em aço-inox 304 (dos três materiais, o menos susceptível à erosão), a figura 29 ilustra o domínio de atuação da instrumentação utilizada, ou seja, a faixa de amplitude de pulsação produzida pelo transdutor (excitado pela sua fonte) e a cavitação gerada, mensurada pelo CaviMeter utilizado. Este mapeamento da capacidade da instrumentação foi repetido para três afastamentos ($\lambda = 0,5$; $\lambda = 1,0$ e $\lambda = 2$ mm)⁷ do transdutor em relação à superfície do espécime que será submetido à ação da erosão.

⁷ A norma ASTM G32:2010, aplicável aos ensaios de erosão induzidos pela cavitação, define dois valores de afastamento entre a haste do transdutor e a superfície do espécime ($\lambda = 0,5$ e $\lambda = 1,0$)

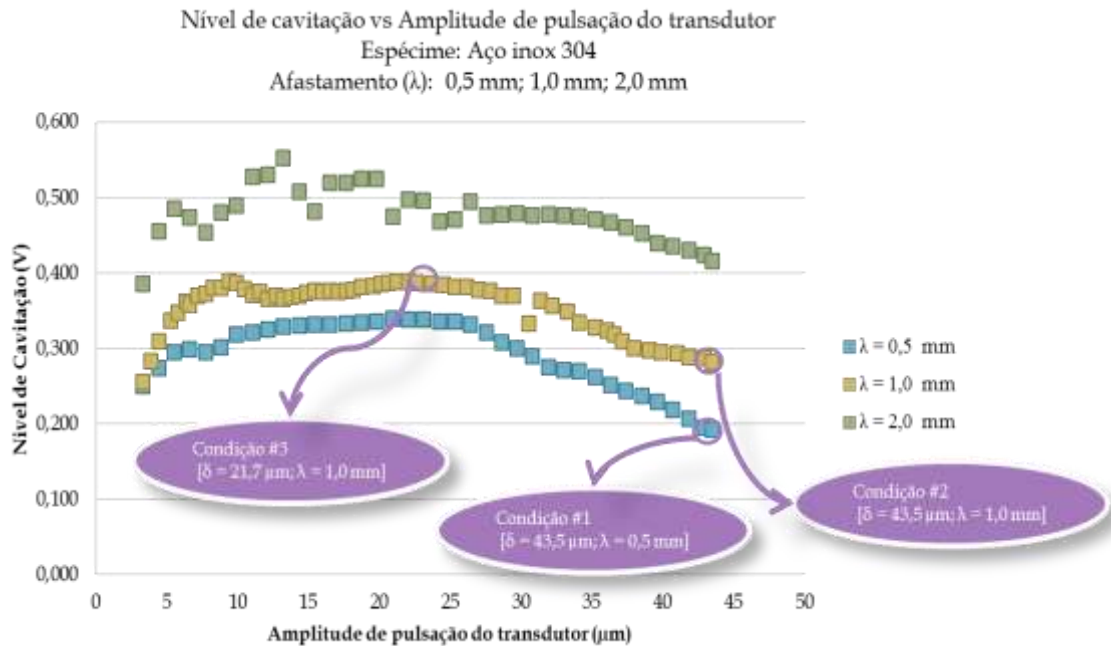


Figura 29. Mapeamento dos domínios de atuação da instrumentação utilizada

Conforme ilustrado, a instrumentação mobilizada opera na faixa $3,3 \mu\text{m} < \delta < 43,5 \mu\text{m}$. Dentro dessa faixa de operação da instrumentação, foram definidas três combinações de δ e λ , denominadas *condições de operação* da instrumentação.

São elas:

- Condição #1 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$]
- Condição #2 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]
- Condição #3 [$\delta = 21,7 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]

Para essas três condições de operação, seis experimentos foram concebidos para avaliar (i) a influência da amplitude de pulsação do transdutor (δ) e (ii) o afastamento (gap) da haste do transdutor com relação à superfície do espécime submetido à erosão (λ).

Esses seis experimentos são caracterizados a seguir:

- **Experimento #1, na Condição #1** [Espécime em Aço inox 304]
- **Experimento #2: na Condição #1** [Espécime em Liga Al-bronze]
- **Experimento #3: na Condição #2** [Espécime em Alumínio 6082]
- **Experimento #4: na Condição #2** [Espécime em Aço inox 304]
- **Experimento #5: na Condição #2** [Espécime em Liga Al-bronze]
- **Experimento #6: na Condição #3** [Espécime em Alumínio 6082]

A potência elétrica da fonte de energia que gera (na haste do transdutor) uma pulsação de $43,45 \mu\text{m}$ e $21,73 \mu\text{m}$ é 59 W e 22 W , respectivamente; essas potências elétricas foram lidas diretamente da fonte de energia.

As temperatura da água (volume = $0,0153 \text{ m}^3$) utilizada como o meio para a indução da cavitação mantiveram-se, naturalmente, entre 20°C e 25°C durante os seis experimentos. Para o volume do reservatório de água, a perda de água por evaporação foi considerada desprezível.

A duração de cada experimento (tabela 7) depende do material de engenharia (alumínio, liga ou aço) utilizado.

Tabela 7. Duração dos experimentos para diferentes materiais

Material de engenharia	Duração do experimento (min)
Alumínio	210
Aço	480
Liga	720

4.2.4. Análise com enfoque na erosão

O enfoque na erosão considera as seguintes variáveis críticas: perda de massa, taxa de erosão, profundidade média da erosão e tempo de exposição do espécime à erosão. A resolução (1 mg) da balança Sartorius utiliza (série LP1200) foi considerada adequada para mensurar as perdas de massa resultantes do processo de erosão, permitindo, assim, sem ambiguidade, caracterizar a fase de incubação da erosão.

A haste do transdutor utilizado foi construída com uma liga de titânio para prevenir contra desgastes da ponteira do transdutor durante os experimentos realizados. Para cada um desses experimentos, somente um espécime foi exposto à erosão.

Os materiais de engenharia utilizados foram analisados no microscópio antes e depois de ser sometidos a erosão.

4.2.4.1.

Perda de massa na Condição #1 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$]

Os experimentos realizados na Condição #1 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$] referem-se aos seguintes materiais de engenharia:

- Aço inoxidável 304
- Liga alumínio-bronze

Experimentos foram realizados para mensurar a perda de massa em espécimes dos materiais acima indicados em distintos tempos de duração.

4.2.4.1.1.

Condição #1, Experimento #1 (Aço Inox 304)

Para o caso do espécime em Aço Inox 304, a perda de massa foi monitorada durante os seguintes tempos acumulados de exposição à erosão: 15, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 540, 600, 720 minutos. Ou seja, após os primeiros 15 minutos de exposição do espécime à erosão, o experimento foi interrompido e a perda de massa mensurada. No momento subsequente desse experimento acumulativo, a perda de massa foi novamente mensurada após 15 minutos de exposição à erosão, processo esse que totalizou uma exposição de 30 minutos, em dois intervalos de 15 minutos. E assim sucessivamente para os tempos de exposição indicados. A figura 30 ilustra a perda de massa mensurada nesses intervalos e a taxa de erosão (perda de material no tempo) que resulta desse processo.

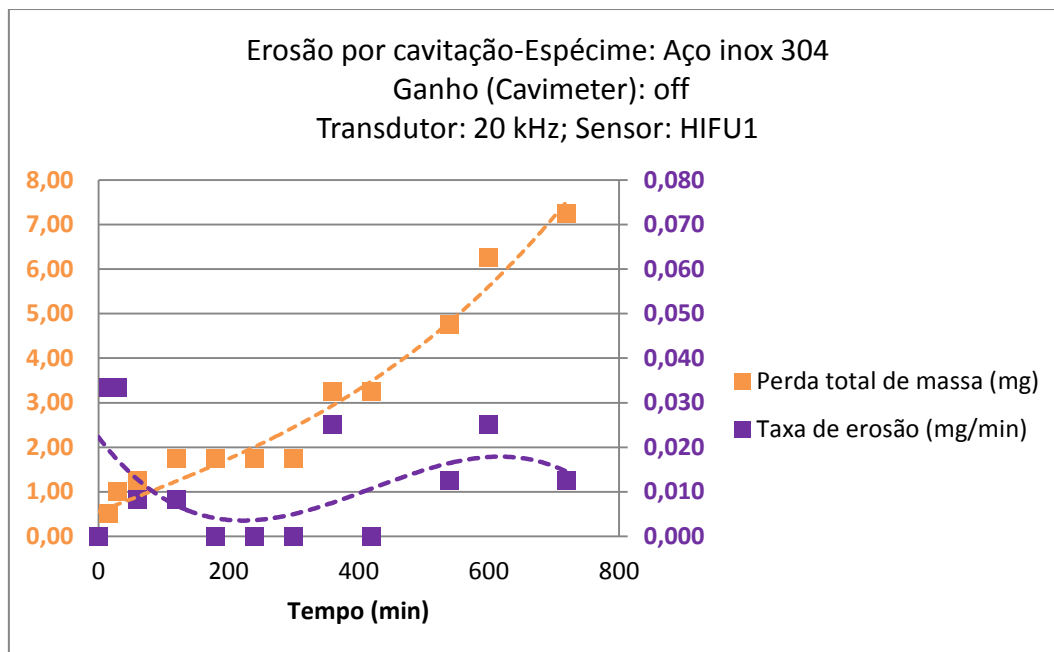


Figura 30. Experimento #1: perda de massa e taxa de erosão

Conforme documentado pelos resultados da figura 30, o período de incubação da erosão foi observado nos primeiros 30 min do experimento; após esse tempo a taxa de erosão atingiu valores que oscilam entre 0,008 mg/min e 0,025 mg/min. O aço inoxidável 304 é um aço austenítico, portanto de elevada resistência à erosão quando comparável aos outros materiais estudados (Liga Al-bronze e Alumínio 6082).

4.2.4.1.2.

Condição #1, Experimento #2 (Liga Al-bronze)

Similarmente ao experimento de perda de massa para o espécime em aço inox, uma nova sequência de experimento acumulativo no tempo foi realizada para o espécime em Liga Al-bronze. Ou seja, a massa do espécime foi mensurada nos seguintes tempos acumulados de exposição à erosão: 15, 30, 60, 120, 180, 225, 285, 345, 405, 465, 480 minutos. A figura 31 ilustra a perda de massa mensurada e a respectiva taxa de erosão.

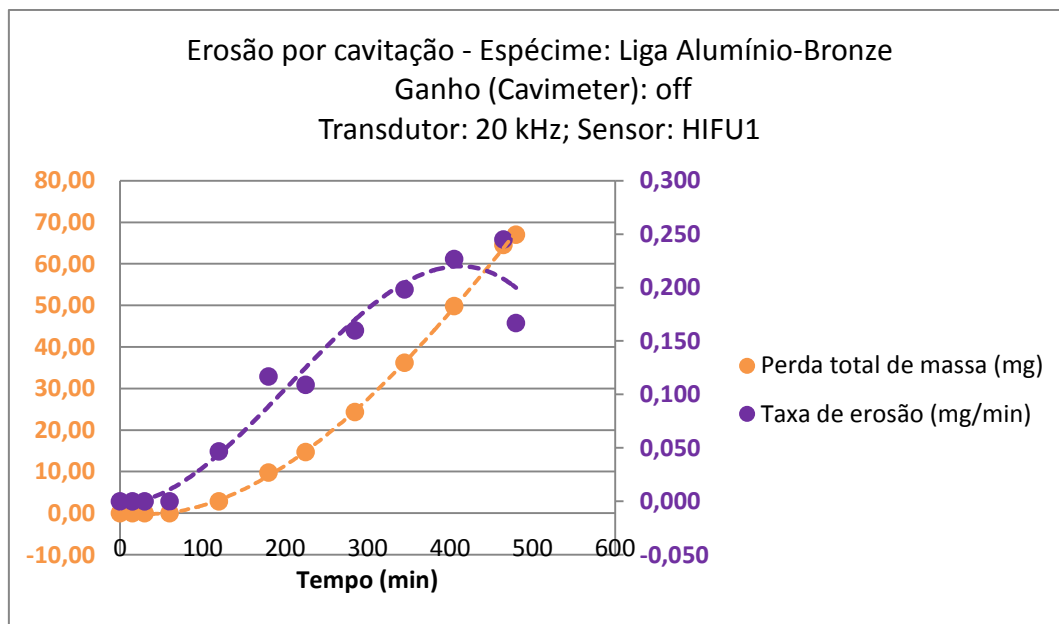


Figura 31. Experimento #2: perda de massa e taxa de erosão

Os resultados da medição de perda de massa mostram que, após 60 minutos do experimento, a liga alumínio-bronze resistiu à erosão (fase de incubação). A fase de aceleração da erosão ocorreu no intervalo de tempo 120-465 minutos. A taxa de erosão para o espécime estudado (liga Al-bronze) atingiu o seu máximo (0,245 mg/min) após 465 minutos de erosão, momento em que a perda de massa totalizou 64,5 mg.

4.2.4.1.3.

Profundidade média de erosão (ξ) na Condição #1

A profundidade média da erosão (ξ) é calculada a partir da equação 2. A tabela 8 ilustra os valores calculados da profundidade média da erosão em função do tempo acumulado do experimento para cada um dos materiais empregados na Condição #1 (experimentos #1 e #2).

Tabela 8. Profundidade média da erosão nos experimentos #1 e 2

Tempo acumulado do Experimento (min)	Profundidade média da erosão (ξ , medida em μm)	
	Aço Inoxidável 304	Liga alumínio-bronze
0	0,00	0,00
15	0,36	0,00
30	0,72	0,00
60	0,90	0,00
120	1,26	1,56
180	1,26	5,48
225	NM	8,21
240	1,26	NM
285	NM	13,58
300	1,26	NM
345	NM	20,23
360	2,35	NM
405	NM	27,83
420	2,35	NM
465	NM	36,04
480	NM	37,44
540	3,43	NM
600	4,52	NM
720	5,60	NM

NM = não mensurado

A figura 32 ilustra, na forma gráfica, os dados da tabela 8.

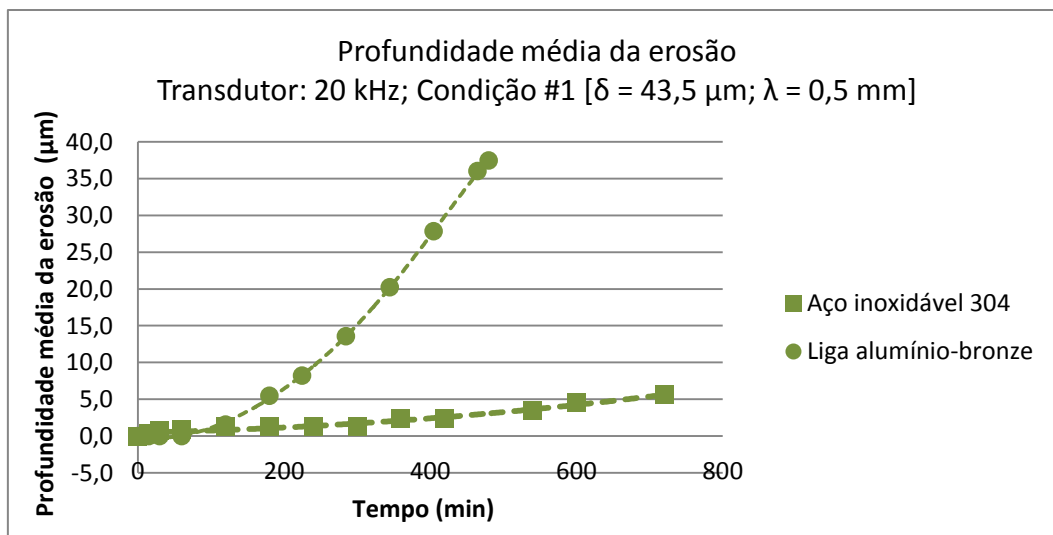


Figura 32. Profundidade média de erosão na Condição #1

4.2.4.2.

Perda de massa na Condição #2 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]

Os experimentos realizados na Condição #2 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$] referem-se aos seguintes materiais de engenharia:

- Alumínio 6082
- Aço inoxidável 304
- Liga alumínio-Bronze

Nota: O material Alumínio (não testado na Condição #1) foi avaliado nesta Condição #2, abrangendo o estudo a materiais que apresentaram maior suscetibilidade à erosão.

4.2.4.2.1.

Condição #2, Experimento #3 (Alumínio 6082)

Similarmente aos experimentos desenvolvidos na condição #1, um novo experimento com intervalos acumulativos de tempo foi realizado para o espécime em Alumínio 6082. Ou seja, a massa do espécime foi mensurada nos seguintes tempos acumulados de exposição à erosão: 15, 30, 60, 75, 105, 120, 180, 195 minutos. A figura 33 ilustra a perda de massa mensurada e a respectiva taxa de erosão.

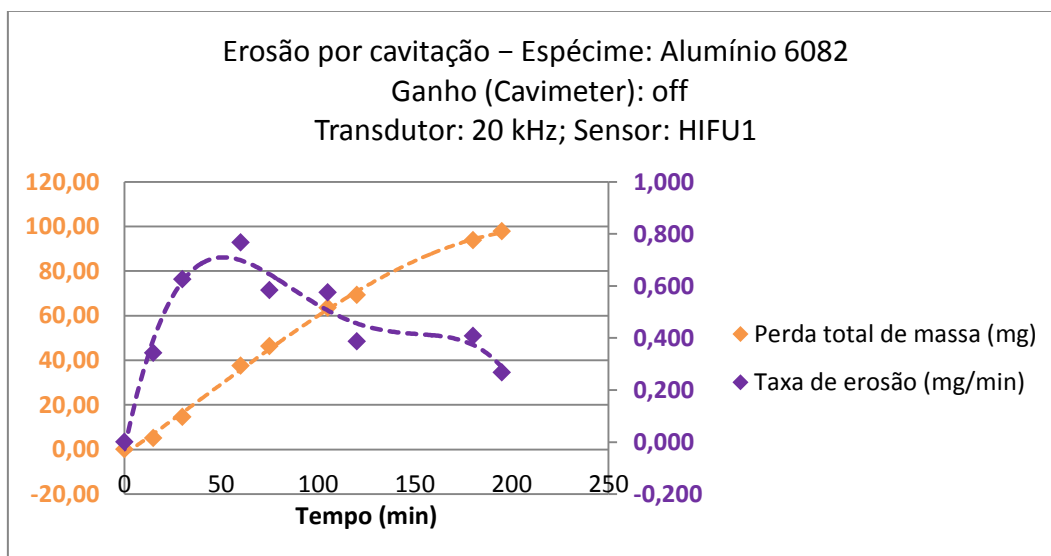


Figura 33. Experimento #3: perda de massa e taxa de erosão

Os resultados da medição de perda de massa mostram que a taxa de erosão para o material alumínio atinge o seu máximo (0,767 mg/min) após 60 min de erosão quando a perda de massa totalizou 37,5 mg (período de aceleração da taxa

de erosão), reduzindo a sua intensidade (período de desaceleração) enquanto durou o experimento (abortado após 195 min).

4.2.4.2.2.

Condição #2, Experimento #4 (Aço Inox 304)

A figura 34 resume os resultados deste experimento (perda de massa e taxa de erosão) realizado para os tempos acumulados de exposição (15, 30, 60, 120, 150, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 495, 555, 615, 735 minutos).

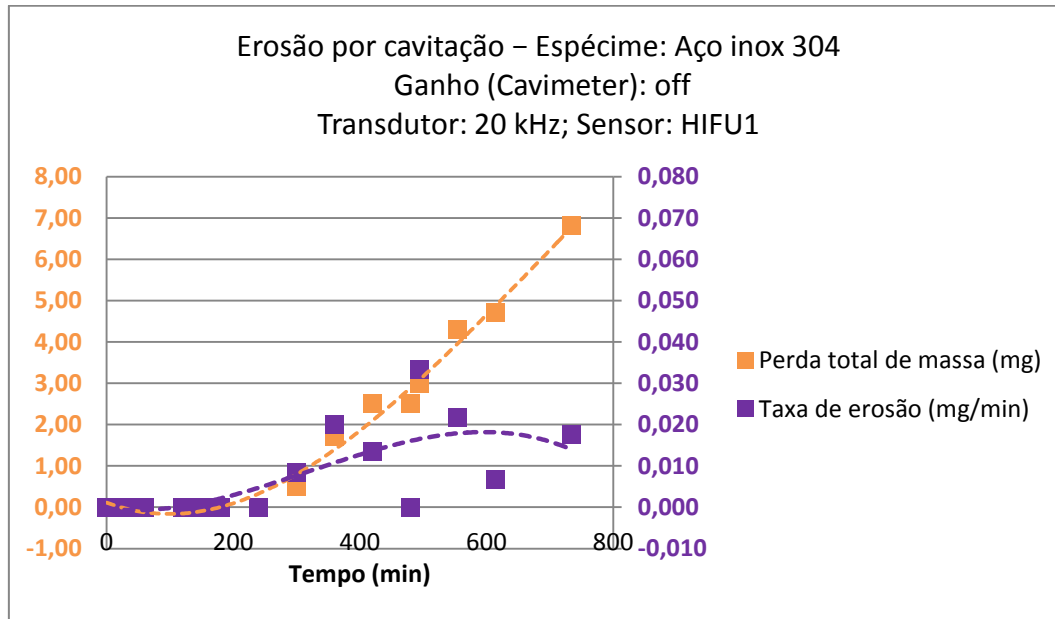


Figura 34. Experimento #4: perda de massa e taxa de erosão

Os resultados da medição de perda de massa mostram que, não obstante o espécime em aço inoxidável 304 já ter sido exposto à cavitação, o processo de erosão somente teve início após 240 minutos do início do experimento, período esse que foi denominado (*cf.* Capítulo 2) de período de incubação. A taxa de erosão atingiu o seu máximo (0,033 mg/min) após 495 min, quando a perda de massa totalizou 3,0 mg. Após esse período de incubação a taxa de erosão oscilou entre um valor máximo (0,020 mg/min) e um valor mínimo (0,007 mg/min).

4.2.4.2.3.

Condição #2, Experimento #5 (Liga Al-bronze)

Similarmente aos experimentos cumulativos anteriormente descritos, uma nova sequência foi realizada para o espécime construído com uma liga alumínio-bronze. A perda de massa do espécime foi mensurada nos seguintes tempos

acumulados de exposição à erosão: 15, 30, 60, 120, 180, 225, 285, 345, 405, 465, 480 minutos. A figura 35 ilustra a perda de massa e a respectiva taxa de erosão.

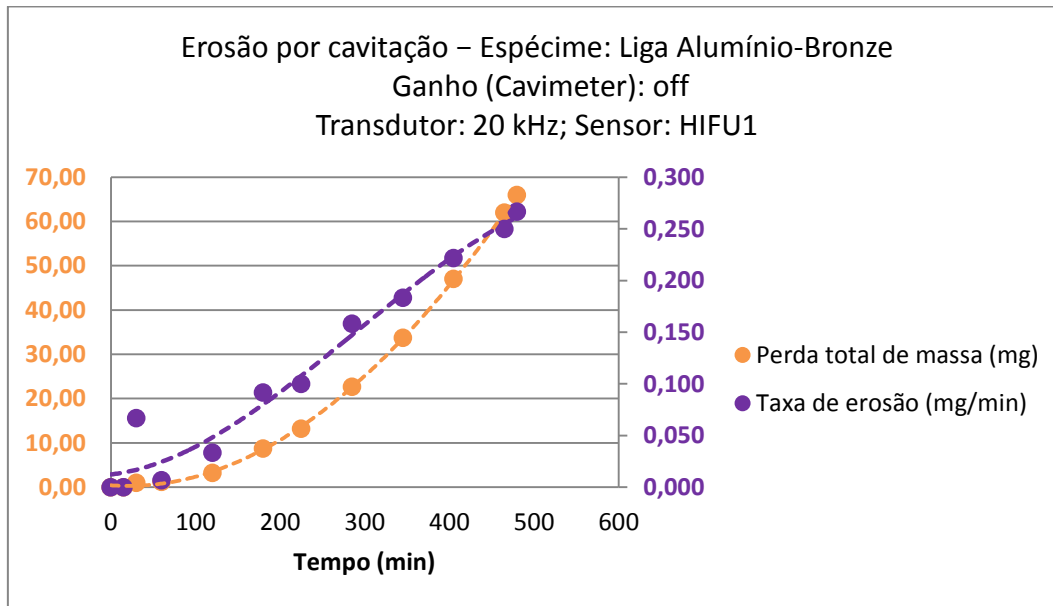


Figura 35. Experimento #5: perda de massa e taxa de erosão

Os resultados da medição de perda de massa ilustrados na figura 32 mostram que, também para este caso, parece existir um período de incubação (nitidamente mais brando) com 15 minutos de duração, somente a partir do qual o efeito da erosão passa a induzir uma perda de massa no espécime. A partir dessa condição a erosão parece evoluir em regime de aceleração, conforme ilustrado no intervalo do experimento entre os tempos acumulados de 120 a 480 min. A taxa de erosão atinge o seu máximo (0,250 mg/min) após 480 min, quando a perda de massa totalizou 66,0 mg.

4.2.4.2.4.

Profundidade média de erosão (ξ) na Condição #2

A partir do cálculo da profundidade média da erosão “ ξ ” pode-se visualizar a média do comprimento dos pits (crateras) formados na erosão. A tabela 9 ilustra os valores da profundidade média da erosão em função do tempo acumulado do experimento para cada um dos materiais empregados na condição #2 (experimentos #3, #4 e #5).

Tabela 9. Profundidade média da erosão nos experimentos #3, 4, 5

Tempo acumulado do Experimento (min)	Profundidade média da erosão (ξ , medida em μm)		
	Alumínio 6082	Aço Inoxidável 304	Liga alumínio-bronze
0	0,00	0,00	0,00
15	9,35	0,00	0,00
30	26,42	0,00	0,56
60	68,32	0,00	0,67
75	84,26	0,00	NM
105	115,69	0,00	NM
120	126,24	0,00	1,79
180	170,80	0,00	4,86
195	178,09	0,00	NM
225	NM	0,00	7,38
240	NM	0,00	NM
285	NM	0,00	12,69
300	NM	0,31	NM
345	NM	NM	18,83
360	NM	1,06	NM
405	NM	NM	26,27
420	NM	1,57	NM
465	NM	NM	34,65
480	NM	1,57	36,38
495	NM	1,88	NM
555	NM	2,69	NM
615	NM	2,94	NM
735	NM	4,26	NM

NM= não mensurado

A figura 36 ilustra, na forma gráfica, os dados da tabela 9.

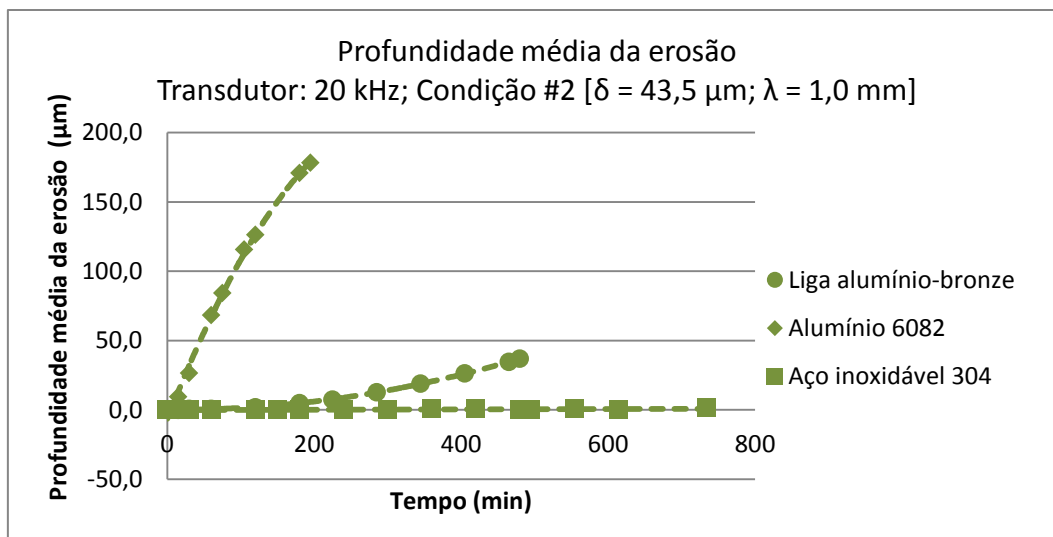


Figura 36. Profundidade média de erosão, Condição #2

4.2.4.3.

Perda de massa na Condição #3 [$\delta = 21,7 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]

Para esta condição estudada, foi utilizado um espécime construído em alumínio 6082, material que mostrou ser o mais suscetível à erosão. A figura 37 ilustra a perda de massa (e respectiva taxa de erosão) mensurada para os tempos acumulados de exposição à erosão (15, 30, 60, 75, 105, 120, 180, 195, 225 minutos).

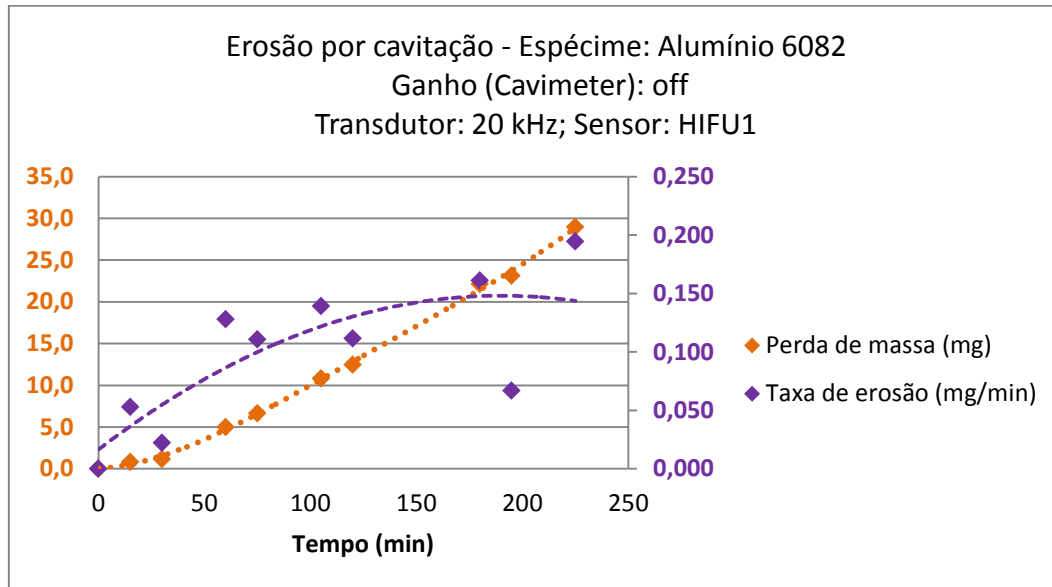


Figura 37. Experimento #6: Perda de massa e Taxa de erosão

Observa-se nesta figura que o período de incubação da erosão ocorreu nos primeiros 15 minutos do experimento, quando o espécime sofreu uma perda de massa de 0,80 mg. Após esse tempo, e até o final do experimento realizado (225 minutos) a taxa de erosão atingiu valores que variam entre 0,022 mg/min e 0,194 mg/min.

A tabela 10 ilustra os valores calculados da profundidade média da erosão em função do tempo acumulado do experimento.

Tabela 10. Profundidade média da erosão no experimento #6

Tempo acumulado do experimento (min)	Profundidade média da erosão (ξ , medida em μm)
0	0,00
15	1,44
30	2,04
60	9,04
75	12,06
105	19,66
120	22,70
180	40,30
195	42,12
225	52,74

A figura 38 ilustra, na forma gráfica, os dados da tabela 10.

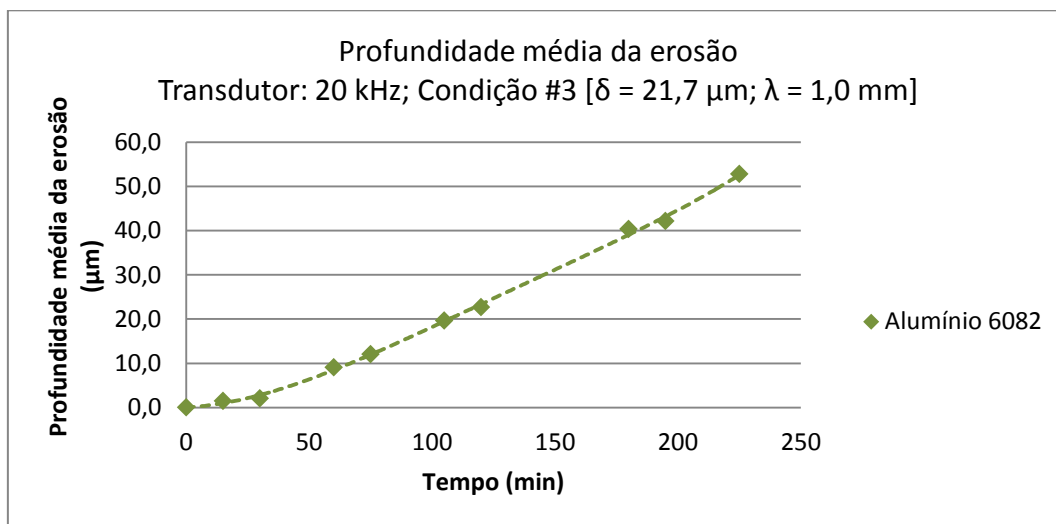


Figura 38. Profundidade média de erosão na Condição #3

Embora esses experimentos pareçam revelar conclusões previsíveis à luz do chamado bom senso em engenharia, esses experimentos são considerados relevantes para desenvolver a compreensão do fenômeno da erosão induzida pela cavitação que será objeto dos desenvolvimentos que serão descritos nas seções subsequentes.

4.2.4.4.

Perda de massa por erosão dos materiais estudados

Os dados da figura 39 comparam os resultados da perda de massa por erosão obtidos nos experimentos descritos nas seções 4.2.4.1 a 4.2.4.3 nas três condições (λ , δ) para os diferentes materiais utilizados (espécimes).

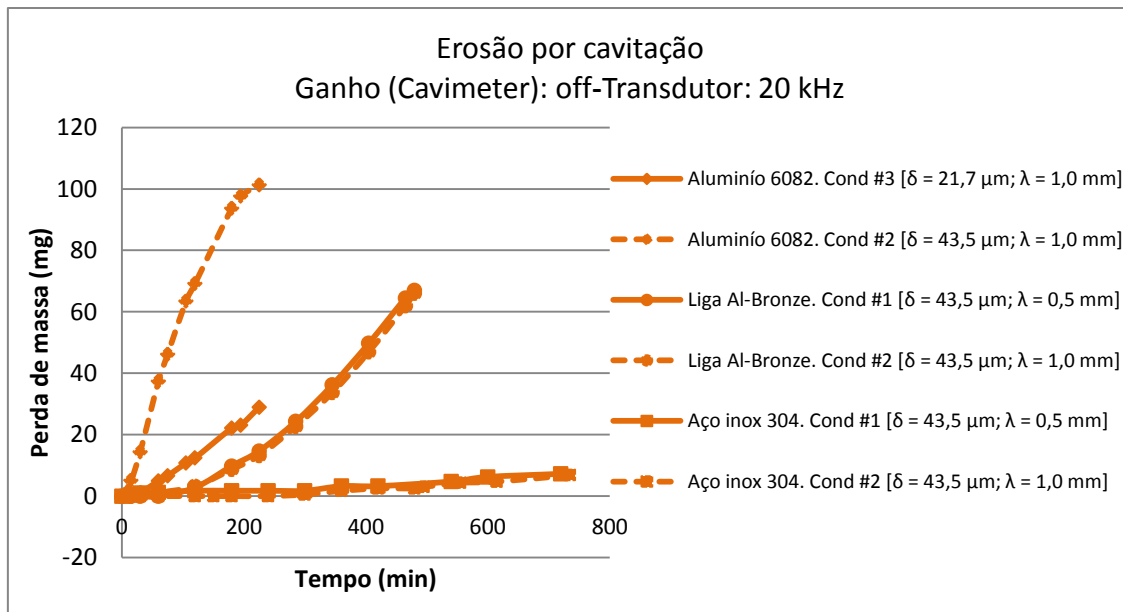


Figura 39. Perda de massa em todos os experimentos

Conforme esperado, os materiais com menor dureza são mais suscetíveis à erosão. A comparação dos resultados na Condição #2 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$] num tempo acumulado de erosão comum a todos os experimentos ($t = 180 \text{ min}$), o espécime em alumínio perdeu 7,7 vezes mais massa que aquele construído em liga alumínio-bronze, condição em que o espécime em aço inox ainda não apresentava qualquer perda de massa (ainda mantinha-se em seu estado de incubação). A comparação de resultados na Condição #1 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$] num tempo acumulado comum a todos os experimentos ($t = 420 \text{ min}$), a liga alumínio-bronze sofreu uma redução de massa 15 vezes superior àquela observada para o espécime em aço inox. Examinando os dados para um mesmo material observa-se:

- **Material #1** (Alumínio 6082) – a perda de massa observada na Condição #3 [$\delta = 21,7 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$] foi 71,4% menor que aquela observada na Condição #2 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$], efeito esse que pode ser atribuído ao parâmetro amplitude de pulsação δ .
- **Materiais #2** (Aço Inoxidável 304) e **#3** (Liga Alumínio-bronze) – a perda de massa observada na Condição #2 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$] foi sistematicamente inferior àquela observada na Condição #1 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$]: 6,2% menor para o espécime em aço Inox e 1,5% para o espécime construído com a liga Al-bronze.

Para os casos da liga Al-bronze e do alumínio 6082, a pesquisa na literatura especializada não revelou experimentos nas condições de operação realizadas neste trabalho.

A tabela 11 compara características do experimento #1 (aço inoxidável 304), notadamente perda de massa e profundidade média de erosão (ξ), com resultados de outros trabalhos desenvolvidos em condições similares de operação.

Tabela 11. Comparação entre experimentos de erosão por cavitação

Trabalho	Perda de massa (mg)	ξ (μm)	Tempo (min)	Fluido	Temperatura (C)	Frequência (kHz)	δ (μm)	λ (mm)
M. Pohl (2002)	3,8	NI	240	Água destilada	22	20	40	0,5
Bregliozzi <i>et al.</i> (2005)	NI	4,5	900	Água	20	20	40	0,5
Garzon <i>et al.</i> (2005)	10	NI	498	Água	20	20	40	0,5
*Experimento #1	6,8	4,3	735	Água deionizada	20-25	20	43,5	0,5

* O presente trabalho; NI: Não informado.

A figura 40 compara a perda de massa medida no experimento #1 com aquela dos trabalhos de outros autores (M. Pohl e Garzon et al.).

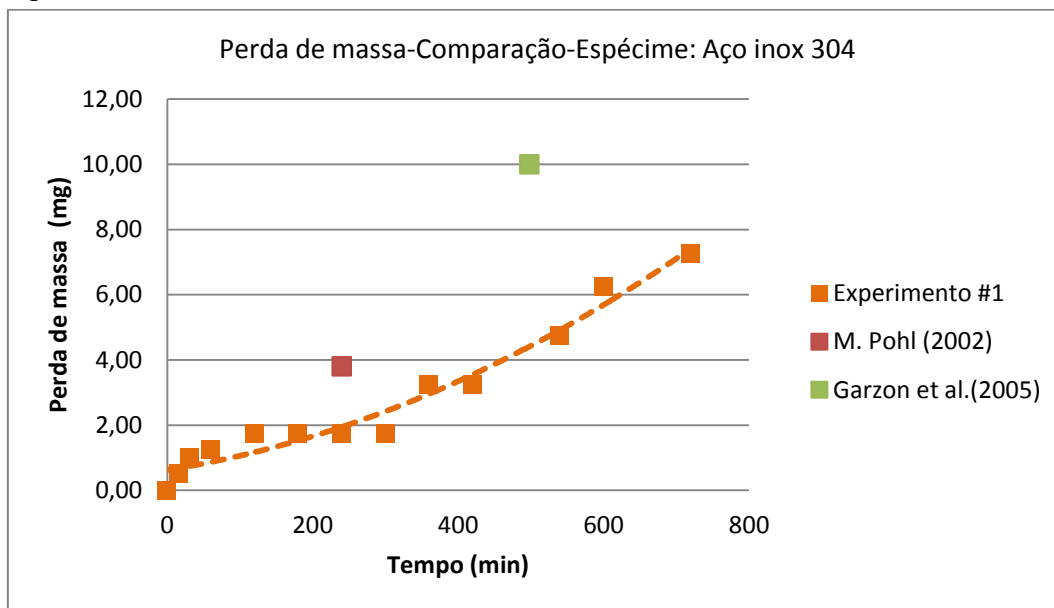


Figura 40. Perda de massa: intercomparação de resultados

Observa-se dos dados da figura 40 que para um tempo acumulado de 240 min, a perda de massa do espécime em aço inox 304 foi 117% inferior àquela reportada no trabalho de M. Pohl (2002). Já para um tempo acumulado de 498 min, os resultados do presente trabalho para a perda de massa do aço inox 304 foi 58% inferior que a reportada por Garzon et al.(2005).

Analogamente, a figura 41 compara os resultados da profundidade média de erosão obtidos neste trabalho (experimento #1) com o de Bregliozzi et al. (2005).

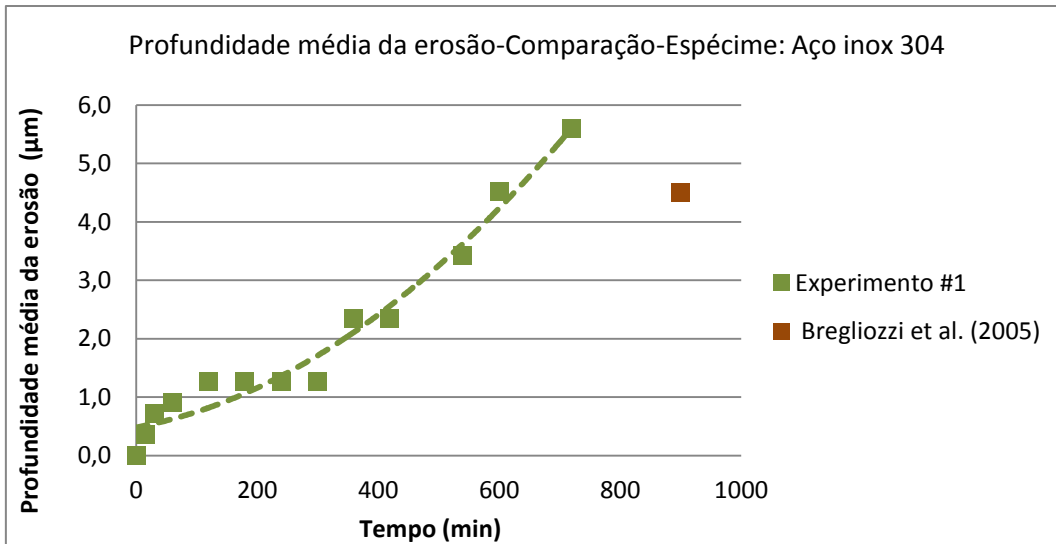


Figura 41. Profundidade média de erosão: intercomparação de resultados

Conforme pode ser observado, para um tempo acumulado de 900 min, profundidade média de erosão medida (experimento #1, aço inox 304) seria de 6,12 μm , que corresponde a um valor 32 % superior que a reportada por Bregliozzi et al. (2005).

4.2.4.5. Resistência à erosão induzida pela cavitação

Lembrando que a resistência à erosão (recíproco da taxa de profundidade média de erosão) é calculada a partir da perda de massa, a figura 42 ilustra, em *escala semilog*, o comportamento para diferentes tempos de exposição dos materiais empregados nos experimentos.

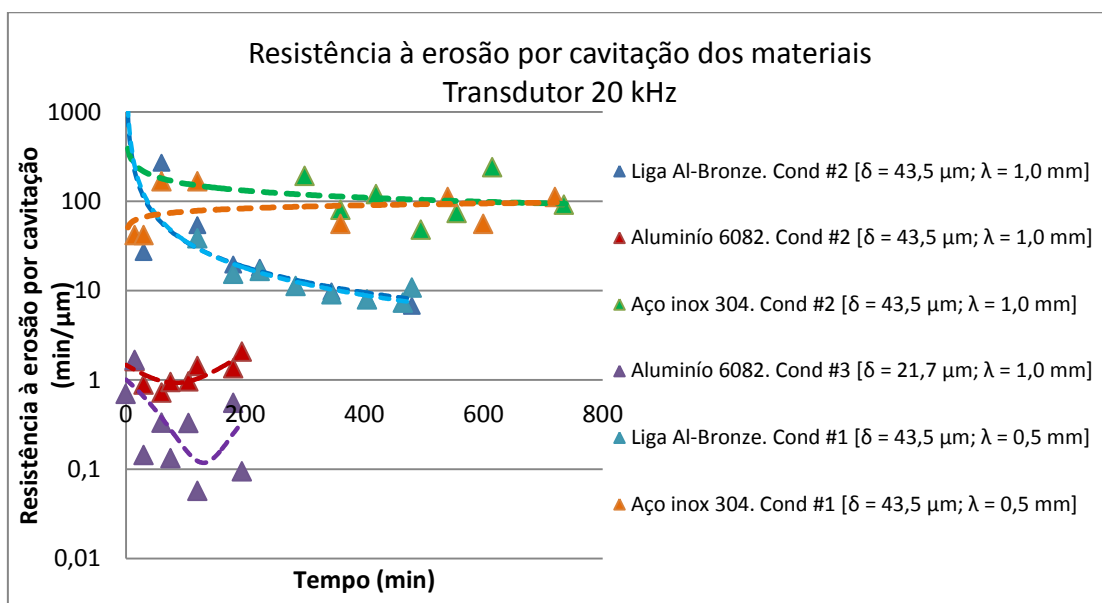


Figura 42. Resistência à erosão por cavitação dos materiais utilizados

Pelos dados dessa figura pode-se, também, observar que os materiais com maior dureza são menos suscetíveis à erosão.

4.2.4.6.

Efeito da erosão na superfície dos materiais (espécimes)

As tabelas 12 a 14 ilustram aspectos da superfície dos espécimes utilizados após serem expostos à erosão.

Tabela 12. Mudança na superfície do aço após sua exposição à erosão



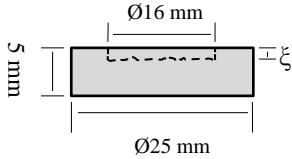
Espécime: Bloco cilíndrico construído em Aço inox 304	
<p>Espécime em aço-inox antes de ser submetido à erosão</p>  <p>$m_{inicial} = 19491,0 \text{ mg}$ (na Condição #1)</p> <p>$m_{inicial} = 19483,5 \text{ mg}$ (na Condição #2)</p>	<p>Após submissão à erosão</p> <p>Condição #1 [$\delta = 43,5 \text{ }\mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$]</p>   <p>$t = 720 \text{ min}$, $\Delta m = 7,5 \text{ mg}$</p> <p>$\xi = 5,60 \text{ }\mu\text{m}$</p>

Tabela 13. Mudança na superfície da Liga após sua exposição à erosão


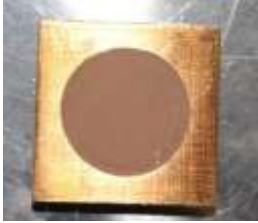
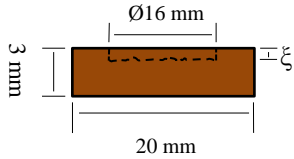

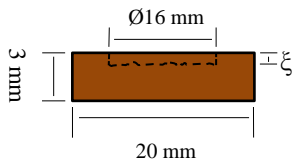


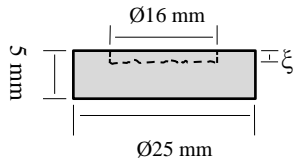

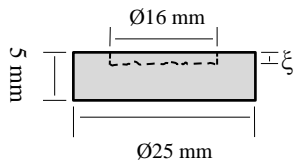
Espécime: Bloco paralelepípedo construído em Liga Al-Bronze	
<p>Espécime em liga Al-bronze antes de ser submetido à erosão</p>  <p>$m_{inicial} = 10681,0 \text{ mg}$ (na Condição #1) $m_{inicial} = 10644,5 \text{ mg}$ (na Condição #2)</p>	<p>Após submissão à erosão</p> <p>Condição #1 [$\delta = 43,5 \text{ } \mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$]</p>   <p>$t = 480 \text{ min}$, $\Delta m = 67,0 \text{ mg}$ $\xi = 37,44 \text{ } \mu\text{m}$</p>
	<p>Após submissão à erosão</p> <p>Condição #2 [$\delta = 43,5 \text{ } \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]</p>   <p>$t = 480 \text{ min}$, $\Delta m = 66,0 \text{ mg}$ $\xi = 36,38 \text{ } \mu\text{m}$</p>

Tabela 14. Mudança na superfície do Al após sua exposição à erosão

Espécime: Bloco cilíndrico construído em Alumínio 6082	
<p>Espécime em alumínio antes de ser submetido à erosão</p>  <p>$m_{inicial} = 6699,0 \text{ mg}$ (na Condição #2) $m_{inicial} = 6597,6 \text{ mg}$ (na Condição #3)</p>	<p>Após submissão à erosão</p> <p>Condição #2 [$\delta = 43,5 \text{ }\mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]</p>   <p>$t = 195 \text{ min}$, $\Delta m = 101,4 \text{ mg}$ $\xi = 178,09 \text{ }\mu\text{m}$</p>
	<p>Após submissão à erosão</p> <p>Condição #3 [$\delta = 21,7 \text{ }\mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]</p>   <p>$t = 225 \text{ min}$, $\Delta m = 28,9 \text{ mg}$ $\xi = 52,74 \text{ }\mu\text{m}$</p>

As imagens acima permitem observar características da superfície do espécime após a erosão para as diferentes condições de experimentos realizados. Para entender o impacto da erosão no acabamento da superfície, a figura 43, a seguir, ilustra a distribuição espacial das bolhas resultantes da cavitação, que são responsáveis pelo mecanismo de erosão. Conforme ilustrado, esta distribuição

especial das bolhas depende do afastamento da haste do transdutor (*gap*) em relação à superfície do espécime submetido à erosão.



Figura 43. Distribuição espacial das bolhas em função de λ

Observa-se que para um afastamento $\lambda = 0,5$ mm, as bolhas mantêm-se circunscritas no espaço entre a haste do transdutor e o espécime, difundindo-se para as bordas à medida que λ aumenta. Para a situação $\lambda=1,0$ mm percebe-se nitidamente que as bolhas se espalham além dos limites do espécime, o que, em consequência, desgasta o material nas bordas com mais intensidade. Esse comportamento foi igualmente observado para os casos dos espécimes (aço inox e liga Al-bronze) testados com diferentes alturas da haste do transdutor (*gap*) em relação à superfície do espécime.

4.2.5. Análise com enfoque na cavitação

Para uma compreensão mais robusta do fenômeno da cavitação na presença da erosão, as medições da cavitação (*output* do CaviMeter) a que se referem os seis experimentos realizados nas 3 condições descritas na seção anterior serão analisados com base no teste estatístico Qui-Quadrado para se avaliar a uniformidade dos resultados. Esta análise foi desenvolvida para cada material do espécime utilizado, conforme a seguir descrito.

4.2.5.1. Medição da cavitação na presença do Espécime em Aço Inox

A figura 44 ilustra o nível de cavitação mensurado em cada um dos intervalos do tempo acumulado (t^*) na condição #1; i.e.: $\delta=43,45$ μm ; $\lambda=0,5$ mm.

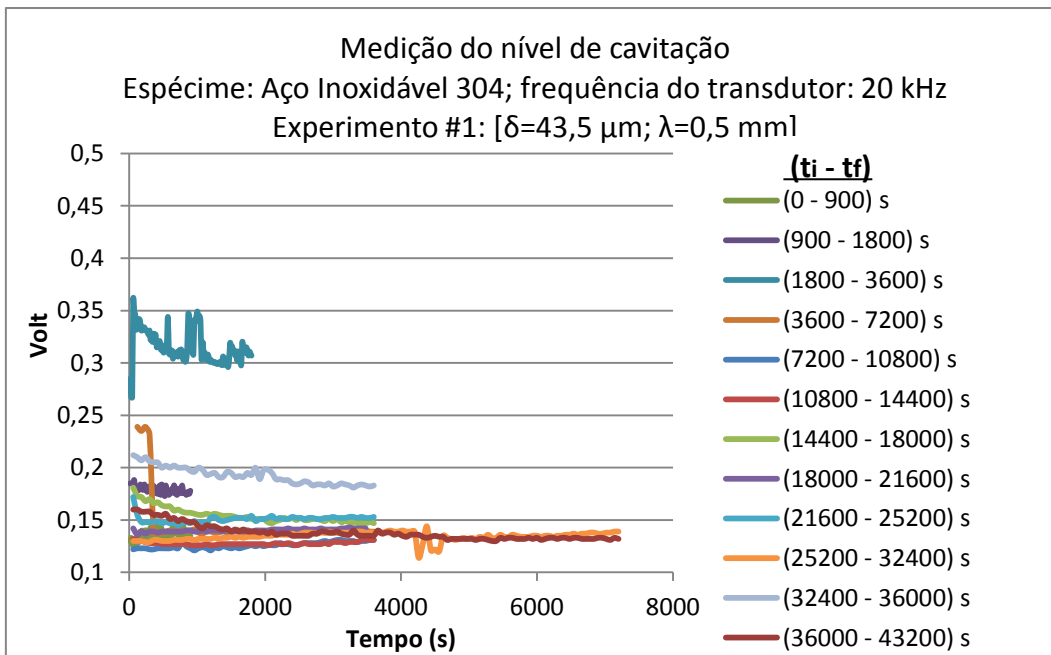


Figura 44. Nível de cavitação na Cond. #1 [$\delta=43,5 \mu\text{m}$; $\lambda=0,5 \text{ mm}$], Aço

A figura 45 ilustra o nível de cavitação mensurado em cada um dos intervalos do tempo acumulado (t^*) na condição 2; i.e.: $\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$.

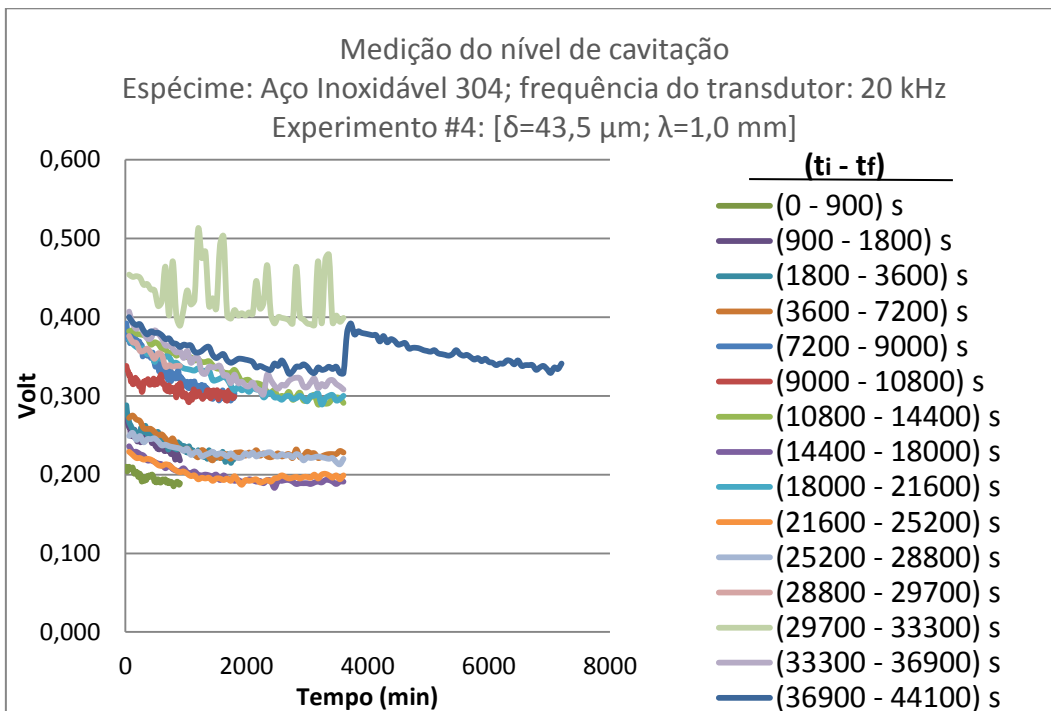


Figura 45. Nível de cavitação na Cond. #2 [$\delta=43,5 \mu\text{m}$; $\lambda=1,0 \text{ mm}$], Aço

4.2.5.2.

Medição da cavitação na presença do espécime liga Al-bronze

A figura 46 ilustra o nível de cavitação mensurado em cada um dos intervalos do tempo acumulado (t^*) na Condição #1 [$\delta=43,5 \mu\text{m}$; $\lambda=0,5 \text{ mm}$].

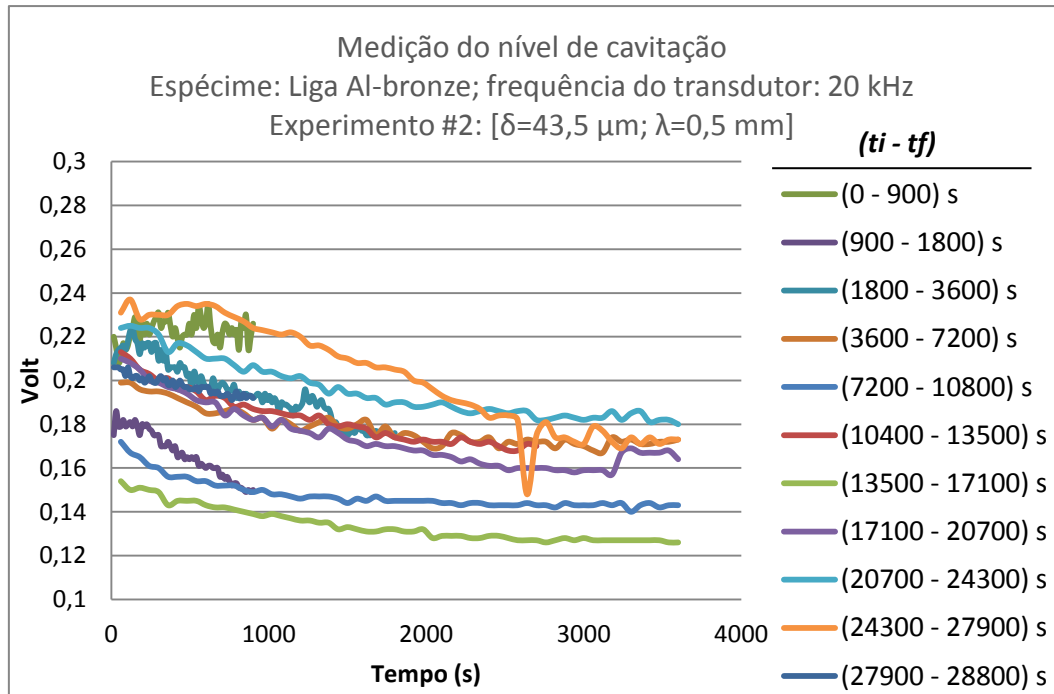


Figura 46. Nível de cavitação na Cond. #1 [$\delta=43,5 \mu\text{m}$; $\lambda=0,5 \text{ mm}$], Al-bronze

A figura 47 ilustra o nível de cavitação mensurado em cada um dos intervalos do tempo acumulado (t^*) na condição 2; i.e.: $\delta=43,5 \mu\text{m}$; $\lambda=1,0 \text{ mm}$.

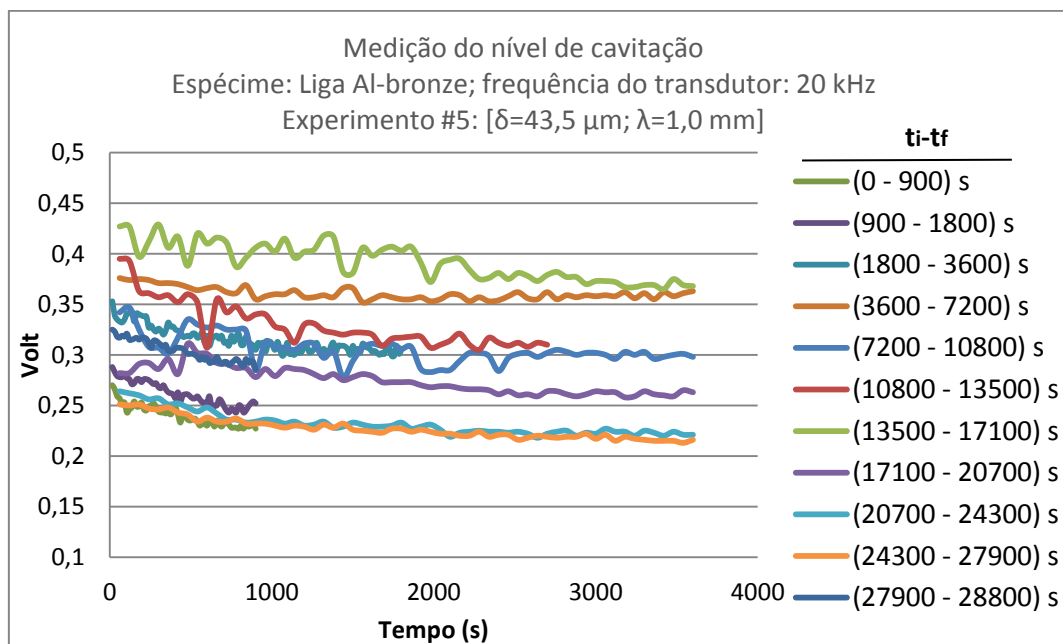


Figura 47. Nível de cavitação na Cond. #2 [$\delta=43,5 \mu\text{m}$; $\lambda=1,0 \text{ mm}$], Al-bronze

4.2.5.3.

Medição da cavitação na presença do Espécime em Alumínio

A figura 48 ilustra o nível de cavitação mensurado pelo CaviMeter nos intervalos de tempo acumulado indicados (t^*) e na Condição #2; i.e.: $\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$.

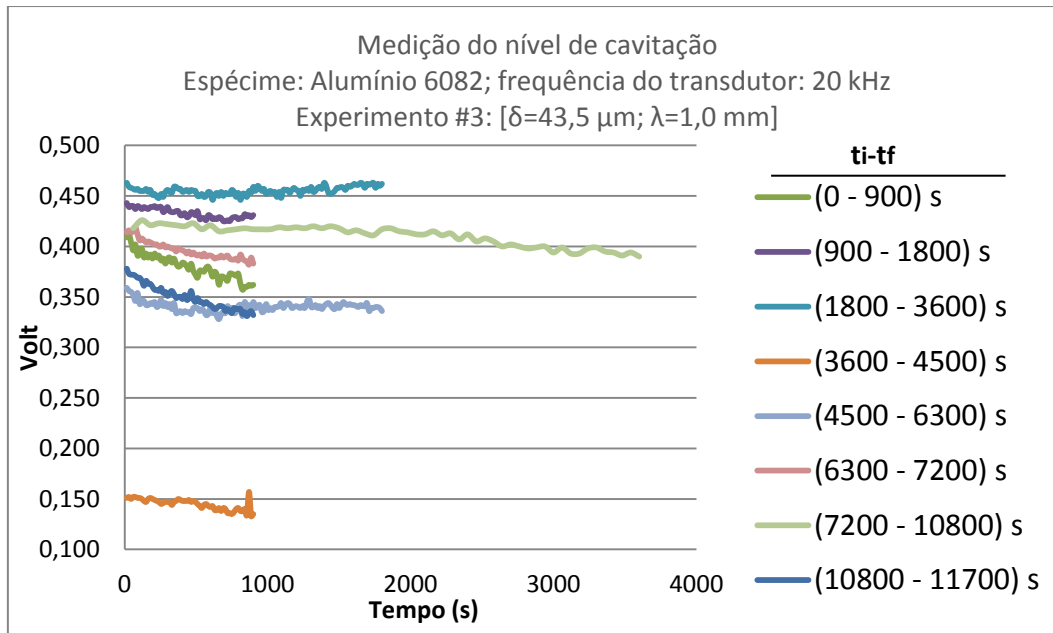


Figura 48. Nível de cavitação na Cond. #2 [$\delta=43,5 \mu\text{m}$; $\lambda=1,0 \text{ mm}$], Al

Similarmente, a figura 49 ilustra o nível de cavitação para os tempos acumulados (t^*) indicados na Condição #3 [$\delta = 21,7 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$].

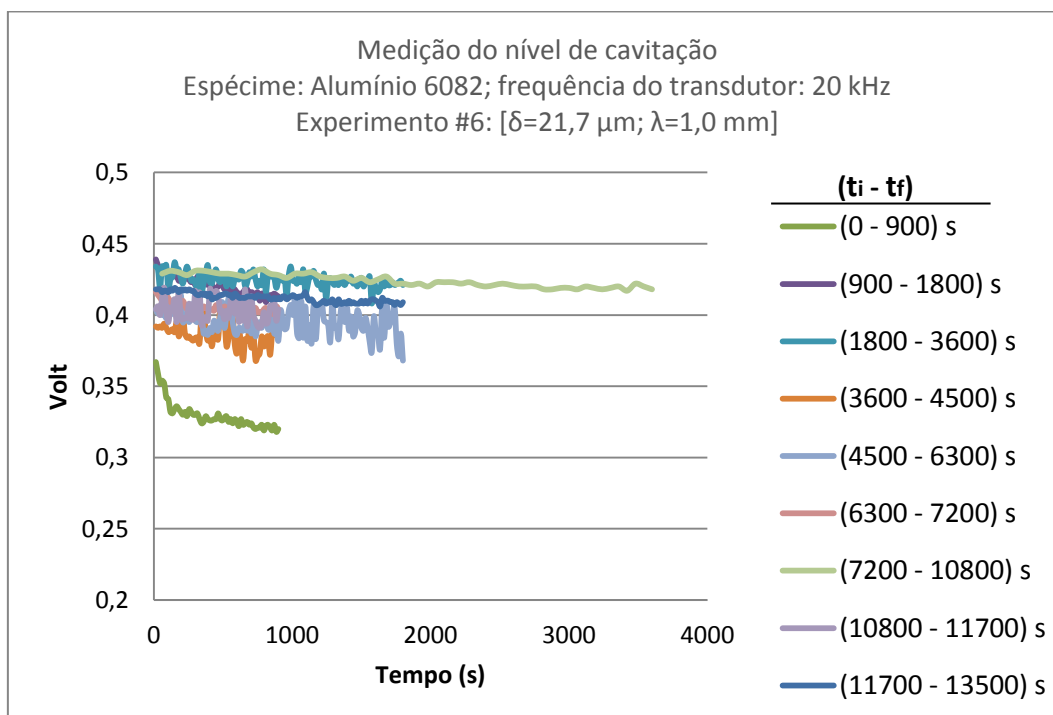


Figura 49. Nível de cavitação na Cond. #3 [$\delta=21,73 \mu\text{m}$; $\lambda=1,0 \text{ mm}$], Al

4.2.5.4.

Teste estatístico (Qui-quadrado) das medições de cavitação

O Teste Qui-quadrado permite determinar se uma série de dados segue uma distribuição padrão. Este teste foi aplicado aos resultados das medições de cavitação para avaliar se estes possuem distribuição uniforme.

A rotina de realização do teste é descrita a seguir:

- i) Separar as medições de cavitação (nível de cavitação) em **n subintervalos de frequência**.
- ii) Obter as **frequências reais do teste f_i** (quantidade de dados do nível de cavitação em cada subintervalo de frequência).
- iii) Determinar a **frequência teórica e_i** (quantidade de dados que em teoria deveriam estar contidos no subintervalo de frequência). Nota: para o caso de uma distribuição uniforme, a frequência teórica é a mesma para todos os subintervalos.
- iv) Calcular a estatística do teste Qui-quadrado (Q) pela expressão:

$$Q = \sum \frac{(f_i - e_i)^2}{e_i} \quad (4)$$

- v) Comparar o valor de Q com o **valor da tabela de qui-quadrado (X^2)**. Definida esta tabela em função dos **graus de liberdade ($n-1$)** e o **nível de confiabilidade**, a comparação segue a seguinte condição:
Se $X^2 > Q$ não se pode descartar a hipótese de que, para um determinado nível de confiabilidade, os dados seguem uma distribuição uniforme.

Para um nível de confiabilidade de 99%, têm-se as seguintes avaliações para cada material de engenharia utilizado:

- **Alumínio 6082** [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$] – dos 8 intervalos de *tempo acumulado* (t^*) do experimento, em 5 deles os dados do nível de cavitação seguem uma distribuição uniforme. Resultados ilustrados na tabela 15.

Tabela 15. Teste Qui-quadrado: Alumínio 6082 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]

Intervalo	t^* inicial	t^* final	Q	χ^2	n-1	Segue distribuição uniforme?
1	0	15	5	15,09	5	SIM
2	15	30	9,6	15,09	5	SIM
3	30	60	32,25	20,1	8	NÃO
4	60	75	22,2	15,09	5	NÃO
5	75	105	32,8	15,09	5	NÃO
6	105	120	10,17	13,28	4	SIM
7	120	180	14,6	15,09	5	SIM
8	180	195	5,2	15,09	5	SIM

- **Alumínio 6082** [$\delta = 21,7 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$] – dos 9 intervalos de *tempo acumulado* (t^*) do experimento, em 7 deles os dados do nível de cavitação seguem uma distribuição uniforme. Resultados ilustrados na tabela 16.

Tabela 16. Teste Qui-quadrado: Alumínio 6082 [$\delta = 21,7 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]

Intervalo	t^* inicial	t^* final	Q	χ^2	n-1	Segue distribuição uniforme?
1	0	15	43,83	13,28	4	NÃO
2	15	30	4,7	13,28	4	SIM
3	30	60	18,4	15,09	5	NÃO
4	60	75	11,8	15,09	5	SIM
5	75	105	9,1	15,09	5	SIM
6	105	120	11,83	13,28	4	SIM
7	120	180	7,43	16,81	6	SIM
8	180	195	7,2	16,81	6	SIM
9	195	225	18,6	20,1	8	SIM

- **Liga Alumínio-Bronze** [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$] – dos 11 intervalos de *tempo acumulado* (t^*) do experimento, em 6 deles os dados do nível de cavitação seguem uma distribuição uniforme. Resultados ilustrados na tabela 17.

Tabela 17. Teste Qui-quadrado: Liga Al-Bronze [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]

Intervalo	t^* inicial	t^* final	Q	χ^2	n-1	Segue distribuição uniforme?
1	0	15	10,83	13,28	4	SIM
2	15	30	4,4	15,09	5	SIM
3	30	60	22,22	16,81	6	NÃO
4	60	120	14,8	15,09	5	SIM
5	120	180	24,5	13,28	4	NÃO
6	180	225	12,51	11,34	3	NÃO
7	225	285	6,4	15,09	5	SIM
8	285	345	12,83	13,28	4	SIM
9	345	405	31,8	15,09	5	NÃO
10	405	465	10,6	15,09	5	SIM
11	465	480	15	13,28	4	NÃO

- **Liga alumínio-bronze** [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$] – dos 11 intervalos de *tempo acumulado* (t^*) do experimento, em 6 deles os dados do nível de cavitação seguem uma distribuição uniforme. Resultados ilustrados na tabela 18.

Tabela 18. Teste Qui-quadrado: Liga Al-Bronze [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$]

Intervalo	t^* inicial	t^* final	Q	χ^2	n-1	Segue distribuição uniforme?
1	0	15	5,73	11,34	3	SIM
2	15	30	8,6	15,09	5	SIM
3	30	60	38,33	21,7	9	NÃO
4	60	120	27,5	16,81	6	NÃO
5	120	180	18,53	11,34	3	NÃO
6	180	225	9,56	13,28	4	SIM
7	225	285	24,5	13,28	4	NÃO
8	285	345	9,5	13,28	4	SIM
9	345	405	22,8	15,09	5	NÃO
10	405	465	3,8	15,09	5	SIM
11	465	480	4,17	16,81	6	SIM

- **Aço inoxidável 304** [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$] – dos 15 intervalos de *tempo acumulado* (t^*) do experimento em 6 deles os dados do nível de cavitação seguem uma distribuição uniforme. Resultados ilustrados na tabela 19.

Tabela 19. Teste Qui-quadrado: Aço Inox 304 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]

Intervalo	t^* inicial	t^* final	Q	χ^2	n-1	Segue distribuição uniforme?
1	0	15	34,6	15,09	5	NÃO
2	15	30	7,4	15,09	5	SIM
3	30	60	28,28	16,81	6	NÃO
4	60	120	38,67	13,28	4	NÃO
5	120	150	32,55	20,1	8	NÃO
6	150	180	13	16,81	6	SIM
7	180	240	13,74	16,81	6	SIM
8	240	300	19,33	13,28	4	NÃO
9	300	360	13	15,09	5	SIM
10	360	420	27,2	15,09	5	NÃO
11	420	480	29,33	13,28	4	NÃO
12	480	495	2,33	11,34	3	SIM
13	495	555	27,17	13,28	4	NÃO
14	555	615	13,67	13,28	4	NÃO
15	615	735	14,67	18,48	7	SIM

- **Aço inoxidável 304** [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$] – dos 12 intervalos de *tempo acumulado* (t^*) do experimento, em 4 deles os dados do nível de cavitação seguem uma distribuição uniforme. Resultados ilustrados na tabela 20.

Tabela 20. Teste Qui-quadrado: Aço Inox 304 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$]

Intervalo	t^* inicial	t^* final	Q	χ^2	n-1	Segue distribuição uniforme?
1	0	15	29,8	15,09	5	NÃO
2	15	30	13,71	15,09	5	SIM
3	30	60	45,9	15,09	5	NÃO
4	60	120	58,2	16,81	6	NÃO
5	120	180	9,07	16,81	6	SIM
6	180	240	33,8	13,28	4	NÃO
7	240	300	32	15,09	5	NÃO
8	300	360	3,71	11,34	3	SIM
9	360	420	31,93	13,28	4	NÃO
10	420	540	12,47	11,34	3	NÃO
11	540	600	10,4	15,09	5	SIM
12	600	720	148,83	21,7	9	NÃO

O teste estatístico realizado mostra que os resultados da medição de cavitação (*outputs* do *CaviMeter*) possuem uma distribuição mais uniforme para matérias mais susceptíveis à erosão.

4.2.5.5. Incerteza padrão de ajuste do nível de cavitação

Embora não tenha ainda sido possível expressar as medições de cavitação em termos absolutos por meio de uma unidade SI⁸, trabalhos estão em curso para correlacionar as saídas (medidas em Volt) do Cavimeter desenvolvido pelo NPL e testado neste trabalho em unidades práticas relacionadas ao fenômeno físico da cavitação (pressão acústica, em pascal) por meio de uma curva de calibração. Dada a necessidade de se estimar as incertezas associadas aos resultados das medições de cavitação descritas neste trabalho, e tendo em vista que ainda não foi possível expressar os seus resultados em termos de uma unidade SI associada ao fenômeno da cavitação, as incertezas associadas às medições foram baseadas na análise estatística pelo método dos mínimos quadrados.

⁸ O Sistema Internacional de Unidades não possui unidade SI para a grandeza cavitação.

Assim, avaliou-se a incerteza padrão de ajuste (u_s) do nível de cavitação definida como o *menor desvio médio quadrático* entre os resultados mensurados e os ajustados dos níveis de cavitação (*saída* do CaviMeter).

Os valores ajustados do nível de cavitação foram determinados fazendo uso do polinômio de ajuste a seguir caracterizado, que relaciona o nível de cavitação (η , expressa em Volt) em função do tempo (t, expresso em segundos):

$$\eta(t_i) = C_m t_i^m + C_{m-1} t_i^{m-1} \dots + C_{m-m} t_i^{m-m} \quad (5)$$

A partir dessa equação polinomial, obtém-se o desvio médio quadrático, calculado pela seguinte equação:

$$u_s = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n [y(x_i) - y_i]^2}{n-m-1}} \quad (6)$$

Nesta equação:

$$\begin{aligned} y(x_i) &= \eta(t_i) = \text{Valor ajustado do nível de cavitação} \\ y_i &= \eta_i = \text{Valor mensurado do nível de cavitação} \\ n &= \text{Quantidade de dados} \\ m &= \text{Grau do polinômio de ajuste} \end{aligned}$$

Com o propósito de determinar o polinômio de ajuste que gera o *menor desvio médio quadrático*, a Equação (5) foi resolvida para diferentes valores dos coeficientes que expressam o grau (1, 2, 3 e 4) do polinômio. Esses coeficientes foram obtidos pelo método dos mínimos quadrados.

No anexo é ilustrado o passo-a-passo do método dos mínimos quadrados aplicado ao intervalo de tempo acumulado ($t^* = 15 \text{ min} - 30 \text{ min}$) do experimento #1 (Material: Aço inox 304; na Condição: $\delta = 43,5 \text{ } \mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$). Analogamente, esse passo-a-passo foi aplicado para cada intervalo de tempo acumulado (t^*) relativo aos seis experimentos realizados.

As figuras 50-55 ilustram o valor da incerteza padrão de ajuste (u_s) associado ao nível de cavitação calculado para os experimentos realizados (erosão induzida pela cavitação).

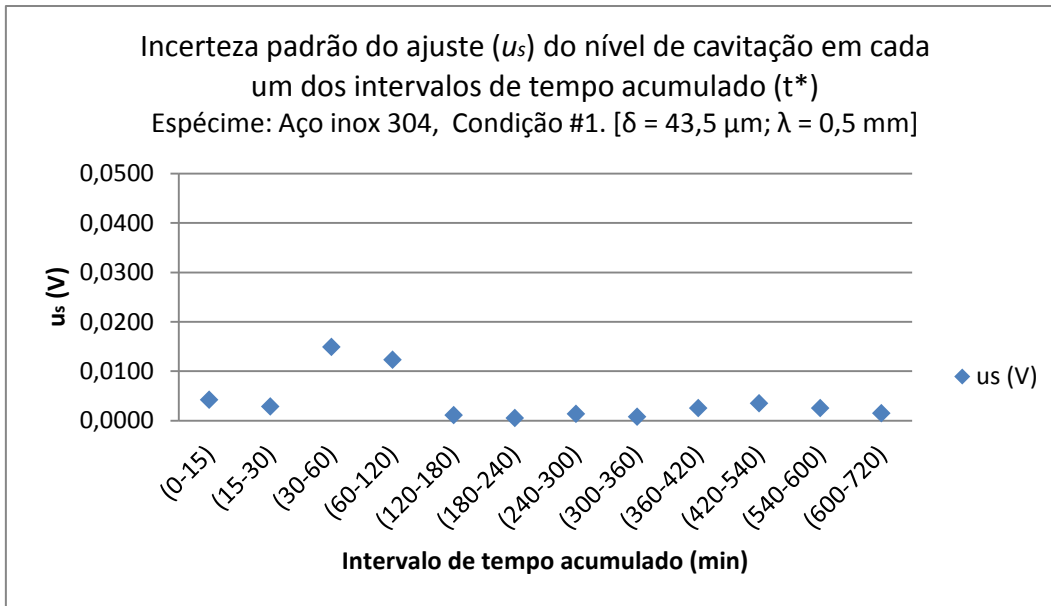


Figura 50. Incerteza u_s associada ao nível de cavitação [Aço; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$]

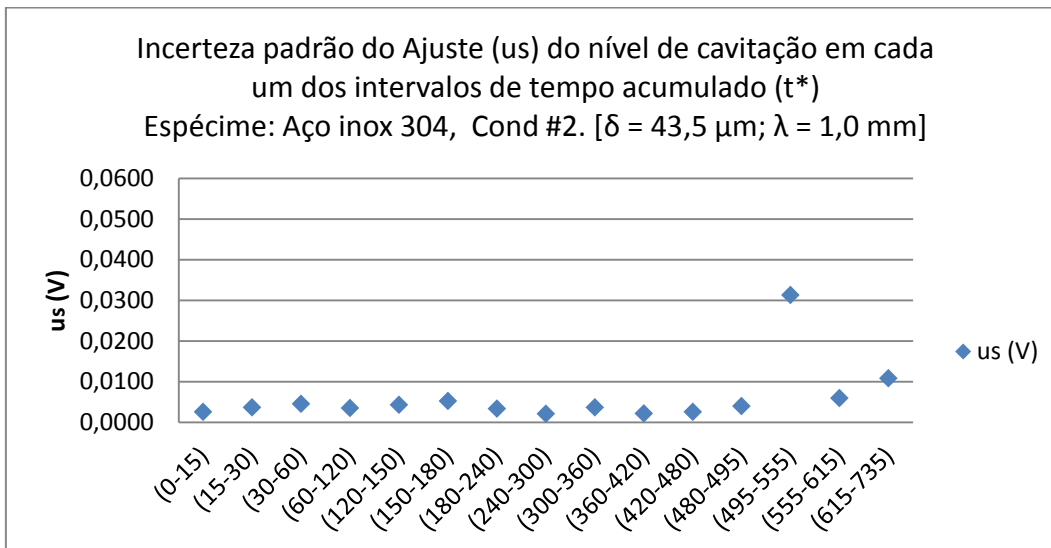


Figura 51. Incerteza u_s associada à cavitação [Aço; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]

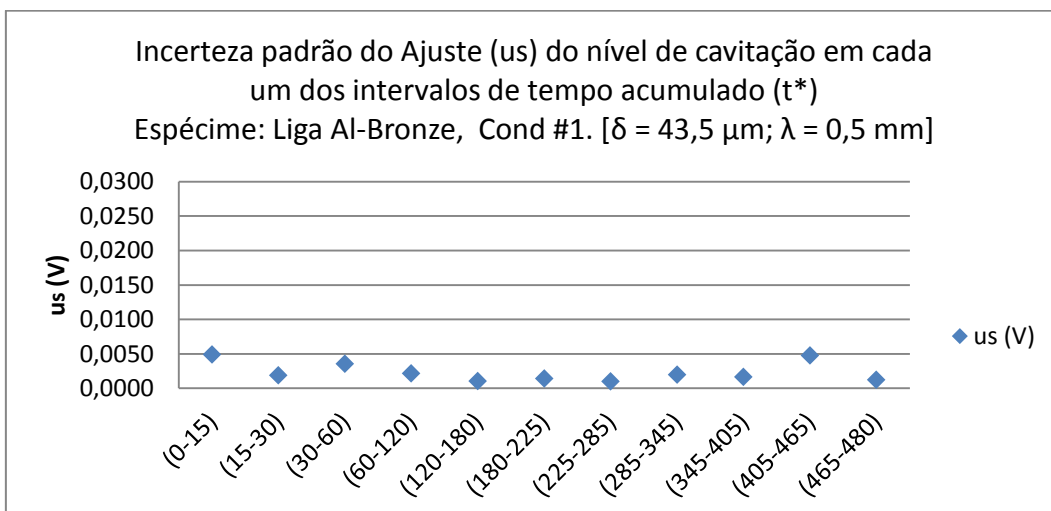


Figure 52. Incerteza u_s associada à cavitação [Al-bronze; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$]

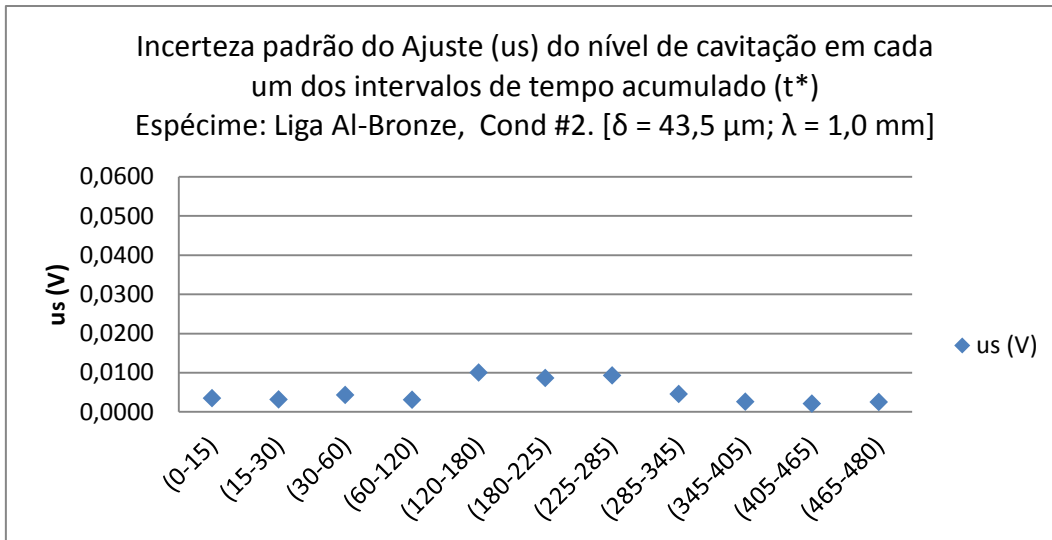


Figura 52. Incerteza u_s , associada à cavitação [Al-bronze; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$]

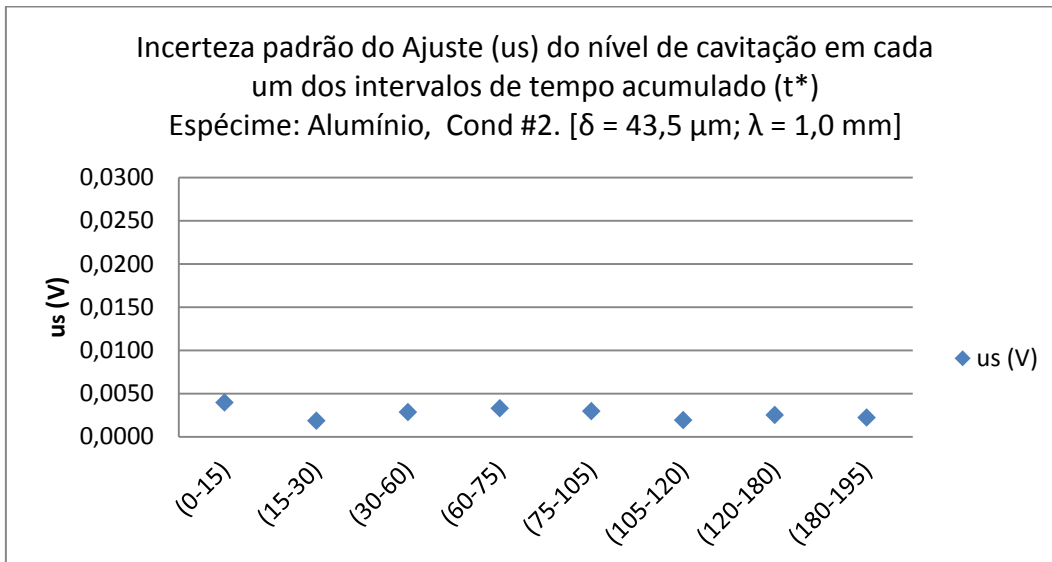


Figura 53. Incerteza u_s , associada à cavitação [Alumínio; $\delta = 43,5 \mu\text{m}$]

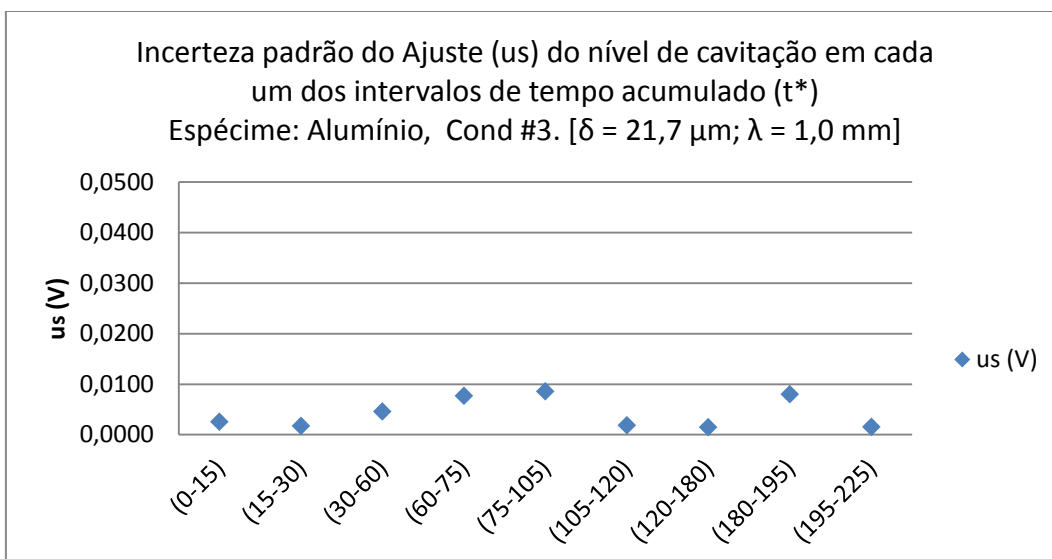


Figura 54. Incerteza u_s , associada à cavitação [Alumínio; $\delta = 21,7 \mu\text{m}$]

Os resultados da análise estatística ilustrada nas figuras 50 a 55 mostram que, exceto para o valor 0,03 V que ocorreu para o espécime em aço na Condição #2 [$\delta=43,5 \mu\text{m}$; $\lambda=1,0 \text{ mm}$] (provavelmente um candidato a valor *outlier*), a maior incerteza padrão de ajuste (u_s) calculada foi de 0,020 V, independentemente do material do espécime testado e das condições do experimento.

4.2.5.6.

Interação cavitação-material do espécime: considerações finais

A figura 56 ilustra a média do nível de cavitação para cada um dos experimentos realizados, enfatizando que quanto menos susceptível é o material à erosão menor é a média do nível de cavitação.

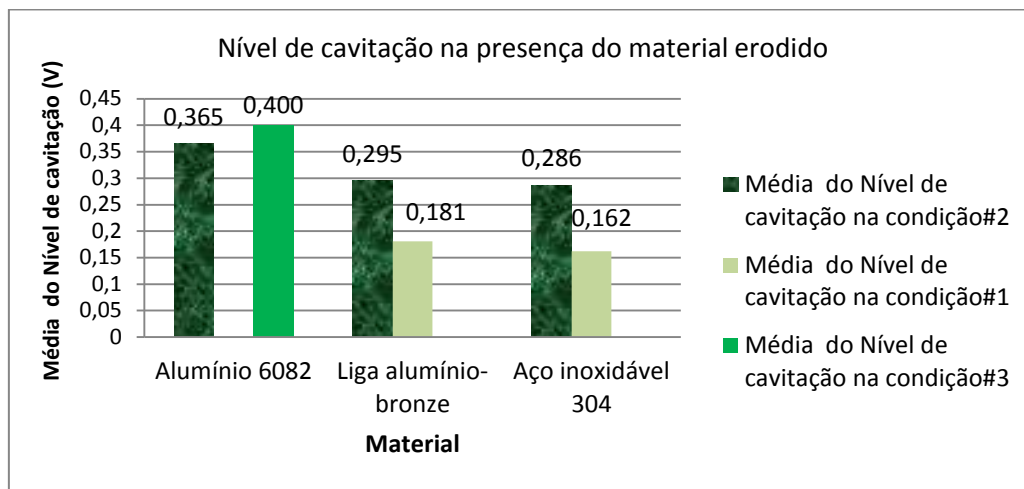


Figura 55. Média do nível de cavitação e espécime

Conforme observado pelos resultados da análise, o aço é o material menos suscetível à erosão. Tomando o espécime em aço-inox como referência para comparação, observa-se que para a Condição #1, a média do nível de cavitação ($\bar{\eta}_1$) variou 11,7% quando o material do espécime alterou-se de aço-inox para liga Al-bronze; para a Condição #2, o valor de $\bar{\eta}_2$ variou de 3,1% ou de 22%, quando o material do espécime altera-se de aço para liga Al-bronze ou de aço-inox para alumínio, respectivamente.

Com o propósito de mostrar que as médias dos níveis de cavitação não são estatisticamente iguais para um nível de confiabilidade de 95%, aplicou-se um teste por análise de variância (ANOVA), que confirmou a expectativa. O resultado da análise confirmou que para ambas as condições de operação as médias do nível de cavitação dos experimentos #1 e #2 (Condição #1) e dos experimentos #3, #4 e #5 (Condição #2) não são estatisticamente iguais.

A análise estatística ANOVA desenvolveu-se segundo o seguinte passo-a-passo:

- i) Geração de amostras de igual tamanho (N) para cada um dos conjuntos de dados a avaliar.
- ii) Cálculo da média aritmética (\bar{X}_i) e da variância (S_i^2) de cada um dos conjuntos de dados.
- iii) Cálculo do parâmetro S_a^2 com base na seguinte equação:

$$S_a^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k S_i^2 \quad (7)$$

nesta equação, k = quantidade de amostras

- iv) Agrupamento das k amostras geradas e cálculo da média aritmética (\bar{X})
- v) Cálculo do parâmetro S_x^2 a partir da seguinte equação:

$$S_x^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (\bar{X} - \bar{X}_i)^2 \quad (8)$$

- vi) Cálculo do fator f definido como:

$$f = N \frac{S_x^2}{S_a^2} \quad (9)$$

- vii) Obtenção do valor $F_{n,m}$ na tabela de Snedecor, em função de n e m :

$$n = k - 1 ; m = k(N - 1) \quad (10)$$

- viii) Se $f > F_{n,m}$ a hipótese do teste é rejeitada tendo em vista que as médias não podem ser consideradas estatisticamente iguais a um definido nível de confiabilidade.

A Tabela 21 resume os resultados da análise estatística ANOVA.

Tabela 21. Análise estatística ANOVA

Condição de operação	k	m	S_a^2 (Volt ²)	\bar{X} (Volt)	S_x^2 (Volt ²)	f	F	Conclusão da Análise
#1 (Aço e Liga)	2	598	0,0047	0,177	0,0000975	6,162	3,89	Já que $f > F$, a hipótese de que as médias são estatisticamente iguais é rejeitada.
#2 (Aço, Liga e Alumínio)	3	897	0,0316	0,310	0,0022	20,805	3,04	

N=300; Nível de confiabilidade: 95%

De acordo aos experimentos realizados consegue-se observar a influência na erosão das duas variáveis (δ , λ) de cada condição de operação. No fenômeno da erosão as mudanças na amplitude de pulsação do transdutor (δ) influenciam mais que mudanças no afastamento entre a haste do transdutor e a superfície do espécime (λ).

Incrementos do afastamento entre a haste do transdutor e a superfície do espécime (λ) geram como resultado o espalhamento das bolhas e

consequentemente a concentração da perda de massa do espécime nas bordas da superfície.

O teste Qui-quadrado permitiu avaliar a uniformidade da cavitação em todos os tempos acumulados de cada experimento de erosão induzida pela cavitação.

5 Conclusões e recomendações

5.1. Conclusões

As conclusões aqui encaminhadas foram desenvolvidas em consonância aos objetivos originalmente formulados no Capítulo 1 desta dissertação de mestrado.

5.1.1. Técnicas de medição e os fenômenos da cavitação e erosão

No que concerne o primeiro objetivo específico formulado (i.e.: contribuir para o entendimento dos fenômenos da cavitação e erosão e identificar as técnicas consagradas para a sua medição), o trabalho desenvolvido realizou o recenseamento das diferentes técnicas disponíveis de medição da cavitação e a conceituação básica do fenômeno da erosão. Dentre as poucas técnicas descritas na literatura especializada, foram identificadas duas de natureza essencialmente qualitativa (*Ceramic Ring Test* e *Aluminum Foil Test*) e duas de natureza quantitativa (*Chlorine Release Test* e *Hydrophones*).

Conforme mostrado pelos resultados dos experimentos realizados nesta pesquisa de mestrado, o CaviMeter, recentemente desenvolvido e validado pelo grupo de pesquisa do laboratório de Acústica do NPL/UK, permitiu mapear e mensurar os diferentes níveis de cavitação utilizados para induzir a erosão de materiais de engenharia utilizados na indústria. O laboratório de acústica do NPL continua trabalhando neste tema com o propósito de conseguir expressar as medições do nível de cavitação em função de uma grandeza básica (pressão acústica) que, na realidade, expressa em termos físicos o fenômeno da cavitação.

A cavitação é um fenômeno frequente em diversas situações que envolvem o uso de equipamentos na presença de fluidos, podendo gerar efeitos negativos e positivos. Exemplos bem documentados em engenharia relacionam-se à indesejável erosão gerada nos rotores de bombas e pás de turbinas hidráulicas e desgastes em tubulações de sistemas de transporte de fluidos. Exemplos

conhecidos da desejável e bem sucedida aplicação da cavitação referem-se aos dispositivos e equipamentos de limpeza utilizados em odontologia, medicina e equipamentos de mecânica de precisão. Esta dissertação, ao estudar a interação cavitação-erosão, mostrou a aplicabilidade da cavitação em processos de usinagem de materiais de engenharia.

5.1.2.

Aparato experimental e mensuração da cavitação

Com relação ao segundo objetivo específico originalmente formulado (i.e. conceber um aparato experimental em conformidade à norma ASTM G32:2010 aplicável para mensurar a cavitação indutora da erosão), a pesquisa permitiu avaliar estatisticamente a uniformidade da cavitação durante ensaios de erosão realizados com diferentes materiais de engenharia e em três condições de operação da instrumentação desenvolvida.

Em termos das variáveis δ (amplitude de pulsação do transdutor) e λ (afastamento do transdutor respeito à superfície do espécime), o estudo ilustrou de maneira quantitativa a influência que resulta de mudanças na montagem do aparato experimental, a seguir quantificadas. Para os valores de δ estudados ($\delta = 43,7 \mu\text{m}$ e $\delta = 21,7 \mu\text{m}$) os resultados dos experimentos mostraram que essa variação no parâmetro δ impacta 71,4% na perda de massa do espécime construído em alumínio. Já o efeito do parâmetro λ foi testado para dois materiais distintos (liga Al-bronze e o Aço inox 304), ambos para dois valores de λ ($\lambda = 0,5 \text{ mm}$ e $\lambda = 1,0 \text{ mm}$), produzindo, respectivamente, um impacto na perda de massa de 6,2% e 1,5%. Com base nestes resultados foi possível concluir que o parâmetro δ é mais impactante que o parâmetro λ na perda de massa do material submetido à erosão.

5.1.3.

Comportamento da erosão induzida por cavitação

Relativamente ao objetivo específico #3 (i.e.: avaliar e caracterizar o fenômeno da erosão por cavitação imposta por diferentes materiais de engenharia), os experimentos associados à erosão pela cavitação dos materiais de engenharia estudados (Alumínio 6082, Liga Al-Bronze, Aço inox 304) permitiram caracterizar efeitos provocados pelo fenômeno da erosão; dentre estes, a perda de massa, taxa de erosão, profundidade média de desgaste do material, resistência à

ao desgaste e o aspecto da superfície dos espécimes estudados após suas exposições à erosão propriamente dita.

Em sintonia com a intuição de engenharia, esses resultados da pesquisa permitiram concluir que os materiais que possuem menor dureza são mais suscetíveis à erosão induzida pela cavitação. Tendo como referência os resultados dos experimentos realizados na Condição de Operação #2 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$] foi possível confirmar e quantificar essa intuição; ou seja: o espécime construído em alumínio perdeu 101,38 mg de massa; o espécime em liga Alumínio-bronze sofreu 66 mg em sua massa, enquanto o espécime em aço inox 304 teve sua massa reduzida de 6,8 mg.

5.1.4.

Relação entre a erosão de materiais de engenharia e a cavitação

Os resultados dos seis experimentos envolvendo três materiais de engenharia realizados nas três condições de operação da instrumentação foram tratados pelo teste estatístico Qui-quadrado para responder à questão refletida no objetivo específico #4 (i.e.: correlacionar a erosão dos materiais de engenharia e a cavitação indutora desse processo para diferentes montagens do transdutor indutor da cavitação e diferentes materiais dos materiais de engenharia estudados). Tomando como referência a análise estatística aplicada aos experimentos realizados na Condição de Operação #2 [$\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 1,0 \text{ mm}$], a análise mostrou que o nível de cavitação manteve-se uniforme em 5 de 8 intervalos de *tempo acumulado* (t^*) para o caso do espécime em Alumínio; 6 de 11 intervalos de t^* para o caso do espécime em liga Al-bronze e em 6 de 15 intervalos de *tempo acumulado* (t^*) para o caso do espécime em Aço inox 304. Os resultados consignados nos testes estatísticos (seção 4.2.5.4) confirmam que quanto maior a resistência do material à erosão menor será a uniformidade da cavitação.

Consolidando, assim, as conclusões formuladas para os quatro objetivos elencados foi possível então confirmar os objetivos centrais formulados: (i) determinar o desgaste de diferentes materiais de engenharia e (ii) avaliar o comportamento da cavitação durante o processo de erosão à luz dos preceitos da norma ASTM G32:2010 aplicável à erosão de materiais de engenharia.

Resultados parciais desta dissertação foram submetidos para apresentação na edição 44 do UIA 2015 (Ibanez, I. et al. 2014).

5.2. Recomendações para desdobramentos do trabalho

A experiência vivenciada no curso de desenvolvimento desta pesquisa alertou para alguns desenvolvimentos que possam contribuir para avançar o conhecimento sobre cavitação como agente indutor de erosão. Dentre as reflexões amadurecidas pelo trabalho encaminham-se as seguintes sugestões para desdobramentos futuros deste trabalho:

- Automatizar os experimentos para reduzir erros e aperfeiçoar o processo de aquisição de dados pelo uso de um software estruturado de automação do experimento para processamento das *saídas* do Cavimeter.
- Racionalizar a operação de inspeção do espécime e da mensuração da perda de massa, sem a necessidade de remoção do espécime que opera mergulhado no reservatório do fluido indutor da cavitação.
- Criar novas condições de operação do equipamento pelo aumento da amplitude de pulsação do transdutor (δ) e afastamento do transdutor e a superfície do espécime (λ).
- Propor experimento para expressar os resultados da medição de cavitação em termos do princípio básico associado ao fenômeno da cavitação propriamente dito. Destaca-se, aqui, que o PósMQI aceitou o convite do NPL para dar continuidade aos esforços de pesquisa em desenvolvimento que visam desenvolver uma fonte geradora de ondas acústicas cilíndricas cuja amplitude possa ser medida por um hidrofone calibrado utilizado como padrão de ondas acústicas. Acredita-se que, com o transdutor cilíndrico posicionado no centro da cavidade (ponto padrão de referência) do sensor de cavitação (ver Fig. 19, Capítulo 4) seja possível realizar uma curva de calibração que correlacione a resposta do CaviMeter (expressa em Volt) com a pressão acústica (expressa em pascal).
- Desenvolver um procedimento para expressar a incerteza associada à medição de cavitação em conformidade aos fundamentos básicos preconizados pelo Guia de incerteza de medição (GUM: 2008).
- Concluir o processo de certificação e comercialização do CaviMeter.

Referências bibliográficas

ATCHLEY, A. et al. THRESHOLDS FOR CAVITATION PRODUCED IN WATER BY PULSED ULTRASOUND. **Ultrasonics**, v. 26, n. 5, p. 280-285, SEP 1988 1988. ISSN 0041-624X.

BREGLIOZZI, G. et al. Cavitation wear behaviour of austenitic stainless steels with different grain sizes. **Wear**, v. 258, n. 1-4, p. 503-510, JAN 2005 2005. ISSN 0043-1648.

CHOI, J.; JAYAPRAKASH, A.; CHAHINE, G. Scaling of cavitation erosion progression with cavitation intensity and cavitation source. **Wear**, v. 278, p. 53-61, MAR 8 2012 2012. ISSN 0043-1648.

DA SILVA, F. et al. Cavitation erosion behavior of ion-nitrided 34 CrAlNi 7 steel with different microstructures. **Wear**, v. 304, n. 1-2, p. 183-190, JUL 15 2013 2013. ISSN 0043-1648.

ESCOBAR, J. et al. Improvement of cavitation erosion resistance of a duplex stainless steel through friction stir processing (FSP). **Wear**, v. 297, n. 1-2, p. 998-1005, JAN 15 2013 2013. ISSN 0043-1648.

ESPITIA, L.; TORO, A. Cavitation resistance, microstructure and surface topography of materials used for hydraulic components. **Tribology International**, v. 43, n. 11, p. 2037-2045, NOV 2010 2010. ISSN 0301-679X.

ESPITIA, L. et al. Cavitation erosion resistance of low temperature plasma nitrided martensitic stainless steel. **Wear**, v. 301, n. 1-2, p. 449-456, APR-MAY 2013 2013. ISSN 0043-1648.

FRANC, J.-P. **Physics and Control of Cavitation**. France: NATO OTAN 2006.

GARZON, C. et al. Cavitation erosion resistance of a high temperature gas nitrided duplex stainless steel in substitute ocean water. **Wear**, v. 259, n. 1-6, p. 145-153, JUL-AUG 2005 2005. ISSN 0043-1648.

HANKE, S. et al. Cavitation erosion of Cr60Ni40 coatings generated by friction surfacing. **Wear**, v. 301, n. 1-2, p. 415-423, APR-MAY 2013 2013. ISSN 0043-1648.

HATTORI, S.; ISHIKURA, R.; ZHANG, Q. Construction of database on cavitation erosion and analyses of carbon steel data. **Wear**, v. 257, n. 9-10, p. 1022-1029, NOV 2004 2004. ISSN 0043-1648.

HATTORI, S. et al. Formation and progression of cavitation erosion surface for long exposure. **Wear**, v. 265, n. 11-12, p. 1619-1625, NOV 26 2008 2008. ISSN 0043-1648.

HIRAGA, H. et al. Cavitation erosion mechanism of NiTi coatings made by laser plasma hybrid spraying. **Wear**, v. 231, n. 2, p. 272-278, JUL 1999 1999. ISSN 0043-1648.

HODNETT, M. **Characterisation of industrial high power ultrasound fields using the NPL Cavitation Sensor** UIA Symposium. San Diego 2006.

_____. **Measuring Cavitation in Ultrasonic Cleaners and Processors**. U.K.: National Physical Laboratory 2011.

HUANG, W.; CHEN, K.; HE, J. A study on the cavitation resistance of ion-nitrided steel. **Wear**, v. 252, n. 5-6, p. 459-466, MAR 2002 2002. ISSN 0043-1648.

IBANEZ, I. et al. **Correlating inertial acoustic cavitation emissions with material erosion resistance**. UIA Symposium. Washington 2014.

JAFARZADEH, K.; VALEFI, Z.; GHAVIDEL, B. The effect of plasma spray parameters on the cavitation erosion of Al₂O₃-TiO₂ coatings. **Surface & Coatings Technology**, v. 205, n. 7, p. 1850-1855, DEC 25 2010 2010. ISSN 0257-8972.

KING, D. C. **Sonochemical analysis of the output of ultrasonic dental descalers** 2010. 156 (Doctor of Philosophy). Chemistry, University of Bath

KWOK, C.; CHENG, F.; MAN, H. Synergistic effect of cavitation erosion and corrosion of various engineering alloys in 3.5% NaCl solution. **Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing**, v. 290, n. 1-2, p. 145-154, OCT 15 2000 2000. ISSN 0921-5093.

LAMPKE, T. et al. Cavitation erosion of electroplated nickel composite coatings. **Surface & Coatings Technology**, v. 202, n. 16, p. 3967-3974, MAY 15 2008 2008. ISSN 0257-8972.

LAUTERBORN, W. **Cavitation and Inhomogeneities in Underwater Acoustics**: Springer Verlag. 1980.

LIN, C. J.; CHEN, K. C.; HE, J. L. **The cavitation erosion behavior of electroless Ni-P-SiC composite coating**. Department of Materials Science and Engineering, Feng Chia University: Wear 261 2006.

LIU, S. CHLORINE-RELEASE TEST FOR CAVITATION-ACTIVITY MEASUREMENTS. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 38, n. 5, p. 817-&, 1965 1965. ISSN 0001-4966.

LO, K. et al. Improvement of cavitation erosion resistance of AISI 316 stainless steel by laser surface alloying using fine WC powder. **Surface & Coatings Technology**, v. 165, n. 3, p. 258-267, FEB 17 2003 2003. ISSN 0257-8972.

M. POHL, J. S. **Quantitative CLSM roughness study on early cavitation-erosion damage**. Germany: *Wear* 252: 501–511 p. 2002.

MAN, H. et al. Cavitation erosion behavior of laser gas nitrided Ti and Ti6Al4V alloy. **Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing**, v. 355, n. 1-2, p. 167-173, AUG 25 2003 2003. ISSN 0921-5093.

MANN, B. Water Droplet and Cavitation Erosion Behavior of Laser-Treated Stainless Steel and Titanium Alloy: Their Similarities. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 22, n. 12, p. 3647-3656, DEC 2013 2013. ISSN 1059-9495.

MÂNZÂNĂ, M.-E. et al. **CONCERNING THE DAMAGE OF STAINLESS STEELS BY CAVITATION EROSION** University POLITEHNICA of Bucharest, Romania U.P.B. Sci. Bull 2012.

NOUR, W. et al. The effect of surface finish and cavitating liquid on the cavitation erosion of alumina and silicon carbide ceramics. **Ceramics-Silikaty**, v. 51, n. 1, p. 30-39, 2007 2007. ISSN 0862-5468.

PERKINS, J. P. **POWER ULTRASONIC EQUIPMENT - PRACTICE AND APPLICATION** Warwick University, UK: Sonochemistry Symposium, Annual Chemical Congress.

PFLITSCH, C. et al. Wear properties of MOCVD-grown aluminium oxide films studied by cavitation erosion experiments. **Surface & Coatings Technology**, v. 201, n. 22-23, p. 9299-9303, SEP 25 2007 2007. ISSN 0257-8972.

ROMO, S. et al. Cavitation and high-velocity slurry erosion resistance of welded Stellite 6 alloy. **Tribology International**, v. 47, p. 16-24, MAR 2012 2012. ISSN 0301-679X.

SANTA, J. et al. Cavitation erosion of martensitic and austenitic stainless steel welded coatings. **Wear**, v. 271, n. 9-10, p. 1445-1453, JUL 29 2011 2011. ISSN 0043-1648.

_____. Slurry and cavitation erosion resistance of thermal spray coatings. **Wear**, v. 267, n. 1-4, p. 160-167, JUN 15 2009 2009. ISSN 0043-1648.

SHIH-PING. **Chlorine-Release Test for Cavitation Measurements**: J. Acoust. Soc. Am. 1964.

Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus ASTM: 20 p. ASTM G32, 2010.

Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets ASTM: 6 p. ASTM G76, 2013.

TAT, K. C. **laser Surface Modification of Stainless Steels for Cavitation Erosion Resistance** 1998. 417 (Doctor of Philosophy). Department of Applied Physics, Hong Kong Polytechnic University

TIONG, T. J. **Sonochemical and ultrasonic output analyses on dental endosonic instruments**. 2012. 278 (Doctor of philosophy). Chemistry, University of Bath

WU, S.; LIN, H.; YEH, C. A comparison of the cavitation erosion resistance of TiNi alloys, SUS304 stainless steel and Ni-based self-fluxing alloy. **Wear**, v. 244, n. 1-2, p. 85-93, SEP 2000 2000. ISSN 0043-1648.

Anexo: Método dos mínimos quadrados

A seguir descreve-se o passo-a-passo dos mínimos quadrados aplicado com o propósito de determinar o polinômio de ajuste que minimiza o desvio médio quadrático do nível de cavitação no intervalo de tempo acumulado ($t^* = 15 \text{ min} - 30 \text{ min}$) do experimento #1 (Material: Aço inox 304; na Condição #1; i.e.: $\delta = 43,5 \mu\text{m}$; $\lambda = 0,5 \text{ mm}$).

Passo-a-passo:

1. Agrupar os dados do nível de cavitação mensurados em função do tempo, conforme documentado na tabela 22:

Tabela 22. Nível de Cavitação mensurado

Tempo (s)	Nível de cavitação (V)	Tempo (s)	Nível de cavitação (V)	Tempo (s)	Nível de cavitação (V)	Tempo (s)	Nível de cavitação (V)
15	185	240	179	465	174	690	175
30	185	255	179	480	184	705	174
45	185	270	177	495	176	720	176
60	186	285	182	510	177	735	180
75	188	300	178	525	173	750	177
90	179	315	177	540	183	765	176
105	181	330	177	555	175	780	183
120	178	345	183	570	176	795	176
135	179	360	182	585	174	810	176
150	179	375	176	600	176	825	176
165	184	390	181	615	177	840	174
180	180	405	176	630	180	855	176
195	179	420	175	645	176	870	177
210	179	435	176	660	183	885	175
225	184	450	183	675	180	900	178

2. Determinar os coeficientes da matriz de mínimos quadrados, mostrados na Tabela 23:

Tabela 23. Coeficientes da matriz de mínimos quadrados

	1	2	3	4	5	
1	60	27450,00	16607250	1,1303E+10	8,20489E+12	10725
2	27450,00	16607250,00	11302537500	8,2049E+12	6,20425E+15	4875930
3	16607250,00	11302537500,00	8,20489E+12	6,2042E+15	4,82536E+18	2943590400
4	11302537500,00	8204894898750,00	6,20425E+15	4,8254E+18	3,83102E+21	2,00121E+12
5	8204894898750,00	6204245397187500,00	4,82536E+18	3,831E+21	3,0898E+24	1,45178E+15

3. Obter os coeficientes C_0, C_1, C_2, C_3, C_4 de ajuste do grau do polinômio correspondente, mostrado na Tabela 24:

Tabela 24. Coeficientes dos polinômios de ajuste

	Grau 1	Grau 2	Grau 3	Grau 4
C ₀	182,2254237	184,295412	185,8674316	186,413742
C ₁	-0,007596555	-0,020951318	-0,040754245	-0,05187055
C ₂		1,45954E-05	0,00006826	0,00012188
C ₃			-3,9098E-08	-1,2975E-07
C ₄				4,9537E-11

4. Calcular o nível de cavitação ajustado para cada um dos polinômios de ajuste, mostrado na tabela 25:

Tabela 25. Nível de cavitação ajustado

Tempo (s)	Nível de cavitação Ajustado (V)				Tempo (s)	Nível de cavitação Ajustado (V)			
	Grau 1	Grau 2	Grau 3	Grau 4		Grau 1	Grau 2	Grau 3	Grau 4
15	182,1	184	185,3	185,7	465	178,7	177,7	177,7	177,9
30	182	183,7	184,7	185	480	178,6	177,6	177,7	177,9
45	181,9	183,4	184,2	184,3	495	178,5	177,5	177,7	177,8
60	181,8	183,1	183,7	183,7	510	178,4	177,4	177,7	177,8
75	181,7	182,8	183,2	183,2	525	178,2	177,3	177,6	177,8
90	181,5	182,5	182,7	182,6	540	178,1	177,2	177,6	177,7
105	181,4	182,3	182,3	182,2	555	178	177,2	177,6	177,7
120	181,3	182	181,9	181,7	570	177,9	177,1	177,6	177,6
135	181,2	181,7	181,5	181,3	585	177,8	177	177,6	177,6
150	181,1	181,5	181,2	181	600	177,7	177	177,5	177,6
165	181	181,2	180,8	180,6	615	177,6	176,9	177,5	177,5
180	180,9	181	180,5	180,3	630	177,4	176,9	177,5	177,5
195	180,7	180,8	180,2	180	645	177,3	176,9	177,5	177,4
210	180,6	180,5	180	179,8	660	177,2	176,8	177,5	177,4
225	180,5	180,3	179,7	179,6	675	177,1	176,8	177,4	177,3
240	180,4	180,1	179,5	179,4	690	177	176,8	177,4	177,3
255	180,3	179,9	179,3	179,2	705	176,9	176,8	177,4	177,2
270	180,2	179,7	179,1	179	720	176,8	176,8	177,3	177,1
285	180,1	179,5	178,9	178,9	735	176,6	176,8	177,3	177,1
300	179,9	179,3	178,7	178,7	750	176,5	176,8	177,2	177
315	179,8	179,1	178,6	178,6	765	176,4	176,8	177,1	176,9
330	179,7	179	178,4	178,5	780	176,3	176,8	177,1	176,9
345	179,6	178,8	178,3	178,4	795	176,2	176,9	177	176,8
360	179,5	178,6	178,2	178,3	810	176,1	176,9	176,9	176,7
375	179,4	178,5	178,1	178,2	825	176	176,9	176,7	176,7
390	179,3	178,3	178	178,2	840	175,8	177	176,6	176,6
405	179,1	178,2	178	178,1	855	175,7	177,1	176,5	176,5
420	179	178,1	177,9	178,1	870	175,6	177,1	176,3	176,5
435	178,9	177,9	177,8	178	885	175,5	177,2	176,2	176,4
450	178,8	177,8	177,8	178	900	175,4	177,3	176	176,4

5. Utilizar a equação 6 para calcular o desvio médio quadrático correspondente a cada polinômio de ajuste, cujos resultados estão na Tabela 26:

Tabela 26. Desvio médio quadrático

Desvio médio quadrático (V)			
Grau 1	Grau 2	Grau 3	Grau 4
0,00303	0,00292	0,00290	0,00292

O polinômio de ajuste que apresenta o menor desvio médio quadrático é o polinômio de grau 3, cujo valor calculado da incerteza padrão de ajuste no intervalo de tempo acumulado de 15 a 30 min foi de 0,00290 V.