

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

WELLINGTON UCZAK DE GOES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO NO
ENSAIO DE CAVITAÇÃO DE UM AÇO INOX 304.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2014

WELLINGTON UCZAK DE GOES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO NO
ENSAIO DE CAVITAÇÃO DE UM AÇO INOX 304.**

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

Orientador: Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz

PONTA GROSSA

2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa

Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Mecânica
Bacharelado em Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA AMPLITUDE DE VIBRAÇÃO NO ENSAIO DE
CAVITAÇÃO DE UM AÇO INOX 304.**

por

WELLINGTON UCZAK DE GÓES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 10 de Fevereiro de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz.
Prof.(a) Orientador(a)

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato.
Membro titular

Prof. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin.
Membro titular

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

Dedico este trabalho aos meus pais:
Gilson Batista de Góes e Eronice
Aparecida Uczak de Góes.

AGRADECIMENTOS

Agradecer é admitir que houve um momento que se precisou de alguém, dessa forma presto aqui minha gratidão e sentimento eterno.

Início, portanto agradecendo a Deus por tudo, sempre.

Agradeço aos meus pais Gilson e Eronice por me proporcionarem o dom da vida e a construção deste ser até chegar a esta pesquisa e assim por diante, sem jamais deixar de me dar forças e incentivo. Ao meu irmão Vinícius pelo convívio e amizade. E aos demais familiares.

Agradeço ao Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz pelo auxílio, disponibilidade de tempo, pelo apoio, pela compreensão, pela dedicação e os ensinamentos a mim fornecidos durante os últimos anos.

Aos Professores Dr. Luciano Augusto Lourençato e Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin por terem aceitado a tarefa de avaliar este trabalho.

A todos os mestres e servidores técnico-administrativo da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa, que me acompanharam na minha vida acadêmica sempre exigindo de mim muito mais que eu supunha aguentar dessa forma me ajudando a construir um conhecimento sólido.

Aos velhos e novos amigos que fiz tanto os companheiros de profissão e os que também a vida me apresentou que são de muito valor para mim, pelo companheirismo, paciência e amizade.

Dedique alta estima à sabedoria, e ela
o exaltará abrace-a, e ela o honrará.
(Provérbios 4:8)

RESUMO

GOES, Wellington Uczak. **Análise da influência da amplitude de vibração no ensaio de cavitação de um aço inox 304**. 2014. 73. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

O avanço na criação de materiais mais resistentes leva ao aprofundamento no estudo dos fenômenos a quais os materiais estão expostos, neste contexto o trabalho foi formulado. O objetivo deste trabalho de conclusão de curso foi realizar uma investigação experimental da influência da variação da amplitude de vibração em um aço inox 304, sendo que este problema está relacionado ao processo tribológico da cavitação. A investigação experimental foi realizada no laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa, utilizando o equipamento de cavitação ultra-sônica, através do método vibratório atendendo a norma ASTM G32/03 modificado para o modo indireto. A parte seguinte do trabalho foi a de caracterização dos corpos de prova também foi realizada no laboratório de Materiais, primeiramente pela utilização da balança analítica Shimadzu modelo AW 220 para a avaliação da perda de massa, então de posse desses dados eles foram comparados com os disponíveis na literatura, depois de conferidos os dados foi utilizado o perfilômetro ótico 3D da marca Taylor Hobson CCI Lite para observar a rugosidade e o perfil da superfície desgastada. Com os devidos resultados estabelecidos na fase anterior, passou-se para a próxima fase onde foram criadas diversas tabelas e gráficos comparativos, entre as diferentes amplitudes de 40%, 60%, 70% e 80% de 60 μm , ao longo do tempo de ensaio, e quando possível esses resultados foram comparados com as literaturas existentes do assunto no que diz respeito aos gráficos e tabelas geradas sempre apresentando uma concordância dos dados.

Palavras-chave: Erosão por Cavitação. Mudança de Amplitude. Tribologia. Rugosidade.

ABSTRACT

GOES, Wellington Uczak. **Analysis of the amplitude of vibration in the cavitation test of a 304 stainless steel.**2014. 73. Course Conclusion Work in Bachelor of Mechanical Engineering - Federal Technology University of Parana. Ponta Grossa, 2014.

The advancement in the creation of most resistant materials leads to the further study of the phenomena which the materials are exposed to, in this context the work was formulated. This course conclusion work objective was to perform an experimental investigation of the variation of the vibration amplitude in a 304 stainless steel, and this issue is related to the tribological process of cavitation. The experimental investigation was performed in the laboratory of Materials in the Federal Technological University of Paraná campus Ponta Grossa, using equipment ultrasonic cavitation through the vibratory method attending to ASTM G32/03 modified for the indirect method. The next part of the work was the characterization of the specimens also performed in the Materials Laboratory, first by the use of the Shimadzu analytical balance AW220 for evaluation of the weight loss, then these data they were compared with those available in the literature, after the data conferred was used the 3D optical profilometer from the brand Taylor Hobson CCI Lite to observe the surface roughness and profile of the worn surface. With the appropriate results established in the previous phase, started the next phase where several tables and comparative charts were created, between the different amplitudes of 40%, 60%, 70% and 80% of 60 μm along the testing time and when was possible these results were compared with existing literature on the subject in regards to graphics and tables generated and always presenting a concordance of the data.

Keywords: Cavitation erosion. Amplitude Change. Tribology. Roughness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Típicos diagramas de fase. (A) Gráfico de pressão por temperatura, (B) Gráfico pressão por volume específico.	17
Figura 2 - Esquemático equipamento vibratório de erosão por cavitação.	20
Figura 3 - Formação e colapso das bolhas sob a ponta do sonotrodo.	20
Figura 4 - Curva da taxa de perda de massa.	22
Figura 5 - Comportamento de materiais em relação à cavitação.	22
Figura 6 - Turbina Francis	26
Figura 7 – Formação da cavitação fixada numa turbina Francis.	27
Figura 8 - Formação de cavitação por bolhas numa turbina Francis.	27
Figura 9 – Formação de cavitação por vórtice numa turbina Francis.	28
Figura 10 - Desenho esquemático turbina Francis.	28
Figura 11 - Região A – Referente à Figura 10.	29
Figura 12 - Região B – Referente à Figura 10.	29
Figura 13 - Região C – Referente à Figura 10.	30
Figura 14 - Região D – Referente à Figura 10.	30
Figura 15 - Turbina Kaplan.	31
Figura 16 – Formação de uma cavidade de ar.	32
Figura 17 - Afastamento das bolhas de cavitação.	32
Figura 18 - Desenho esquemático turbina Kaplan	33
Figura 19 - Região A – Referente à Figura 18.	33
Figura 20 - Região B – Referente à Figura 18.	34
Figura 21 - Região D – Referente à Figura 18.	34
Figura 22 - Comparativo matriz elétrica brasileira 2012 e 2011.	36
Figura 23 - Consumo final de energia por fonte.	37
Figura 24 - Foto do perfilômetro ótico.	39
Figura 25 - Tela de resultado perfilômetro.	40
Figura 26 - Esquemática do processo.	43
Figura 27 - Evolução da taxa de perda de massa na primeira preparação de amostras.	48
Figura 28 - Evolução da perda de massa acumulada na primeira preparação de amostras.	48
Figura 29 - Evolução da taxa de perda de massa na segunda preparação de amostras.	50
Figura 30 – Evolução da perda de massa acumulada na segunda preparação de amostras.	50
Figura 31 - Evolução das rugosidades na amplitude de 80.	52
Figura 32 - Evolução das rugosidades na amplitude de 70.	53
Figura 33 – Evolução das rugosidades na amplitude de 60.	54
Figura 34 – Evolução das rugosidades na amplitude de 40.	55

Figura 35 – Desvio médio quadrático ao longo das amplitudes.	56
Figura 36 - Desvio médio do perfil ao longo das amplitudes.	57
Figura 37 - Comparativo entre região com 2 horas de cavitação e região com 18 horas de cavitação	59
Figura 38 - Zero horas de ensaio de cavitação.	60
Figura 39 - Duas horas de ensaio de cavitação.	60
Figura 40 - Quatro horas de ensaio de cavitação.....	61
Figura 41 - Seis horas de ensaio de cavitação.....	61
Figura 42 - Oito horas de ensaio de cavitação.	62
Figura 43 - Dez horas de ensaio de cavitação.	62
Figura 44 - Doze horas de ensaio de cavitação.	63
Figura 45 - Quatorze horas de ensaio de cavitação.....	63
Figura 46 - Dezesesseis horas de ensaio de cavitação.	64
Figura 47 - Dezoito horas de ensaio de cavitação.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Situação da cavitação em turbinas hidráulicas no Brasil.....	38
Tabela 2 - Dureza das amostras ao longo das amplitudes	49
Tabela 3 - Períodos de incubação e acumulação das amostras.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AISI	American Iron and Steel Institute
ANEEL	Agência nacional de energia elétrica
ASTM	American Society for Testing and Materials
LACTEC	Instituto de tecnologia para o Desenvolvimento
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
Warwick IMRC	Warwick Innovative Manufacturing Research Centre
ψ	coeficiente específico de energia
φ	coeficiente de fluxo
ε	martensita HC

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 HISTÓRICO DO ESTUDO DA CAVITAÇÃO	15
2.2 O FENÔMENO DA CAVITAÇÃO	16
2.2.1 Conceitos básicos referentes à perda de massa por cavitação	16
2.2.2 Estágios da perda de massa em materiais metálicos	21
2.2.3 Aspectos metalúrgicos relacionados à cavitação.....	23
2.2.3.1 Energia de falha por empilhamento	23
2.2.3.2 Mecanismos de perda de massa na cavitação	23
2.2.3.3 Processo de acabamento e tamanho de grão	24
2.3 CAVITAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA	24
2.3.1 Estudos relacionados às variáveis de cavitação.....	35
2.4 CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS NO BRASIL.....	36
2.5 PERFILOMETRIA ÓTICA	39
3 METODOLOGIA	43
3.1 DEFINIÇÃO DO MATERIAL	43
3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	44
3.3 ENSAIO DE CAVITAÇÃO	44
3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	45
3.4.1 Microdureza	45
3.4.2 Perfilometria ótica	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	47
4.1.1 Coleta de dados por pesagem	47
4.1.2 Coleta de dados por perfilometria ótica	52
4.1.2.1 A influência das rugosidades ao longo do tempo.....	52
4.1.2.2 Avaliação da variação dos parâmetros de rugosidade com diferentes valores de amplitudes.....	56
4.1.2.3 A evolução da cavitação por meio de imagens 3D	58
5 CONCLUSÕES	66
6 REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

A utilização da energia hidráulica foi uma das primeiras formas de substituição do trabalho animal pelo mecânico, especificamente no bombeamento de água e moagem de grãos. A seu favor tinham, para tanto, as seguintes características: disponibilidade de recursos, facilidade de aproveitamento e, principalmente, seu caráter renovável.

A energia hidrelétrica pois possui uma menor geração de poluentes, além de possuir um tempo de vida maior que as usinas de combustíveis fósseis, possuem uma taxa de eficiência maior e um menor custo com manutenção e serviço. Devido a isso hoje em dia é a principal fonte de energia elétrica em diversos países, segundo a Aneel, representa cerca de 17% de toda a eletricidade gerada no mundo.

Contudo, na geração de energia elétrica por meio das hidrelétricas existe um processo de perda de massa chamado de cavitação, que para um primeiro momento pode ser definido como o processo de formação de bolhas na superfície das pás das turbinas devido à diferença de pressão dentro dela. Nesse fenômeno são geradas ondas microscópicas que acabam por remover material das pás, com isso fazendo com que ocorra a perda de massa e acarretando em problemas nas turbinas.

Devido a esses fatores, atualmente diversos autores estão dedicando seus estudos a esse processo, alguns de uma maneira a focar mais a questão da perda de massa e outros focando a questão da rugosidade, tentando estabelecer por meio de equações a progressão da cavitação, por meio de gráficos criar comparativos sobre a evolução das superfícies atacadas por cavitação, estudos quantitativos focando nos dados, entre outros diversos estudos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da variação da amplitude de vibração no processo de perda de massa e evolução da rugosidade durante ensaio de cavitação por ultrassom em um aço INOX 304.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estudar a influência da variação da amplitude de vibração na cavitação por ultrassom:

- No perfil de rugosidade;
- Na perda de massa;

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção apresenta o embasamento teórico do presente trabalho, sendo os temas: o fenômeno da cavitação e por fim as turbinas hidráulicas com associação à cavitação.

2.1 HISTÓRICO DO ESTUDO DA CAVITAÇÃO

Em 1754, Euler cita em sua pesquisa "*De Motu Et Reactione Aquae Per Tubos Mobiles Transfluentis*" a possibilidade da existência de regiões de baixa pressão, até mesmo pressões negativas além da possível formação de vazios nessas regiões de baixas pressão (EULER, 1754).

Em 1873, Reynolds no Reino Unido investigou teoricamente e descobriu a cavitação como um fenômeno físico, por meio de um estudo tentando explicar o comportamento incomum de hélices de navios nas velocidades de rotação mais altas.

No ano de 1893, a cavitação como um fenômeno foi descoberta, por uma falha nas hélices do torpedo chamado "*Darling*" também no Reino Unido, então Lorde Railegh é colocado na função de estudar o fenômeno. No ano de 1917, Lorde Railegh publica um estudo pelo nome de "*On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity*", que dizia respeito aos sons emitidos pela água quando começa a ferver e a sua explicação devido ao colapso parcial ou total das bolhas quando entram em contato com a água da superfície fria.

Em 1970, Knapp, um dos pioneiros no estudo da cavitação, descreveu em sua obra fundamentos teóricos para a cavitação, também o relacionando aos conceitos teóricos com o fenômeno da cavitação na prática por meio de experimentos de cavitação.

Contudo, mesmo com essas pesquisas, somente no início dos anos de 1980, foi que o fenômeno começou realmente a ser estudado como um processo de tecnologia por países como Estados Unidos, Reino Unido, Rússia e outros países europeus.

2.2 O FENÔMENO DA CAVITAÇÃO

Como uma forma de esclarecer de uma maneira mais eficaz o fenômeno da cavitação, este capítulo será subdividido em diversas seções. Primeiramente a seção dos conceitos referentes à cavitação, seguido dos estágios de perda de massa em materiais metálicos, aspectos metalúrgicos relacionados à cavitação, cavitação na geração de energia hidrelétrica e uma revisão dos estudos relacionados às variáveis de cavitação.

2.2.1 Conceitos básicos referentes à perda de massa por cavitação

A cavitação basicamente é a formação de vapores em um fluido em decorrência de baixas pressões locais geradas por altas velocidades. Contudo, quando se fala em cavitação se diz respeito ao fenômeno de mudança do estado líquido para o gasoso, tem-se, porém outros meios para essa mudança, a ebulição que é o fenômeno que possui essa transformação ocorre por meio de um aumento da temperatura e não pela baixa pressão no local.

A cavitação diz respeito à mudança de vapor devido apenas a baixa pressão local, contudo a linha entre ebulição e cavitação é tênue, por exemplo, temos o fluxo ao redor de trocadores de calor que além de possuírem logicamente a troca de calor podem apresentar uma baixa pressão local e por conseqüente um processo de cavitação.

Brennen (1995) apresenta de uma forma mais específica essa diferença entre o fenômeno da ebulição e o fenômeno da cavitação, primeiramente com a ajuda dos gráficos da Figura 1 explica como funcionam os fenômenos relacionados a mudanças de estado físico na água. O gráfico (A) é o gráfico de pressão por temperatura e apresenta a linha dos sólidos e a linha da saturação entre líquido e gás e dessa forma introduz o conceito que a uma mesma temperatura diminuindo a pressão é possível à mudança de estado do líquido para o gás, assim como quando se tem um aumento da temperatura e uma pressão constante.

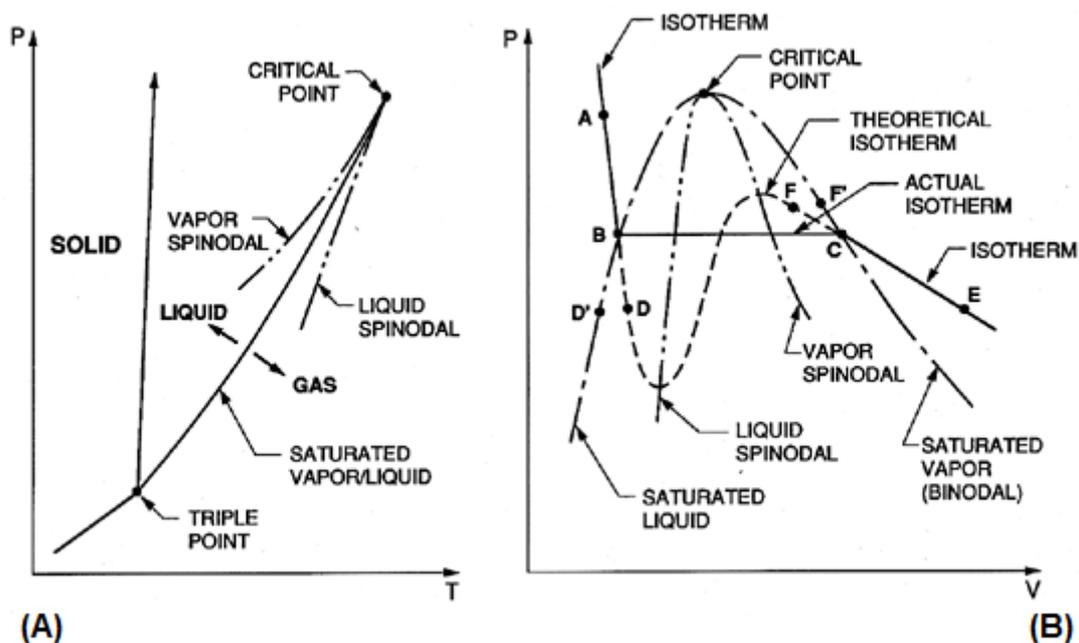


Figura 1 - Típicos diagramas de fase. (A) Gráfico de pressão por temperatura, (B) Gráfico pressão por volume específico.

Fonte: Brennen (1995).

Ainda segundo Brennen (1995), observa-se o gráfico (B) que é o gráfico pressão por volume específico. Traça neste gráfico uma isoterma a partir do ponto A e então o autor varia a pressão e observa os resultados, como nosso foco é o processo de mudança de líquido para gás, quando ele abaixa a pressão em um momento, a região de saturação do líquido será atingida, então teremos um momento em que a pressão é constante, contudo o volume específico aumenta até o ponto em que se atinge a formação de vapor, podendo-se passar por diversos processos antes, tal como um subresfriamento ou um aquecimento.

Com esses conhecimentos devidamente formulados, Brennen (1995) insere a diferenciação entre o fenômeno da cavitação e da ebulição. Primeiramente a cavitação é quando se tem um líquido em uma temperatura constante e então o líquido é submetido a uma pressão decrescente até que atinge valor abaixo da pressão de vapor saturado, então ocorre à ruptura, tal processo é a cavitação, quando se tem uma diminuição da pressão do líquido com uma temperatura aproximadamente constante.

Então vem a ebulição, um líquido submetido a uma temperatura acima da temperatura de saturação normal a uma pressão aproximadamente constante, o

processo de ruptura por meio desse sobreaquecimento crítico como é conhecido e a uma pressão aproximadamente constante é chamado de ebulição.

Ainda no que diz respeito a conceitos, Avellan (2004), por meio de um modelamento reduzido de uma turbina, levanta características que dizem respeito à cavitação e mostra as formas de cavitação. Contudo essa parte será abordada mais especificamente na continuação, o importante é frisar que Avellan formula conceitos também importantes para o estudo da cavitação, em específico da turbina Francis por meio do modelo reduzido.

Os efeitos negativos da cavitação se sobrepõem aos positivos, que se resume ao seu uso em fins médicos, dentre os efeitos negativos temos: o ruído, a erosão, a vibração que a turbina em questão começa a apresentar, perda da carga de elevação que como será constatado, num tópico seguinte é fundamental quando se trata do assunto, também se tem um aumento da força de arrasto, com isso uma diminuição da eficiência da máquina em questão.

A cavitação é um fenômeno com um comportamento violento, pois é formado por pressões muito baixas devido às velocidades do fluido altas, sendo que nessas áreas de pressões baixas as temperaturas de saturação dos líquidos também são reduzidas, dessa forma o processo de vaporização e condensação é muito rápido, muito mais rápido que a dinâmica da bolha de vapor, assim quando ocorre à formação e a ruptura da mesma não é possível um retardamento do processo pela dinâmica da bolha.

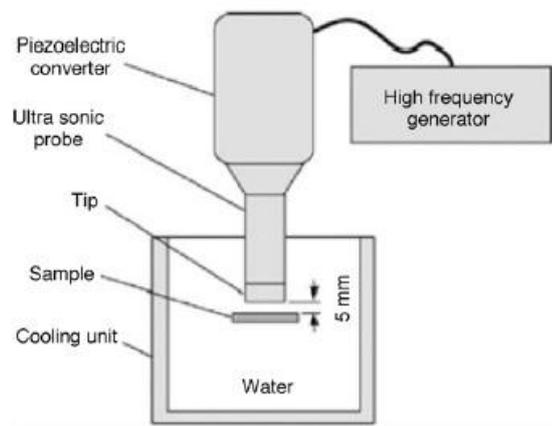
Sendo a cavitação parte do escoamento, ela pode se mover rapidamente ao longo do mesmo entre regiões de alta e baixa pressão, isso acaba por conduzir a um colapso mais rapidamente. O colapso da bolha é tão rápido que as ondas de choque chegam a passar da velocidade do som, por consequência a cavitação é um processo que emite muito ruído como foi dito anteriormente, emitindo sons em uma ampla gama de frequências, especialmente frequências altas.

Por meio das ondas de choque geradas pelo colapso das bolhas próximo a um sólido, trincas microscópicas são formadas no material e com o tempo essas trincas microscópicas acabam evoluindo, se expandindo pelas constantes ondas de choque e por fim causam uma cavidade de erosão no material, causando dessa maneira a perda de massa característica do fenômeno da cavitação.

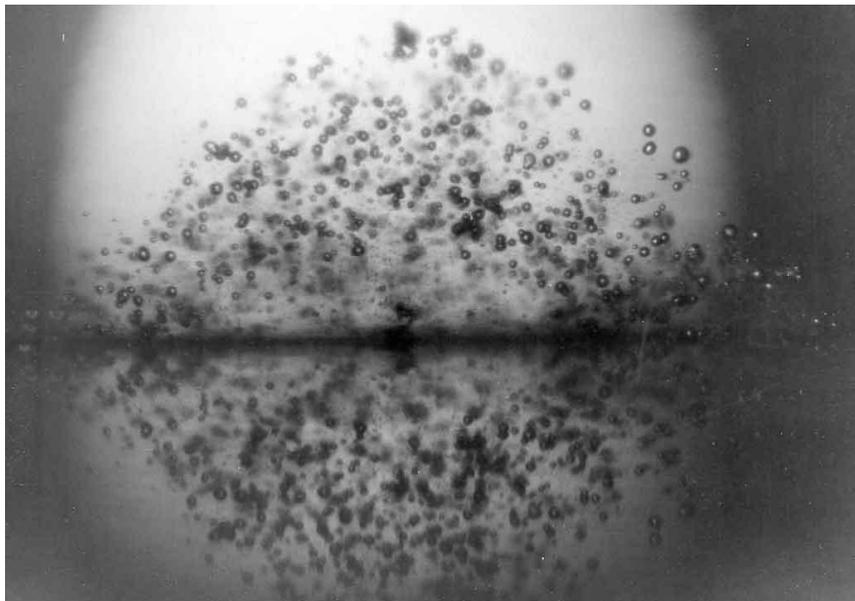
O que deve ser elucidado é que o material danifica-se pela conversão da energia potencial da bolha antes da sua ruptura com a energia cinética que após a ruptura da bolha é dissipada pelo líquido. Dessa forma, dois mecanismos têm sido propostos: o primeiro mecanismo diz respeito à pressão gerada pela onda de choque no momento do rompimento, a segunda implica que os danos causados no material são originados de um microjato que surge durante o colapso da bolha na superfície do material, das duas formas gerando trincas microscópicas que levam a formação da cavidade de erosão no material e assim gerando a perda de massa, como foi elucidado acima. (SHEIR, JARMAN E BURSTEIN, 1994)

Como o fenômeno é bem específico e para colocá-lo em uma situação real e obter resultados seria inviável visto a diversos fatores tanto do ponto de vista econômico como do ponto de vista logístico, um método simplificado utilizando o esquema da Figura 2. Por meio do sistema ultra-sônico, sob a ponta do sonotrodo são formadas as bolhas e então ocorre o colapso delas, por meio de uma sucessão de ciclos de baixa pressão para a formação e alta pressão para o colapso.

Para um maior entendimento desse processo tem-se em seguida na Figura 3, a qual ilustra o momento da formação e colapso das bolhas sob a ponta de um sonotrodo, equipamento semelhante ao equipamento deste trabalho.



**Figura 2 - Esquemático equipamento vibratório de erosão por cavitação.
Fonte: Park (2011).**



**Figura 3 - Formação e colapso das bolhas sob a ponta do sonotrodo.
Fonte: (www.sonosys.de/images).**

Apesar de todos os estudos na área, não é possível evitar a cavitação de uma forma efetiva. Segundo Allenstein (2007) pode-se, é entender algumas das características dos líquidos que influenciam nesse processo, sendo elas:

- A alta pressão, pois o pico de pressão pode atingir milhares de MPa ou até GPa;
- A dimensão dos micro-jatos é muito pequena, desde alguns micrômetros até centenas de micrômetros, com isso cada impacto se concentra numa área pequena;

- Tempo, pois a duração é de apenas alguns microssegundos;
- Alta temperatura, pois a temperatura no momento da dissipação pode ser muito alta, chegando à casa dos milhares de graus Celsius.

Sendo assim, com essas características pode tentar amenizar a cavitação por meio da escolha de um líquido com características favoráveis, contudo uma forma definitiva de eliminar o problema ainda não é possível.

2.2.2 Estágios da perda de massa em materiais metálicos

Mais especificamente na perda de massa do material por meio da cavitação, independentemente do material ou de como o processo que levou a cavitação, a taxa de perda de massa pode ser compreendida em quatro fases distintas:

- Primeiramente tem-se a fase da incubação, que o material frágil sofre uma perda de massa significativa nessa etapa, porém quando o material é dúctil nesta fase ocorrem apenas modificações superficiais no material.
- Então se tem a fase da acumulação, nesta fase ocorre à taxa de perda máxima do material, devido que a taxa de perda do material aumenta gradativamente devido à deformação plástica que leva à perda de massa.
- Depois existe a fase da atenuação, nesta fase a rugosidade já está mais elevada, devido ao desprendimento do material e com isso acaba por absorver uma parte da energia gerada pelo processo, ocorrendo assim um decréscimo na taxa de perda de massa e por consequência na taxa de erosão.
- Por fim se tem da estabilidade, onde há o equilíbrio entre a energia dissipada pela superfície rugosa e a energia que causa a perda de massa, com isso a taxa de perda de massa torna-se aproximadamente constante.

Com base nessas informações sobre as fases é possível descrever o gráfico com um perfil característico no que diz respeito ao ensaio de cavitação relacionando o tempo de ensaio com a taxa de perda de massa, tal gráfico encontra-se ilustrado na figura 6, que também pode ser interpretado segundo a figura 4, que diz respeito ao comportamento dos materiais em relação à cavitação.

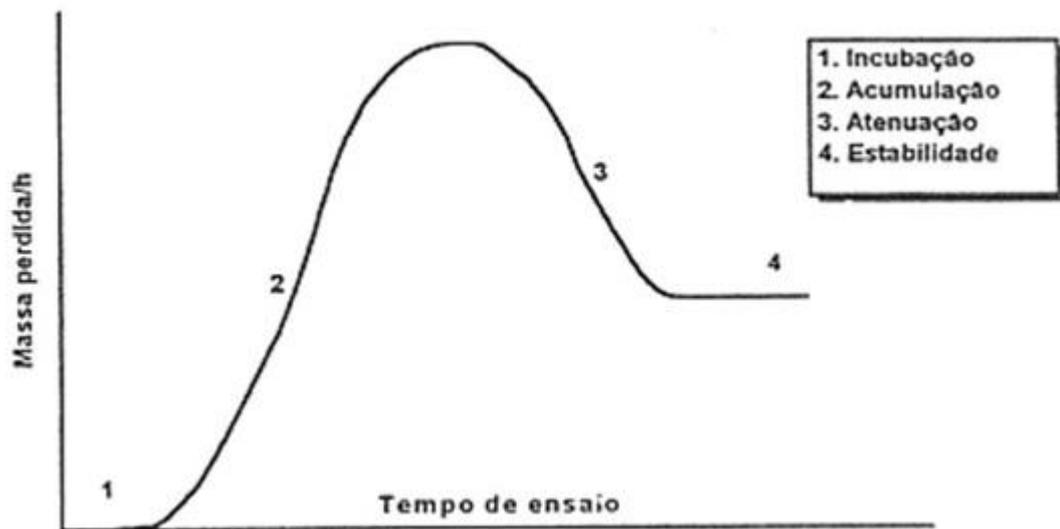


Figura 4 - Curva da taxa de perda de massa.
Fonte: Hattori (2003).

MATERIAIS DÚCTEIS		MATERIAIS FRÁGEIS
Deformação	Período de incubação	
Alteração estrutural	↓	
Fadiga		Fadiga
Remoção de partículas	Período de estabilidade	Remoção de partículas
Formação de cavernas	↓	Formação de cavernas
Erosão acelerada		Erosão acelerada

Figura 5 - Comportamento de materiais em relação à cavitação.
Fonte: Pohl (1993).

Como uma forma de comparação no que diz respeito aos materiais dúcteis e frágeis, Pohl (1993) esquematizou a Figura 5 para que de uma forma simplificada possa elucidar as principais fases que os materiais metálicos passam pela ocorrência de erosão por cavitação.

2.2.3 Aspectos metalúrgicos relacionados à cavitação

Para um maior entendimento do processo da cavitação se faz necessária um comentário a respeito dos aspectos metalúrgicos que são relacionados com a cavitação, e quando se fala em aspectos metalúrgicos ligados à cavitação segundo Pukaszewicz (2008) tem destaque a energia de falha de empilhamento (EFE), os mecanismos de perda de massa na cavitação e os processos de acabamento e tamanho de grão.

2.2.3.1 Energia de falha por empilhamento

Uma explicação do que vem a ser a energia, diz que a mesma é uma tensão superficial do material que age no sentido de recombinar as discordâncias parciais e eliminar as falhas, ou seja, é uma energia associada à mudança do empilhamento de uma estrutura para outra.

A falha por empilhamento pode ocorrer de 3 formas, intrínseca onde ocorre a remoção de um plano da estrutura, extrínseca onde ocorre a inserção de um plano extra ou maclação onde ocorre a formação de uma estrutura especular. Sendo que o foco será a intrínseca devido a ser o modo mais comum de formação de falha de empilhamento em materiais. (MEYERS, 1998. CAHN, 1996)

A EFE pode ser avaliada por meio da distância entre as duas discordâncias parciais que limitam a sequência de falha de um equipamento, contudo a adição de alguns elementos na composição química segundo Meyers (1998) podem reduzir ou elevar a EFE, dessa forma podendo reduzir a deformação em uma estrutura cristalina mudando o modo de deformação da estrutura, modificando assim a taxa de encruamento do material, a resistência sob impacto, à resistência a fluência e a textura de deformação.

2.2.3.2 Mecanismos de perda de massa na cavitação

No presente estudo limitou-se a citar a perda de massa na cavitação em 3 diferentes mecanismos, a perda de massa pela formação de maclas, a perda de

massa por fratura frágil e o mecanismo que será abordado que é o que ocorre no caso em estudo a perda de massa por fratura das placas de martensita ϵ .

A perda de massa por fratura das placas de martensita ϵ , é caracterizada por uma elevada absorção de energia, dessa maneira promovendo um aumento do período de incubação e uma redução na taxa de perda de massa, sendo que existem estudos que vão adiante e criam uma relação entre a formação de martensita ϵ com o aumento da resistência à cavitação, ou seja, uma característica visada para este estudo. (HEATHCOCK, 1982)

2.2.3.3 Processo de acabamento e tamanho de grão

Neste quesito os estudos publicados dizem respeito à relação entre o tamanho de grão e a resistência a cavitação. Quanto menor o tamanho de grão, maior a resistência do material à cavitação, pois há uma redução no tamanho do grão prolongando o período de incubação do material, sendo assim eleva-se sua vida útil. (HATTORI, 2003)

Outra forma encontrada segundo Dubé (1995) para diminuir o espaço interdentrítico, é o processo da refusão a laser. Este processo promove um aquecimento e resfriamento rápido da camada superficial do material, o que acarreta mudanças microestruturais, levando a uma homogeneização química do material e o refino da estrutura, aumentando dessa forma, como anteriormente a resistência do material à cavitação.

2.3 CAVITAÇÃO NA GERAÇÃO DE ENERGIA HIDRELÉTRICA

Quando se fala em cavitação ocorrente pela geração de energia hidrelétrica, falam-se das duas principais turbinas de reação em hidrelétricas, as turbinas Francis e Kaplan, que possuem altas velocidades específicas dos líquidos dentro das mesmas, com isso a incidência de cavitação é muito maior nas regiões convexas próximas à saída das pás rotoras, devido às depressões que ocorrem.

Dentre os mais diversos tipos de cavitação, quando se fala em turbinas hidráulicas, destacam-se principalmente 3 tipos de cavitação:

- Cavitação fixada que de uma forma simplificada diz respeito a formação, crescimento e enchimento de uma cavidade de vapor que é então deslocada para jusante com o fluxo reentrante, dessa maneira vai para regiões de pressões mais elevadas e com isso implodida violentamente, provocando dessa maneira ondas de choque e concentrações de alta pressão. Sendo que este tipo de cavitação possui um poder de destruição considerável (MICHEL E BELAHADJI, 1997).
- Cavitação por vórtice, esse tipo de cavitação possui seu desenvolvimento em regiões de altas tensões cisalhantes, onde formam os vórtices. Os vórtices possuem diversas regiões, na região central do vórtice a pressão cai para valores próximos aos da pressão de vaporização. Esse fenômeno ocorre principalmente nas extremidades das pás rotoras das turbinas Kaplan, nas camadas cisalhantes dos jatos submersos, na extensão do cone dos rotores principalmente nas turbinas Francis e nas passagens de fluxo entre as pás. Sendo que esse tipo de cavitação possui um poder destrutivo maior que a cavitação fixada, podendo causar grandes erosões, vibrações e ruídos intensos (CALAINHO, 1999).
- Cavitação por bolhas, devido a gradientes de pressão e a existência de germes ou núcleos no fluido são originadas bolhas, sendo que quando essas bolhas formadas entram em colapso são criadas altas pressões e acabam por realizar um processo de erosão no material devido ao impacto do jato reentrante que se forma durante a implosão, com a superfície sólida ou ainda devido às ondas de choque que são geradas (CALAINHO, 1999).

Num primeiro momento tem-se a turbina Francis, apresentada na Figura 6, que de uma forma simplificada possui um duto circular de secção decrescente onde a água entra com pressão e escoia empurrando um conjunto de lâminas fixas e então a água sai pela base do rotor perdendo muito sua velocidade e energia.



Figura 6 - Turbina Francis
Fonte: Cengel e Cimbala (2007).

Quando se fala na turbina do tipo Francis e a cavitação, o tipo da cavitação que ocorre na mesma está intimamente ligada a três coeficientes principais: primeiramente o coeficiente específico de energia ψ , o coeficiente de fluxo ϕ , sendo que coeficiente de fluxo tem sua influência maior na questão do vórtice e o número de Thoma também conhecido como coeficiente ou fator de cavitação, sendo obtido por meio de gráficos em função da rotação específica da bomba.

A cavitação fixada para a turbina Francis como mostra a Figura 7, sendo que quando os valores correspondentes do coeficiente específico de energia são altos, há um início de formação de bolhas no lado de sucção da turbina. Porém, quando os valores dos coeficientes são baixos há a formação de cavidades no lado de pressão das lâminas, desta forma então Avellan 2004 afirma que neste tipo de cavitação o número de Thoma não é confiável.



Figura 7 – Formação da cavitação fixada numa turbina Francis.
Fonte: Avellan (2004).

Para a cavitação por bolhas nas turbinas Francis deve ser enfatizado no projeto do valor do coeficiente de energia, principalmente no duto circular, próximo da saída e também nos lugares onde corresponde aos baixos fluxos de ataque. Neste tipo de cavitação o número de Thoma é de extrema importância, podendo ter o projeto da turbina baseado nesse número conforme a Figura 8.



Figura 8 - Formação de cavitação por bolhas numa turbina Francis.
Fonte: Avellan (2004).

No que diz respeito à cavitação por vórtices na turbina Francis, Figura 9, este fenômeno está ligado ao baixo fluxo de fluido na turbina, sendo observado na entrada da calha ligado ao cubo da turbina, estendendo-se até a lâmina da turbina, contudo é um fenômeno que não pode ser evitado, por exemplo, quando se trata de

uma turbina nova, até a turbina estar em seu pleno funcionamento preenchida por fluído.

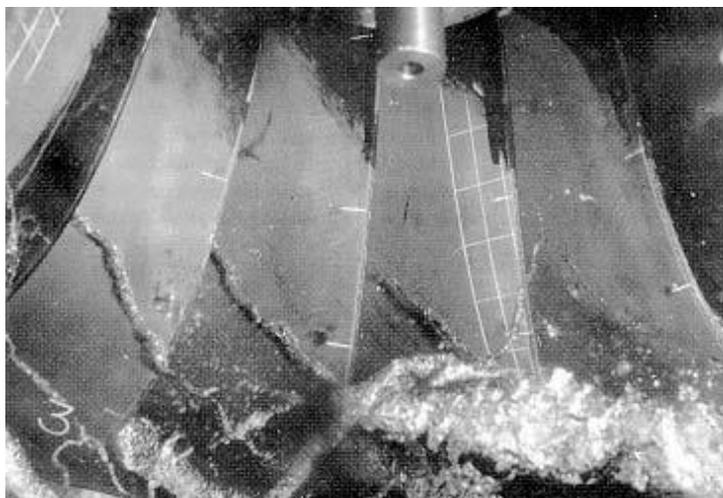


Figura 9 – Formação de cavitação por vórtice numa turbina Francis.
Fonte: Avellan (2004).

Para um maior entendimento da cavitação nas turbinas Francis, as áreas típicas de erosão por cavitação estão destacadas na Figura 10, sendo elas as áreas referidas como A, B, C e D.

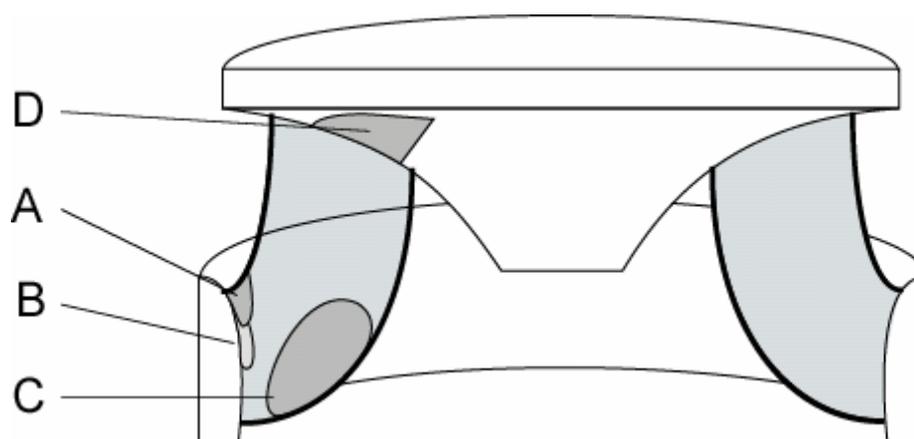
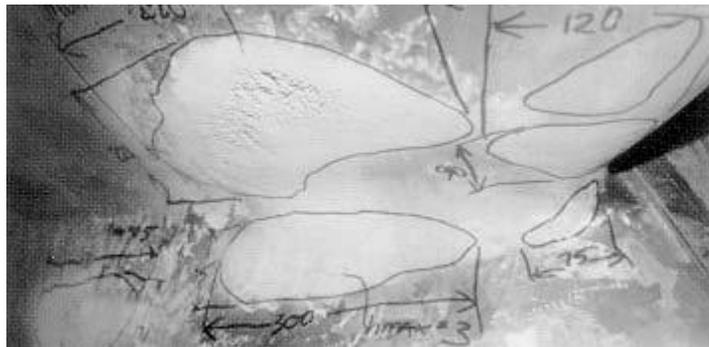


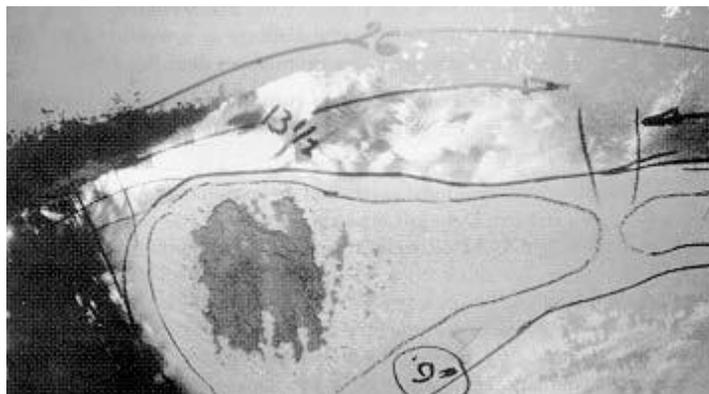
Figura 10 - Desenho esquemático turbina Francis.
Fonte: Avellan (2004).

A partir desta imagem hachurada, pode-se tecer alguns comentários, tais como:

- O fenômeno da cavitação geralmente apresenta danos graves nas estruturas de sucção da lâmina, indicada pela letra A (Figura 11) e na área a jusante no canal entre as pás indicado pela letra B (Figura 12), sendo que para que esse tipo de cavitação seja evitada o único meio é a mudança da borda de entrada da turbina.
- Depois desses dois pontos esclarecidos vem o ponto C (Figura 13), que diz respeito ao fenômeno da cavitação por meio de bolhas viajantes, apresentando uma erosão pouco visível, mas que pode ser controlada pela utilização do número de Thoma.
- Então se chega ao ponto D (Figura 14), que é o resultado obtido quando a turbina sofre da cavitação por vórtices.



**Figura 11 - Região A – Referente à Figura 10.
Fonte: Avellan (2004).**



**Figura 12 - Região B – Referente à Figura 10.
Fonte: Avellan (2004).**



**Figura 13 - Região C – Referente à Figura 10.
Fonte: Avellan (2004).**



**Figura 14 - Região D – Referente à Figura 10.
Fonte: Avellan (2004).**

As turbinas Kaplan se diferenciam das turbinas Francis apenas no que diz respeito ao formato do seu rotor que se assemelha a um rotor de navio, conforme se pode contatar pela Figura 15.



Figura 15 - Turbina Kaplan
Fonte: Cengel e Cimbala (2007).

Quando é abordada a questão da cavitação nas turbinas Kaplan temos situações onde o número de Thoma é de fundamental importância e em outro caso que o número de Thoma é irrelevante para a análise da cavitação.

A cavitação que é causada pela formação de uma cavidade de ar no centro do corredor de fluido da turbina, Figura 16, neste tipo de cavitação que é observado na turbina Kaplan, a influência do número de Thoma é bem grande, dessa maneira um controle pode ser feito por meio deste número, especificamente neste tipo de cavitação uma grande influência do ar em meio ao fluido é notada, devido à formação das cavidades de ar maiores e assim ocorre um agravamento no processo de erosão do material.

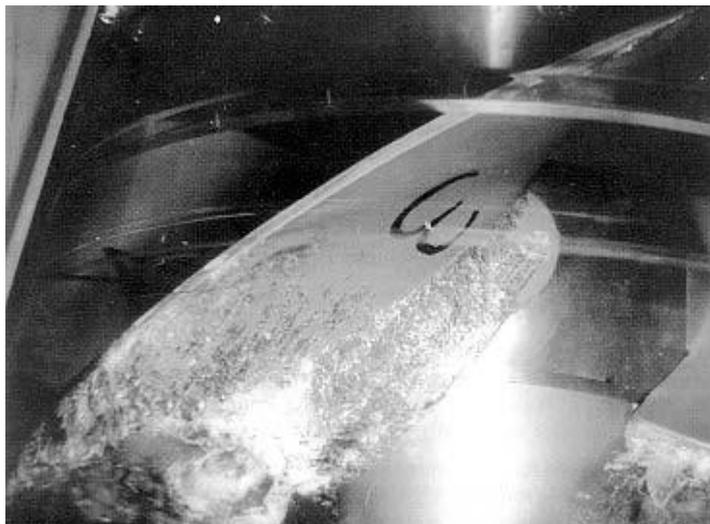


Figura 16 – Formação de uma cavidade de ar.
Fonte: Avellan (2004).

Devido a alguns ajustes dos ângulos da lâmina, ocorre um afastamento das bolhas de cavitação, conforme mostra a Figura 17, ocorrendo então o processo de erosão no espaço existente entre as lâminas e o casco da turbina. Este tipo de cavitação é acionado pelo fluxo de cisalhamento nesse intervalo existente entre as lâminas e o casco, não sendo muito dependente do número de Thoma para seu controle o que realmente é de interesse para que possa haver uma determinada atenuação neste fenômeno em específico é a melhoria da forma da lâmina na ponta da mesma.



Figura 17 - Afastamento das bolhas de cavitação.
Fonte: Avellan (2004).

Da mesma maneira que quando foi especificada a turbina Francis, para a turbina Kaplan tem-se uma ilustração com as principais áreas que apresentam a cavitação por erosão:

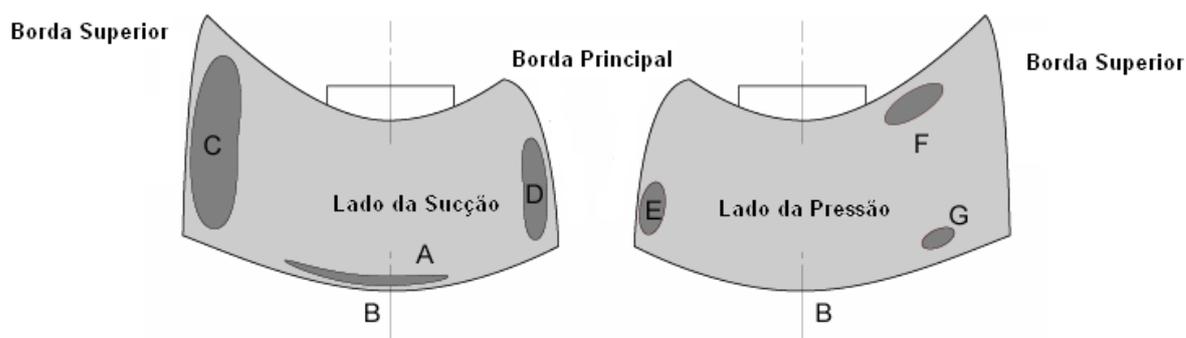


Figura 18 - Desenho esquemático turbina Kaplan
Fonte: Avellan (2004).

Analisando a Figura 18, constata-se que as áreas que possuem a erosão por cavitação de forma mais agravada são as áreas sombreadas A e B sendo respectivamente as Figuras 19 e 20 que consistem na ponta da pá e na carcaça da turbina. A área D sendo a Figura 21 indica a região onde ocorre a cavitação por meio de vórtices entre as lâminas, sendo uma erosão de ponta do corredor e na região de descarga do fluído.

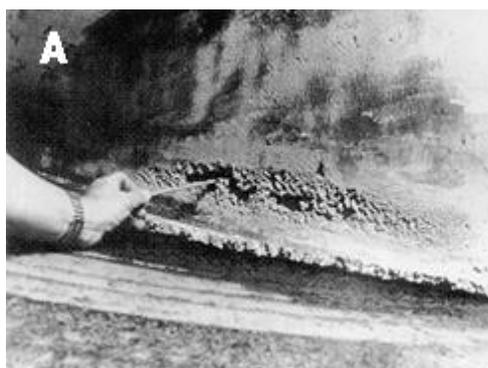


Figura 19 - Região A – Referente à Figura 18.
Fonte: Avellan (2004).

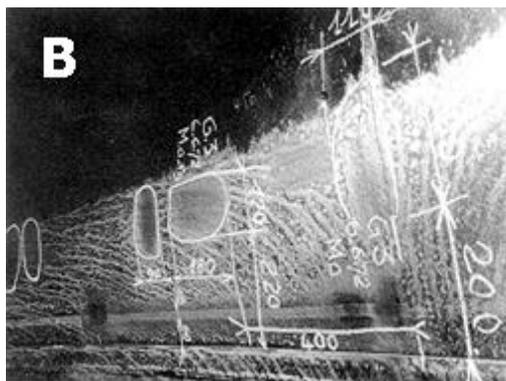


Figura 20 - Região B – Referente à Figura 18.
Fonte: Avellan (2004).

Então se tem a área E que diz respeito à cavitação no lado de sucção da lâmina, tendo sua erosão tanto quando existe uma alta pressão ou uma baixa pressão ocorrendo no lado da sucção, este tipo de cavitação é causada pela formação de cavidades de ar na borda de entrada da turbina.

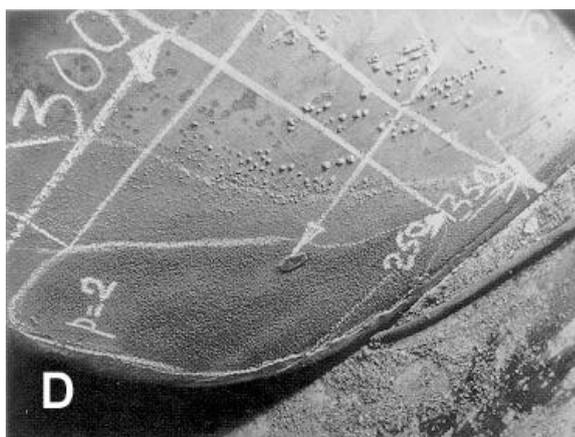


Figura 21 - Região D – Referente à Figura 18.
Fonte: Avellan (2004).

No que diz respeito às zonas indicadas pelas letra F e G, a perda de massa por cavitação ocorre nestas apenas quando a turbina está em funcionamento com um déficit de pressão, ou seja, durante os períodos de pressão baixa que os respectivos problemas por cavitação são encontrados nas mesmas.

Por fim o ponto C, que diz respeito aos momentos em que a turbina está com sua carga elevada então é observado à cavitação na região da saída do corredor no lado da sucção da respectiva turbina.

2.3.1 Estudos relacionados às variáveis de cavitação

Diversos autores observaram a relação entre as variáveis de cavitação com os mais diversos parâmetros de estudo, focando-se em sua maioria na perda de massa e a na rugosidade, dentre os quais alguns merecem um destaque por representar uma base para este trabalho.

Na perda de massa Choi (2013), faz uso de gráficos e equações para a comparação da variável de intensidade de cavitação com a perda de massa e outros parâmetros, por meio do uso da cavitação ultra-sônica e pela cavitação por uso de jatos, ao longo de todo o gráfico, além do período de incubação que em alguns autores é utilizado como limiar do estudo. O interessante de frisar é que nesse estudo a equação encontrada permite uma comparação da evolução do tempo de erosão em vários materiais de diferentes intensidades pela determinação de dois parâmetros característicos: a profundidade média característica da erosão e a erosão característica do tempo.

Espitia (2010) buscou uma visão mais ampla, comparando tanto a perda de massa, a variação da rugosidade e a taxa de erosão com a microestrutura das amostras e os mecanismos de desgaste. Com base nestas comparações, por meio de gráficos, foi estabelecida neste trabalho uma correlação entre os diversos parâmetros de rugosidade e os estágios de incubação e aceleração para um determinado material que estava em questão e também que a razão entre alguns parâmetros de rugosidade podem ser utilizados de forma efetiva nos mecanismos de degradação e perda de massa nas amostras.

Na questão da rugosidade Pohl (2002) traça a evolução de diversos parâmetros de rugosidade ao longo do teste de cavitação focando seu estudo nos dados quantitativos por meio do uso de um equipamento que permite a avaliação quantitativa dos parâmetros de rugosidade causados pela deformação plástica durante a exposição ao ensaio de cavitação. Com esse estudo alguns fenômenos relacionados a alguns parâmetros de rugosidade puderam ser constatados e dessa forma classificar qual parâmetro se adapta melhor para cada estágio de perda de massa.

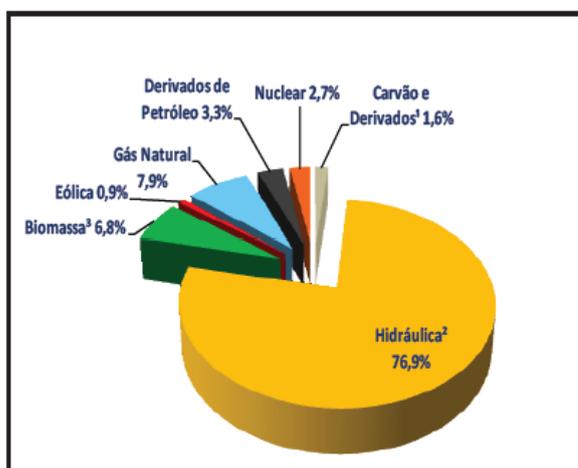
Chiu (2005) também tem seu foco na rugosidade mostrando principalmente a efetividade dos parâmetros de rugosidade, segundo ele é um método que tem a vantagem de estudar o dano no local em específico, quando comparado com os

métodos que levam em questão a perda de massa e também porque se podem constatar variações do material antes mesmo da cavitação começar a degradar a amostra, contudo a abordagem do autor é mais ampla, traçando a evolução desse parâmetro ao longo do tempo em diferentes materiais, para dessa forma corroborar com o que o autor quer afirmar.

2.4 CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS NO BRASIL

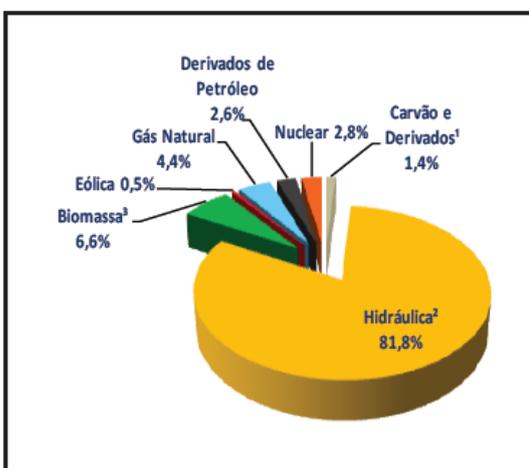
Para um entendimento melhor no que diz respeito da cavitação num contexto de Brasil, primeiramente precisa-se de focar a importância da energia hidrelétrica dentro da matriz energética brasileira. Voltando-se para um parâmetro brasileiro segundo o Balanço Energético Nacional (2013) dentro da planta de energia elétrica brasileira do ano de 2011, a energia hidráulica ocupava cerca de 81% da matriz energética brasileira, no ano de 2012 a energia hidráulica teve uma queda e entrou com a participação de 76%, como pode ser constatado na Figura 22.

Matriz Elétrica Brasileira
Brasil (2012)



geração hidrúlica² em 2012: 455,6 TWh
geração total² em 2012: 592,8 TWh

Brasil (2011)



geração hidrúlica² em 2011: 464,2 TWh
geração total² em 2011: 567,7 TWh

Figura 22 - Comparativo matriz elétrica brasileira 2012 e 2011.
Fonte: Balanço energético nacional 2013.

Outro dado que é de interesse é o que diz respeito ao uso energia elétrica comparada com os outros diversos tipos de energia utilizadas pelo brasileiro, mostrado na Figura 23.

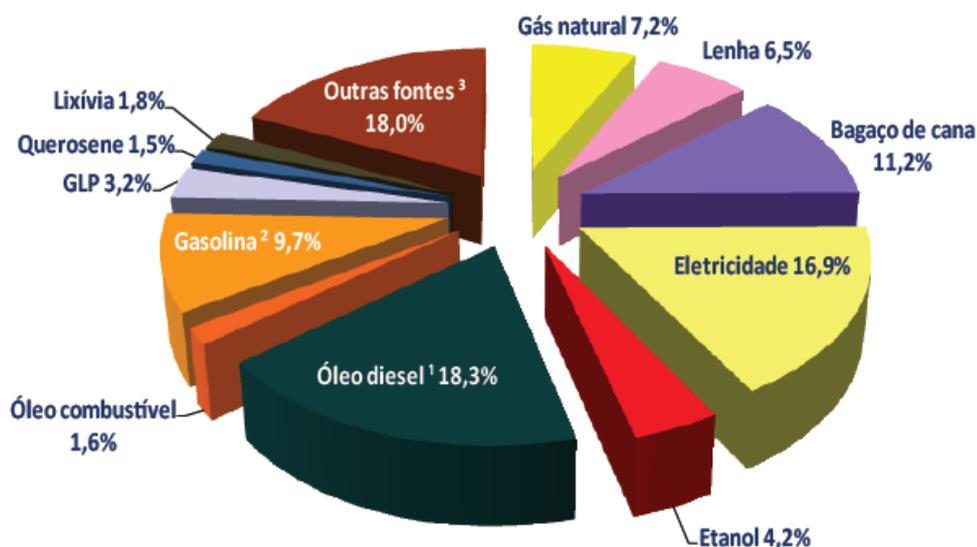


Figura 23 - Consumo final de energia por fonte.
Fonte: Balanço energético nacional 2013.

Devido a essa importância diversos autores estudaram a respeito desse fenômeno, como Calainho em 1999 que apresenta um estudo chamado “Cavitação em turbinas hidráulicas do tipo Francis e Kaplan no Brasil”, por meio do qual o autor fala a respeito dos principais fatores que levam a cavitação das turbinas, enfatizando que o fenômeno da cavitação é um dos processos que mais causa perdas econômicas, devido à indisponibilizar o equipamento por períodos extensos para o reparo das turbinas. Calainho (1999) também discorre a respeito da situação da cavitação em turbinas hidráulicas no Brasil na época.

Na Tabela 1, uma tabela comparativa elaborada por Calainho (1999), pode-se constatar no que diz respeito a situação da cavitação das turbinas hidráulicas brasileiras, assim como o nível de erosão das mesmas, sendo que foram obtidos dados técnicos de 273 turbinas hidráulicas de médio e grande porte, sendo que das turbinas pesquisadas 178 apresentavam problemas com a erosão por cavitação, representando assim 65% do total de turbinas.

Tabela 1 - Situação da cavitação em turbinas hidráulicas no Brasil.
Fonte: Calainho (1999).

SITUAÇÃO DA CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS NO BRASIL (OUT/97)

INSTALAÇÃO	TIPO TURBINA	NUM. UNIDADES C/CAVIT.	POTÊNCIA NOMINAL (MW)	QUEDA NOMINAL (m)	HER (h)	kg/HO (kg/1000h)	R\$/HO (R\$/1000h)
S. SIMÃO	FRANCIS	6	285	72	32.000	5	1170,00
B. MUNHOZ	FRANCIS	4	359	128	15.000	30	1833,00
3 MARIAS	KAPLAN	6	61	50	40.000	3	680,00
JAGUARA	FRANCIS	4	116	45	23.000	9	2170,00
V. GRANDE	KAPLAN	4	100	25	30.000	13	3330,00
S.GRANDE	FRANCIS	4	27	95	26.000	2	380,00
EMBORCAÇÃO	FRANCIS	4	297	128,5	30.000	3	670,00
CAMARGOS	KAPLAN	2	22	22	30.000	2	420,00
ITUTINGA	KAPLAN	4	12	25	32.000	2	390,00
N.PONTE	FRANCIS	3	173	96	16.000	3	780,00
FURNAS	FRANCIS	8	152	94	35.000	2	N.I.
M. MORAES	FRANCIS	2	45	45	35.000	1	140,00
L.C.B. CARV.	FRANCIS	6	170	60,8	35.000	25	1490,00
P.COLOMBIA	FRANCIS	4	80	20	35.000	2	170,00
MARIMBONDO	FRANCIS	8	186	60,3	35.000	2	190,00
ITUMBIARA	FRANCIS	6	354	80	21.000	51	2860,00
FUNIL	FRANCIS	3	72	67	35.000	1	130,00
CORUMBÁ	FRANCIS	3	125	73,5	N.I.	N.I.	N.I.
TUCURUÍ	FRANCIS	12	360	66	21.000	1	N.I.
C. NUNES	KAPLAN	2	20	23	8.600	5	580,00
I. SOLTEIRA	FRANCIS	20	161,5	46	20.000	22	3530,00
JUPIÁ	KAPLAN	14	100,8	25,4	20.000	65	5970,00
3 IRMÃOS	FRANCIS	6	54	45,8	20.000	50	5000,00
N.AVANHAN.	KAPLAN	3	34	29,7	20.000	5	1500,00
PROMISSÃO	KAPLAN	3	88	27,4	20.000	5	1500,00
CHAVANTES	FRANCIS	4	103,5	76	20.000	1	2000,00
CAPIVARA	FRANCIS	4	160	50	20.000	1	1750,00
ROSANA	KAPLAN	4	80	17	20.000	2	1250,00
TAQUARUÇU	KAPLAN	5	100,8	23	20.000	1	1600,00
JURUMIRIM	KAPLAN	2	48,75	35	20.000	1	1000,00
SOBRADINHO	FRANCIS	6	178	27,2	24.000	N.I.	N.I.
S. SANTIAGO	FRANCIS	4	355	106	18.000	11	3000,00
S. OSÓRIO A	FRANCIS	4	182	70	22.287	8	900,00
S. OSÓRIO B	FRANCIS	2	175	70	23.601	4	900,00
P. FUNDO	FRANCIS	2	110	253	26.000	1	N.I.

HER -Horas de operação - R\$/HO – Custo de reparo por 1000 horas de operação por unidade

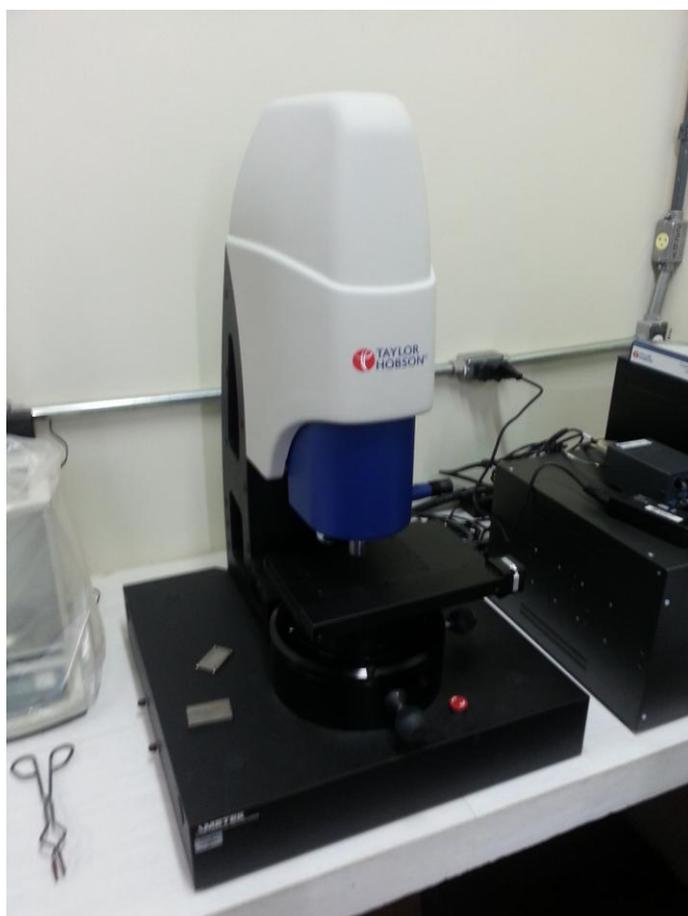
kg/HO - kg de eletrodo depositado por 1000 horas de operação por unidade

Calainho (1999) conclui então que a contribuição para esse número tão alto de turbinas afetadas pela erosão por cavitação seja a união de diversos fatores, sendo eles: Unidades que operam com uma sobrecarga ou uma carga parcial, o perfil das pás é alterado devido à manutenção, a altura de sucção não é dimensionada adequadamente e o projeto de perfil hidráulico é inadequado para a situação requerida.

Sendo que quanto mais antigas as turbinas hidráulicas os problemas com a cavitação são agravados e como no Brasil mais de 80% das turbinas em funcionamento tem mais de 20 anos temos uma situação grave para acontecer.

2.5 PERFILOMETRIA ÓTICA

Num primeiro momento tem-se uma imagem do equipamento aparato de perfilometria, na Figura 24. Para apresentar os dados referentes ao perfilômetro primeiro é válida uma explicação sobre os parâmetros que o perfilômetro apresenta, na Figura 25, tem-se uma foto dos parâmetros.



**Figura 24 - Foto do perfilômetro ótico.
Fonte: Aatoria Própria.**

ISO 4287						
Contexto			Mean	Std dev	Min	Max
Parâmetros de amplitude - Perfil de aspereza						
Rp	µm	Filtro gaussiano, 0.8 mm	3.07	0.562	2.33	3.70
Rv	µm	Filtro gaussiano, 0.8 mm	2.43	0.197	2.19	2.68
Rz	µm	Filtro gaussiano, 0.8 mm	5.50	0.366	5.01	5.89
Rc	µm	Filtro gaussiano, 0.8 mm	2.04	0.248	1.87	2.39
Rt	µm	Filtro gaussiano, 0.8 mm	6.48	0.389	6.00	6.95
Ra	µm	Filtro gaussiano, 0.8 mm	0.695	0.0429	0.638	0.741
Rq	µm	Filtro gaussiano, 0.8 mm	0.902	0.043	0.841	0.933
Rsk		Filtro gaussiano, 0.8 mm	0.223	0.448	-0.387	0.677
Rku		Filtro gaussiano, 0.8 mm	4.20	0.664	3.27	4.76
Parâmetros de proporção de material - Perfil de aspereza						
Rmr	%	c = 1 µm sob o pico mais alto, Filtro gaussiano, 0.8 mm	0.534	0.396	0.219	1.09
Rdc	µm	p = 20%, q = 80%, Filtro gaussiano, 0.8 mm	1.32	0.143	1.18	1.52

Figura 25 - Tela de resultado perfilômetro.
Fonte: Autoria Própria.

Neste quesito, seguindo a norma ISO 4287, a qual rege às atribuições geométricas dos produtos, existe diversos parâmetros para a classificação da rugosidade:

- O primeiro parâmetro que é constatado é o Rp, é a altura máxima do pico do perfil, ou seja, é a maior altura dos picos do perfil ao longo do comprimento da amostra.
- O segundo parâmetro de comparação é o Rv, é a profundidade máxima do vale do perfil, ou seja, a maior profundidade do vale do perfil no comprimento da amostra.
- O terceiro parâmetro é Rz, é a altura máxima do perfil, sendo que consiste da soma da altura máxima do pico do perfil e da maior profundidade dos vales do perfil, ao longo do comprimento da amostra.
- O quarto parâmetro é Rc, é a altura média dos elementos do perfil, ou seja, a altura média do perfil no comprimento da amostra.
- O quinto parâmetro é Rt, é a altura total do perfil, que consiste na soma das maiores alturas de pico do perfil e das maiores profundidades dos vales do perfil ao longo do comprimento da amostra.

- O sexto parâmetro é Ra, é o desvio aritmético médio do perfil avaliado, sendo calculado pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas Z(x) ao longo do comprimento da amostra, segundo a equação 2.1.

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |Z(x)| dx \quad (2.1)$$

- O sétimo parâmetro é Rq, é o desvio médio quadrático do perfil avaliado, ele é calculado pela raiz quadrada da média dos valores das coordenadas, Z(x), ao longo do comprimento da amostra, segundo a equação 2.2.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L Z^2(x) dx} \quad (2.2)$$

- O oitavo parâmetro é Rsk, é o fator de assimetria do perfil avaliado, sendo calculado pelo quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas Z(x) e Rq ao cubo ao longo do comprimento da amostra.
- O nono parâmetro é Rku, é o fator de achatamento do perfil avaliado, sendo calculado pelo quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas elevadas à quarta potência e o valor de Rq também elevado a quarta potência, ao longo do comprimento da amostra.
- O décimo e o décimo primeiro parâmetros são relacionados com a proporção do material, contudo não serão abordados devido a não ter relevância para o estudo conduzido.

Outro parâmetro constatado são as formas de classificar a rugosidade:

- Mean: A palavra vem do inglês e significa a média dos valores da respectiva rugosidade;
- Std dev: A palavra vem do inglês e significa desvio padrão, ou seja, ela mostra o quanto existe de variação dos dados;
- Min: É o valor mínimo da determinada rugosidade;
- Max: É o valor máximo da determinada rugosidade.

Segundo CHIU, com base no desvio aritmético médio do perfil avaliado podem ser identificados 3 estágios de mudança da rugosidade:

- No primeiro estágio (estágio inicial), Ra aumenta quase linearmente com o tempo de teste;
- No segundo estágio (estágio de transição), a taxa descrese até que o terceiro estágio (estágio estacionário);
- No terceiro estágio Ra permanece constante.

De acordo com outros estudos o primeiro estágio coincide aproximadamente com o estágio de incubação do material, o segundo estágio aproximadamente coincide com o estágio da aceleração e o terceiro estágio aproximadamente coincide com a taxa de erosão máxima definida pelo padrão ASTM G32, sendo este o padrão utilizado para o teste de erosão.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa caracteriza-se por ser aplicada e também exploratória, sendo que num olhar científico a pesquisa apresenta embasamento em dados obtidos por meio de experimentos com isso é classificada com um método científico indutivo.

Dentro da metodologia, pode-se dividir a mesma em diferentes etapas, primeiramente teve-se a escolha do material, posteriormente se passou a preparação do material para a realização então dos testes de cavitação e depois a realização de respectivos ensaios para a caracterização por meio da microdureza e da perfilometria ótica, conforme o esquema da Figura 26.

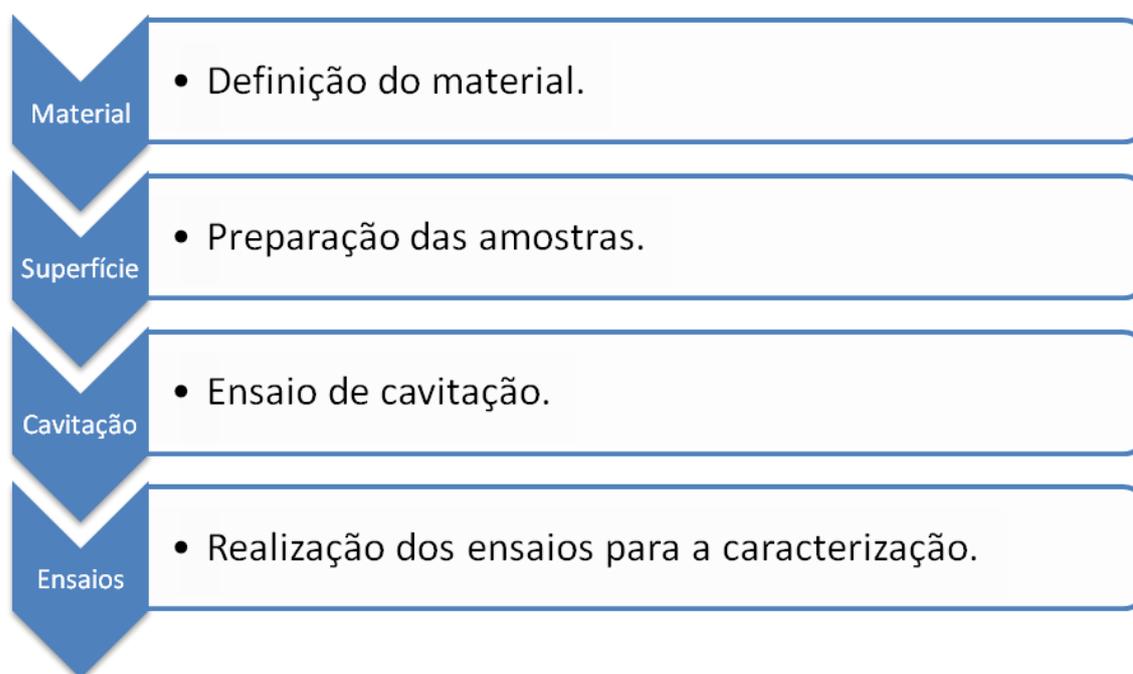


Figura 26 - Esquemática do processo.
Fonte: Autoria própria

3.1 DEFINIÇÃO DO MATERIAL

Optou-se por um aço inoxidável austenítico da série 300, que são os aços que possuem de 16 – 25 % de cromo e 7 – 22 % de níquel entre outras ligas, em virtude da constância das propriedades mecânicas e por apresentar microestrutura monofásica austenítica de elevada resistência à cavitação e de grande utilização em componentes sujeitos a cavitação.

Dentro da série 300 selecionou-se o aço inoxidável austenítico 304, que é responsável por cerca de 50% das aplicações dos aços inoxidáveis em geral, devido a sua excelente combinação de resistência a corrosão e o custo não ser elevado, sendo que seu uso é principalmente na área farmacêutica e alimentícia.

3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.

A partir de uma barra especificada, segundo os padrões AISI para um aço inoxidável 304, foram seccionados corpos de prova com o auxílio de uma policorte refrigerada com discos abrasivos, obtendo assim corpos de prova de dimensões de aproximadamente 30 x 20 x 10 mm.

Na sequência foi realizado a preparação na lixadeira e politriz semi-automática da marca Buehler com lixas de carbeto de silício (SiC) com granulometria de 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh respectivamente. O polimento com suspensão de diamante de 3, 025 e 0,1 μm , e por fim com sílica coloidal 0,04 μm com rotação de 400 rpm (lixamento) e 150 rpm (polimento).

3.3 ENSAIO DE CAVITAÇÃO

O ensaio foi realizado pelo método vibratório atendendo a norma ASTM G32/03 modificado para o modo indireto este ensaio consiste na colocação do corpo de prova a 500 μm de distância da ponta do sonotrodo que fornece uma oscilação variável de amplitude, em quatro faixas, 50, 60, 70 e 80 % da amplitude máxima de 60 μm realizando 30, 36, 42 e 48 μm de amplitude total. A frequência de oscilação é de aproximadamente 20 kHz com o controle realizado pelo equipamento da marca Qsonica modelo Q700. O líquido envolvido no processo é a água deionizada, com uma temperatura controlada de 19°C, sendo as amostras imersas a uma profundidade de 12,5 mm.

O tempo adotado de ensaio foi de 18 horas para cada amostra, sendo que foram realizadas pesagens periódicas a cada 2 horas com o auxílio de uma balança analítica da marca Shimadzu modelo AW220, porém como uma forma de limpeza mais aprofundada da amostra, é utilizada a limpeza por ultrassom por meio do equipamento da marca Thornton, modelo T7, por aproximadamente 5 minutos. Após

a pesagem todas as amostras foram caracterizadas quanto as rugosidade em um perfilômetro ótico 3D.

3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios de caracterização do material foram realizados após a realização do ensaio de cavitação, para assim poder se caracterizar o processo de perda de massa e as modificações superficiais impostas pelo ensaio de cavitação em diferentes amplitudes, as diferenças macro e microscópicas da amostra, sendo eles:

3.4.1 Microdureza

O primeiro ensaio que foi realizado para a caracterização da amostra consiste no ensaio para a especificação da microdureza por meio do equipamento da marca Time modelo MHV-1000 utilizando a escala Vickers, tendo como comparação a região afetada pelo ensaio de cavitação acelerada e a região que não foi exposta, o aparelho funciona de maneira que utiliza cargas de 100 gf quando se faz necessária uma análise superficial da microdureza e quando se exige uma análise mais profunda da microdureza, a máquina é operada com carga de 300 gf para realizar identações com um penetrador de diamante em um formato de pirâmide de base quadrangular.

O ensaio foi realizado seguindo um determinado procedimento, após a escolha do local em que será realizada a amostragem, são realizados 9 identações, sendo todas as uma distância fixa especificada formando desse modo um quadrado de 3 por 3 pontos, sendo que com esses dados é realizada uma média com o intuito de avaliar somente amostras com mesma dureza.

3.4.2 Perfilometria ótica

Com o uso do perfilômetro ótico 3D da marca Taylor Hobson CCI Lite, pode-se observar a rugosidade e o perfil da superfície desgastada, por meio de diferentes

aumentos 10x e 50x, podendo também fazer o uso da rugosidade linear, dependendo do que se deseja obter da caracterização.

No presente estudo foi utilizado o aumento de 10x e com a devida sequência de teste caracterização da rugosidade a cada 2 horas de ensaio sendo que o tempo total de ensaio foi de 18 horas, retendo esse processo para todas as amplitudes.

Um aspecto importante de ser frisado é que sempre que foi utilizado o perfilômetro teve-se o controle do ambiente, por meio do cuidado para que nenhum usuário do laboratório chegasse próximo do equipamento durante a caracterização devido a ser um equipamento extremamente sensível, e quando eventualmente acabava acontecendo a amostragem era refeita de imediato.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho de conclusão de curso foram avaliados os efeitos da mudança de amplitude do teste de cavitação segundo a norma ASTM G32/03 modificado para o modo indireto, para um aço Inox 304.

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As condições térmicas foram controladas para evitar que os resultados, tanto do teste de cavitação quanto dos métodos de caracterização como a pesagem, a microdureza, a microscopia ótica e a perfilometria ótica, não fossem satisfatórios ou que fossem influenciados por variações de temperatura exteriores.

4.1.1 Coleta de dados por pesagem

Na Figura 27 tem-se a taxa de perda de massa em função do tempo de teste total para todas as amostras e depois na Figura 28 tem-se a evolução da perda acumulada de todas as amostras ao longo do tempo total.

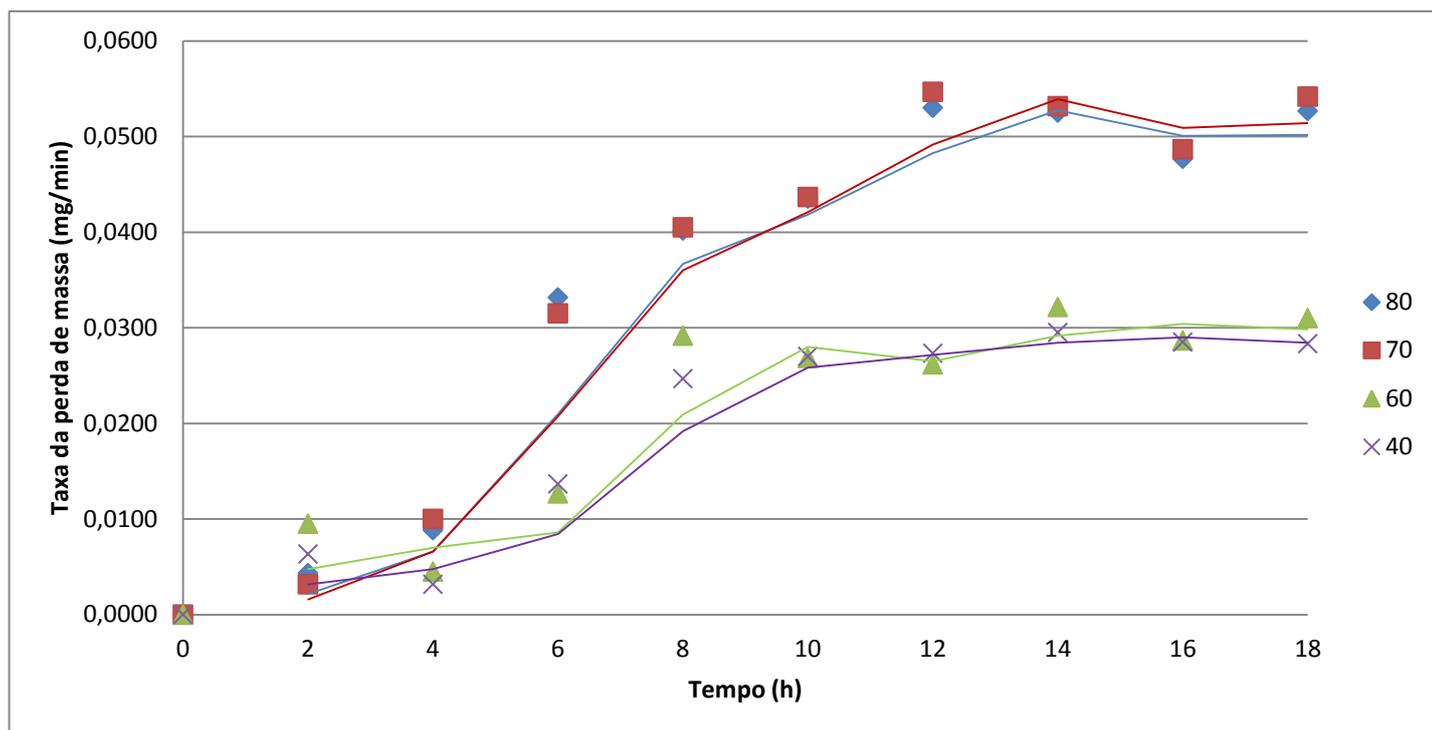


Figura 27 - Evolução da taxa de perda de massa na primeira preparação de amostras.
Fonte: Autoria própria.

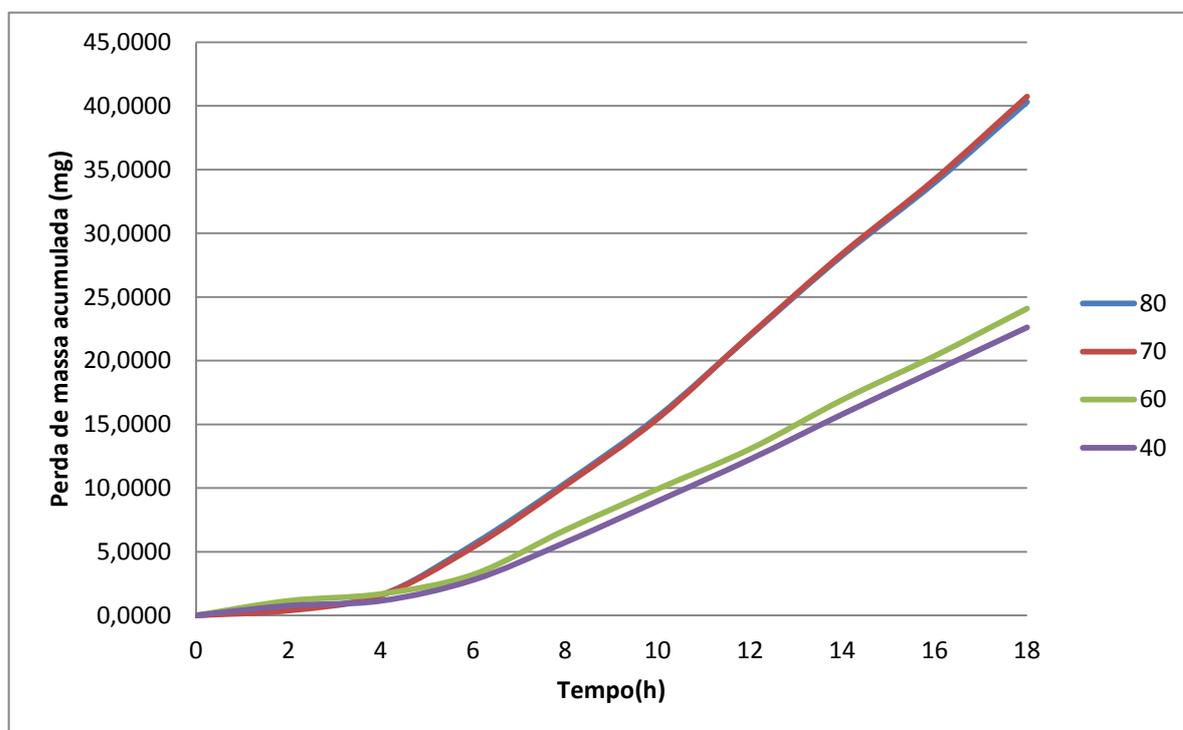


Figura 28 - Evolução da perda de massa acumulada na primeira preparação de amostras.
Fonte: Autoria própria.

Como pode ser constatado nos gráfico acima os corpos de prova que foram expostos às amplitudes de vibração de 80 e 70 acabaram possuindo valores muito próximos, assim como os valores das perdas de massa acumuladas referentes às amplitudes de vibração de 60 e 40.

Depois de um estudo aprofundado do problema, chegou-se a conclusão que isso ocorreu pelo fato de os corpos de prova possuírem uma variação de dureza muito elevada, dessa forma as amostras não tiveram dados com uma correlação muito clara como é possível constatar na Tabela 2.

Tabela 2 - Dureza das amostras ao longo das amplitudes
Fonte: Autoria Própria.

Amplitudes	1º Preparação de Amostras	2º Preparação de Amostras
40	282 HV	332 HV
60	356 HV	310 HV
70	277 HV	320 HV
80	293 HV	315 HV

Então com o devido controle para que essa situação não se repetisse, conforme a Tabela 2, tem-se as Figuras 29 e 30 referente ao segundo conjunto de teste, com amostras sem uma grande variação das durezas, para desse modo poder além de ter um controle melhor da perda de massa, também ter um controle mais apurado dos efeitos na rugosidade que também serão abordados no decorrer deste capítulo.

O primeiro gráfico na Figura 29 é referente a evolução da taxa de perda de massa ao longo do tempo total e o segundo gráfico na Figura 30 é o gráfico referente à evolução da perda de massa acumulada ao longo também do tempo total de teste de cavitação.

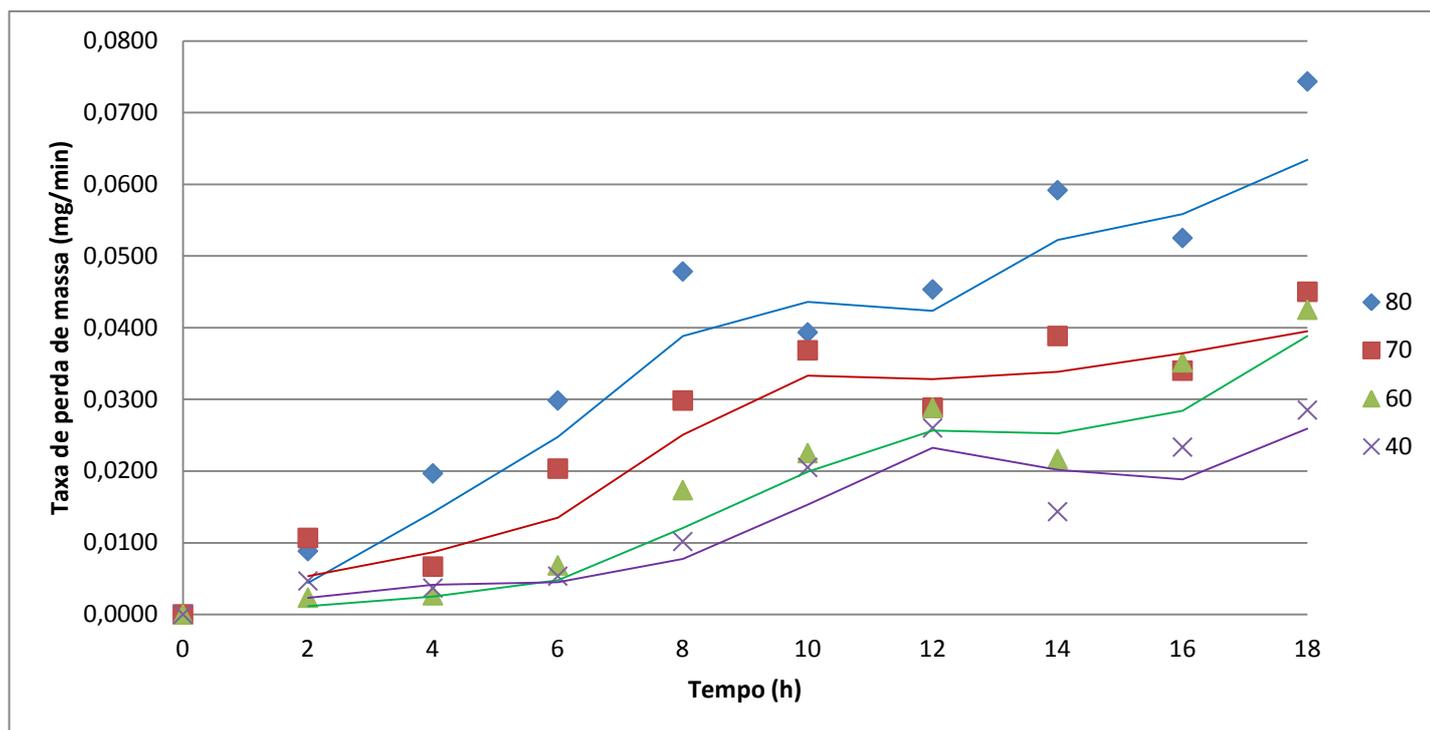


Figura 29 - Evolução da taxa de perda de massa na segunda preparação de amostras.
Fonte: Autoria Própria.

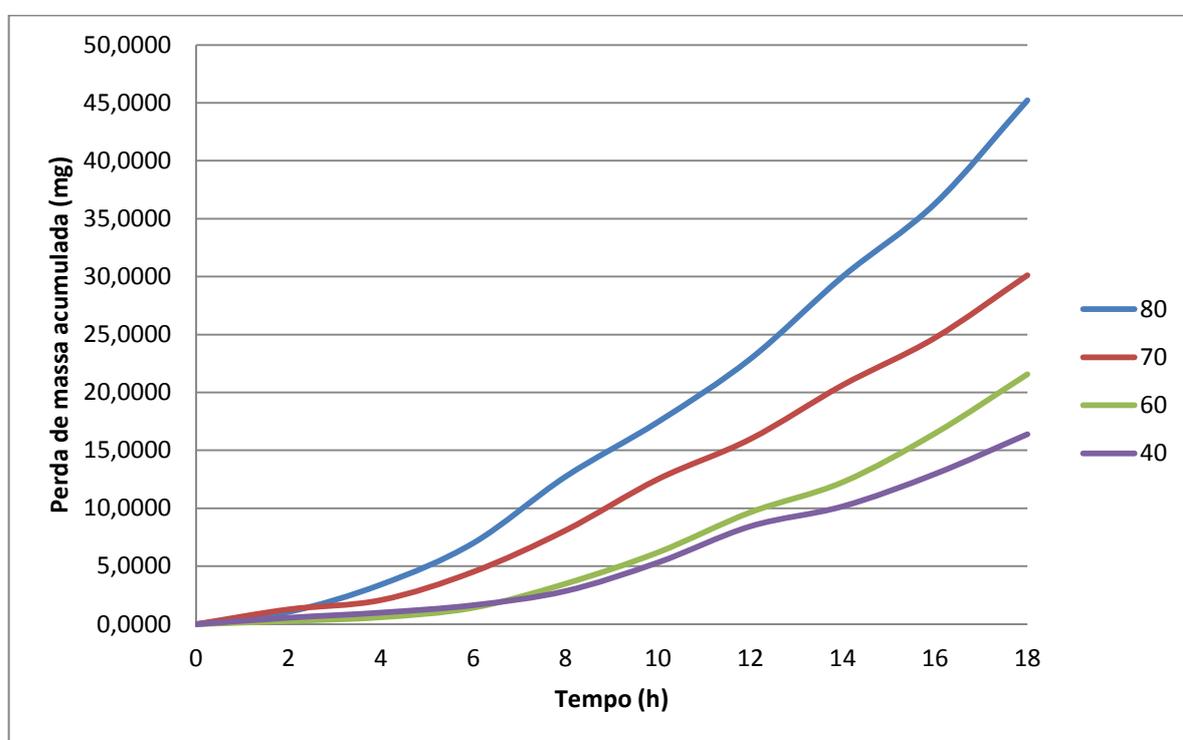


Figura 30 - Evolução da perda de massa acumulada na segunda preparação de amostras.
Fonte: Autoria própria.

De posse do gráfico da Figura 30, pode-se analisar então de uma maneira bem clara a diferença entre a evolução da perda de massa acumulada para um mesmo material ao longo de 18 horas de ensaio em 4 diferentes amplitudes do equipamento.

A maior perda de massa, segundo o gráfico, é a amplitude de 80, a que teve a segunda maior perda de massa foi o corpo de prova exposto a uma amplitude de 70, a terceira maior perda de massa foi o corpo de prova que teve seu ensaio na amplitude de 60 e então o corpo de prova de menor perda de massa foi o corpo de prova que teve como amplitude 40.

Também foi possível dentro do gráfico determinar aproximadamente as áreas de perda de massa das amostras, conforme é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Períodos de incubação e acumulação das amostras.
Fonte: Autoria Própria.

Amplitudes	Incubação (horas)	Acumulação (horas)
40	0-8	8-18
60	0-6	6-18
70	0-4	4-18
80	0-2	2-18

Seguindo os gráficos e os conceitos dos trabalhos de Hattori (2003), Pohl (2002) e Knapp (1970) foi possível apenas constatar duas regiões, a primeira a área referente à incubação, onde o material possui uma perda de massa muito pequena que variou de acordo com a amplitude que a amostra foi exposta, de forma que quando existe um aumento no período de incubação, uma diminuição da amplitude é constatada.

Então se tem a fase da acumulação, que conforme a revisão bibliográfica é a fase que ocorre a maior taxa perda de massa que é seguida de duas fases que não foram possíveis de serem constatadas. Primeiramente a fase da atenuação onde ocorre um decréscimo na taxa de perda de massa e por fim a estabilidade onde a taxa de perda de massa torna-se aproximadamente constante.

4.1.2 Coleta de dados por perfilometria ótica

4.1.2.1 A influência das rugosidades ao longo do tempo

Os resultados fornecidos pelo equipamento, sendo que o controle de rugosidade foi feito a cada duas horas de processo, é apresentado na forma de gráficos nas Figuras 31, 32, 33 e 34 nas respectivas amplitudes de 80, 70, 60 e 40 e sempre se baseando na média dos valores ao longo da região aonde o equipamento realizou a leitura.

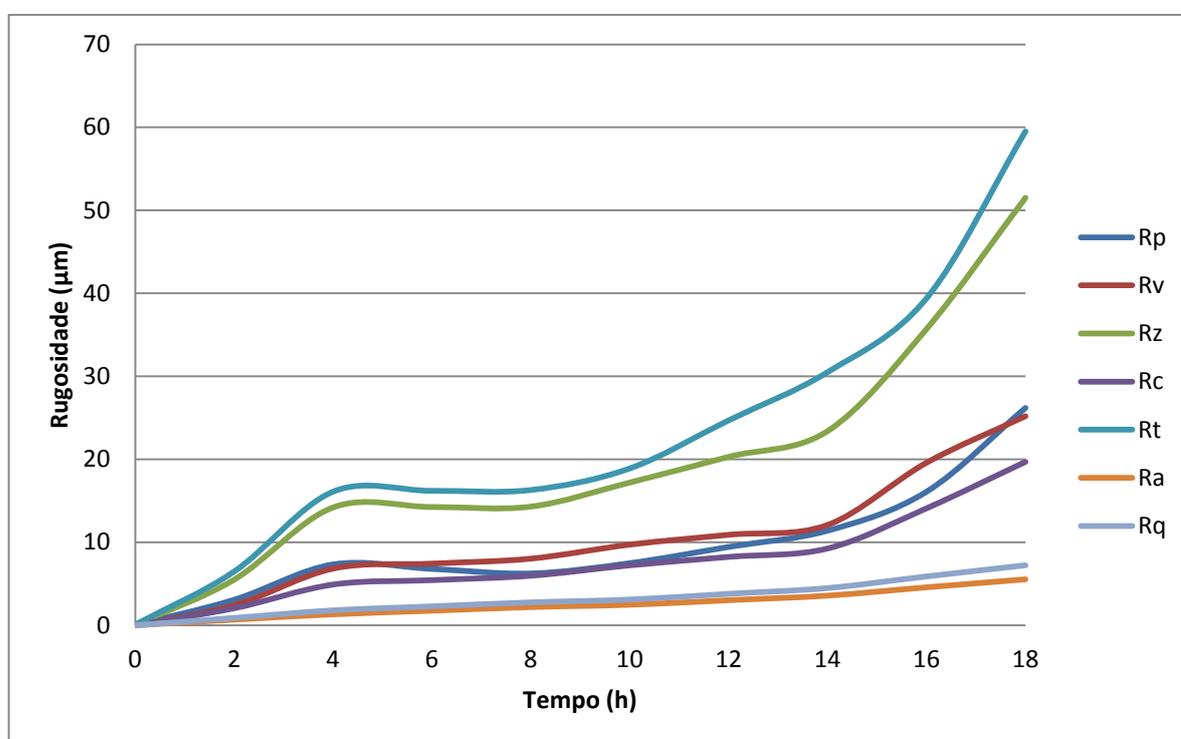
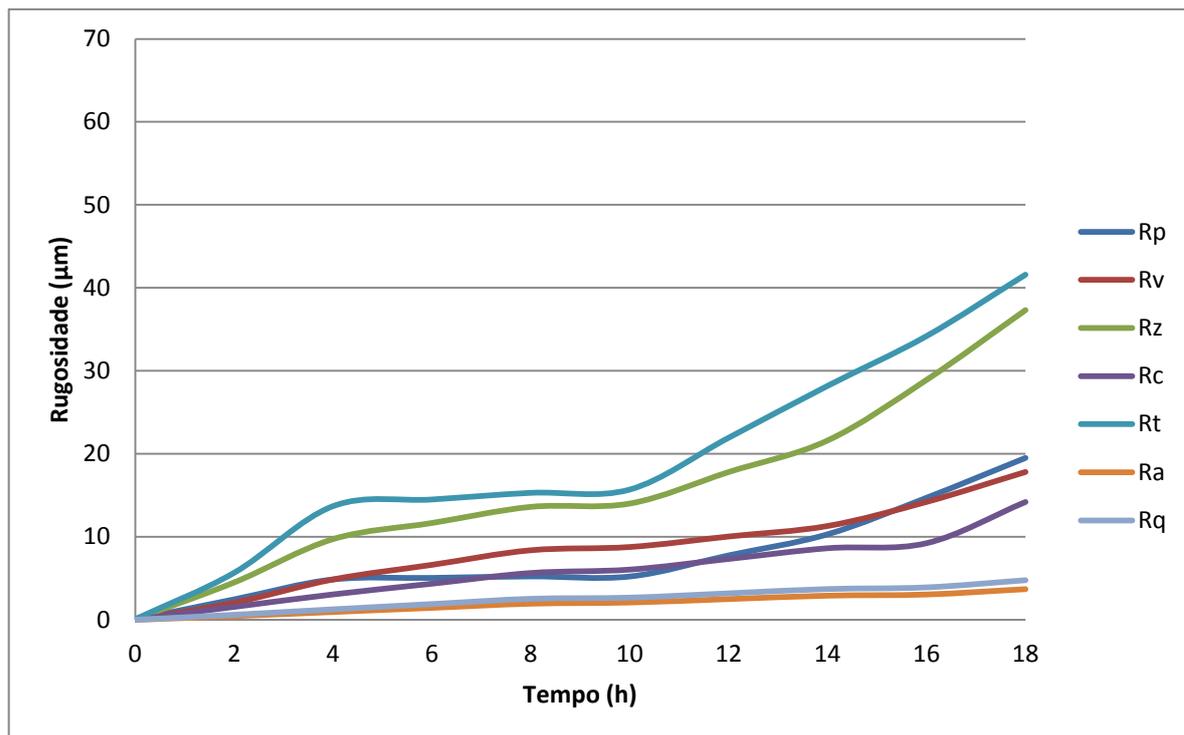


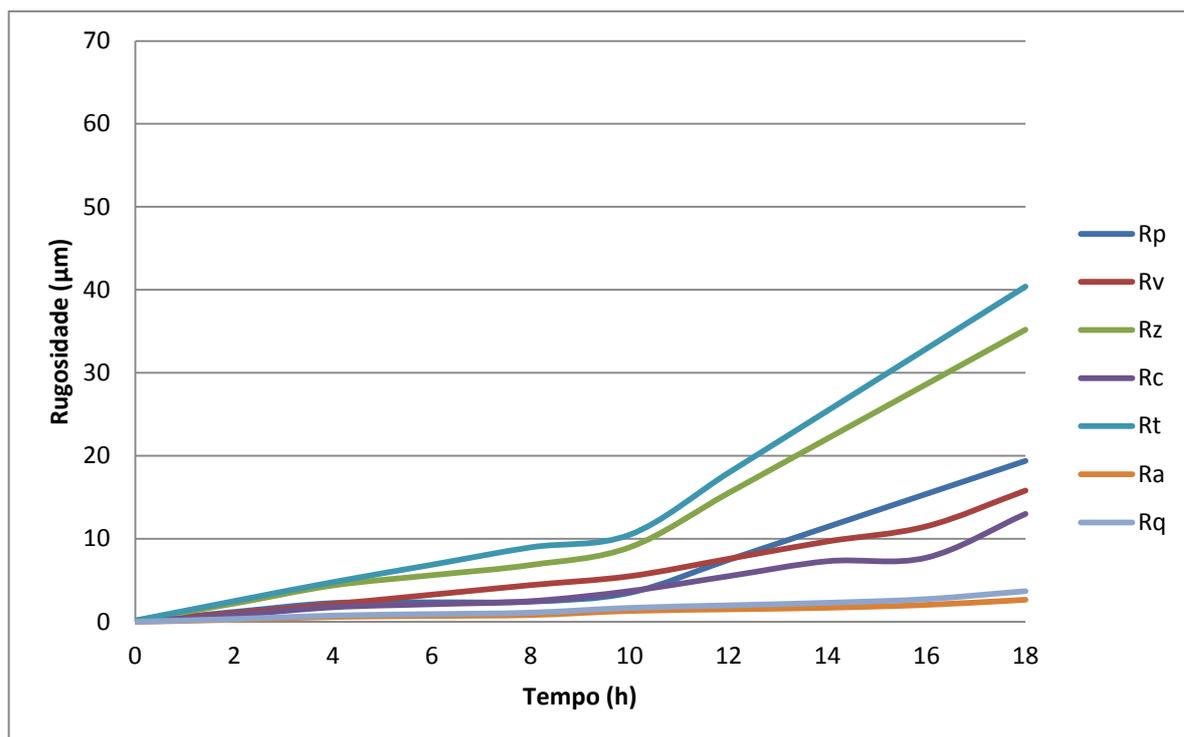
Figura 31 - Evolução das rugosidades na amplitude de 80.
Fonte: Autoria Própria

Como é possível constatar pela Figura 31, o gráfico da rugosidade segue o que foi estabelecido por Chiu (2005), contendo uma primeira fase onde as rugosidades aumentam linearmente, seguido de um momento onde a taxa de aumento de Ra decresce, seguido do momento onde ele continua em um aumento constante.



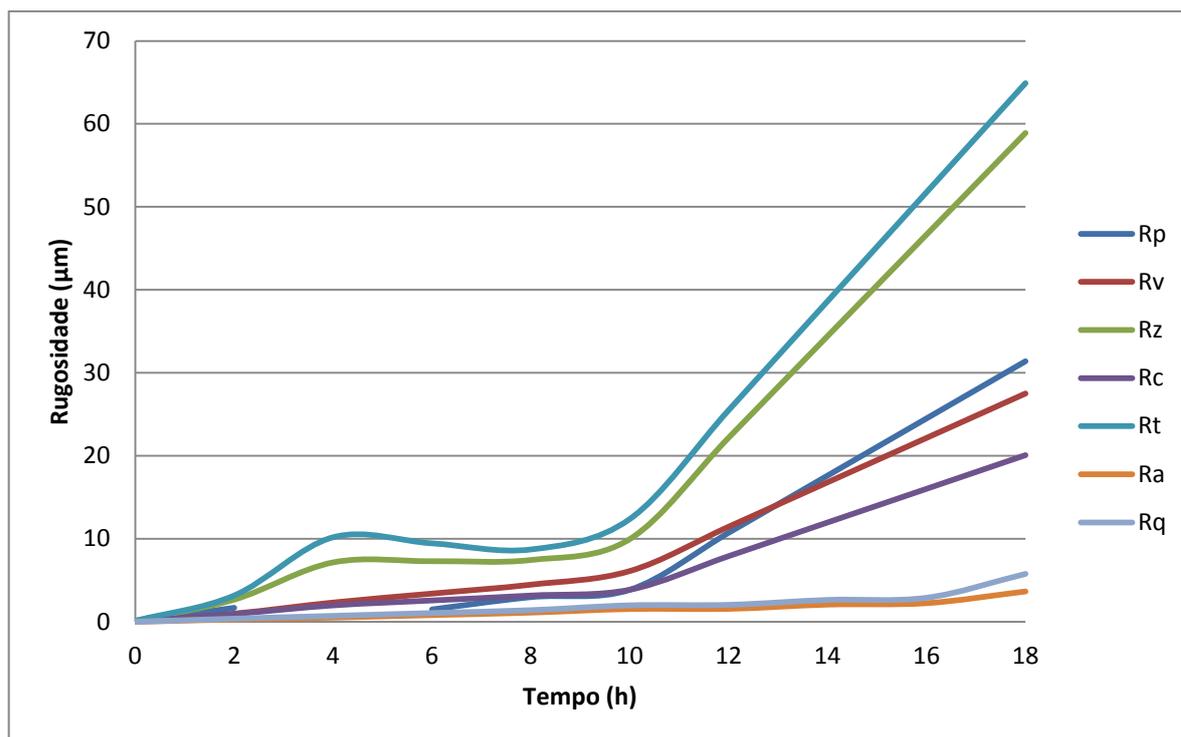
**Figura 32 - Evolução das rugosidades na amplitude de 70.
Fonte: Autoria Própria.**

Como pode ser constatada na Figura 32, a rugosidade segue o que foi estabelecido anteriormente, sendo que existe as 3 fases descritas, a primeira com um aumento das rugosidades, seguido de uma segunda fase que a taxa de aumento decresce então com a terceira fase com um aumento constante das rugosidades.



**Figura 33 – Evolução das rugosidades na amplitude de 60.
Fonte: Autoria Própria.**

Na Figura 33, pode-se constatar a existência das 3 fases descritas anteriormente, contudo a segunda fase com um aumento decrescente é menor que as amplitudes anteriores e a terceira fase onde o aumento é constante acaba se tornando maior que o que pode se constar nos gráficos expostos anteriormente.



**Figura 34 – Evolução das rugosidades na amplitude de 40.
Fonte: Autoria Própria.**

Na Figura 34 é possível destacar todas as fases, que anteriormente foram explicitadas, notando-se que existe uma taxa maior de diminuição da rugosidade na segunda fase seguido da terceira fase com um aumento constante muito maior que os encontrados anteriormente, fazendo desse modo com que no fim do teste uma rugosidade extremamente alta foi encontrada levando em consideração o nível de amplitude utilizado, podendo ser fruto da imperícia em manusear o equipamento ou uma região que apresentava algum tipo de defeito de fabricação.

Com base nos gráficos das Figuras 31,32, 33 e 34 é possível tecer alguns comentários no que diz respeito à influência da variação da amplitude nas rugosidades, desconsiderando alguns picos, conforme é aumentado o valor da amplitude de vibração, as rugosidades aumentam de uma forma proporcional.

4.1.2.2 Avaliação da variação dos parâmetros de rugosidade com diferentes valores de amplitudes

Como uma forma de ressaltar a importância que a variação da amplitude tem sobre o ensaio de cavitação foram traçados gráficos utilizando dois parâmetros específicos de rugosidade Ra que é o desvio médio do perfil avaliado e Rq que é o desvio médio quadrático do perfil avaliado, devido que segundo estudos que fazem a uso da comparação dos parâmetros de rugosidade como Chiu (2005), Espitia (2010) e Pohl (2002), em sua maioria faz uso desses parâmetros.

Primeiramente tem-se o gráfico da Figura 35, que faz a comparação dos Rq ao longo do tempo total de teste entre as diferentes amplitudes de vibração.

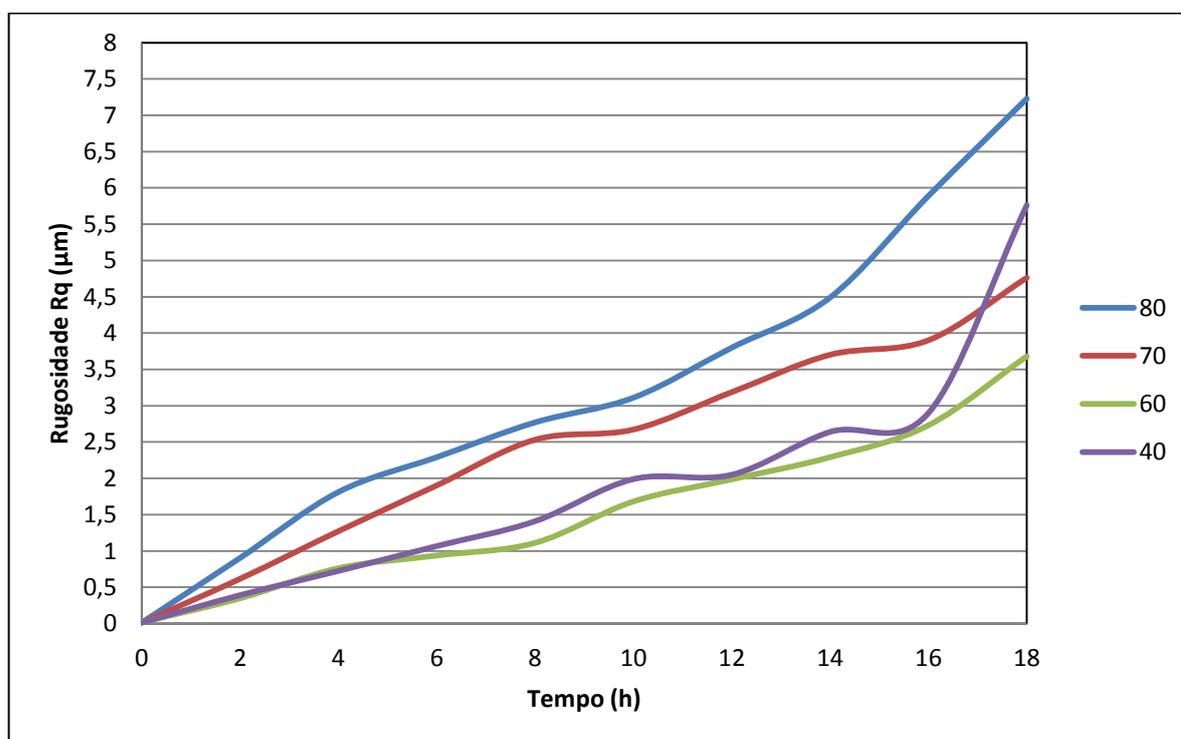


Figura 35 – Desvio médio quadrático ao longo das amplitudes.
Fonte: Autoria própria.

Com base no gráfico da Figura 35 é possível constatar a evolução desse parâmetro de rugosidade ao longo das amplitudes e o aumento da rugosidade com o aumento da amplitude de vibração do processo de cavitação.

Além do desvio médio quadrático o desvio médio do perfil avaliado é também um parâmetro usual na comparação de dados envolvendo as rugosidades das amostras, conforme é constatado no gráfico da Figura 36.

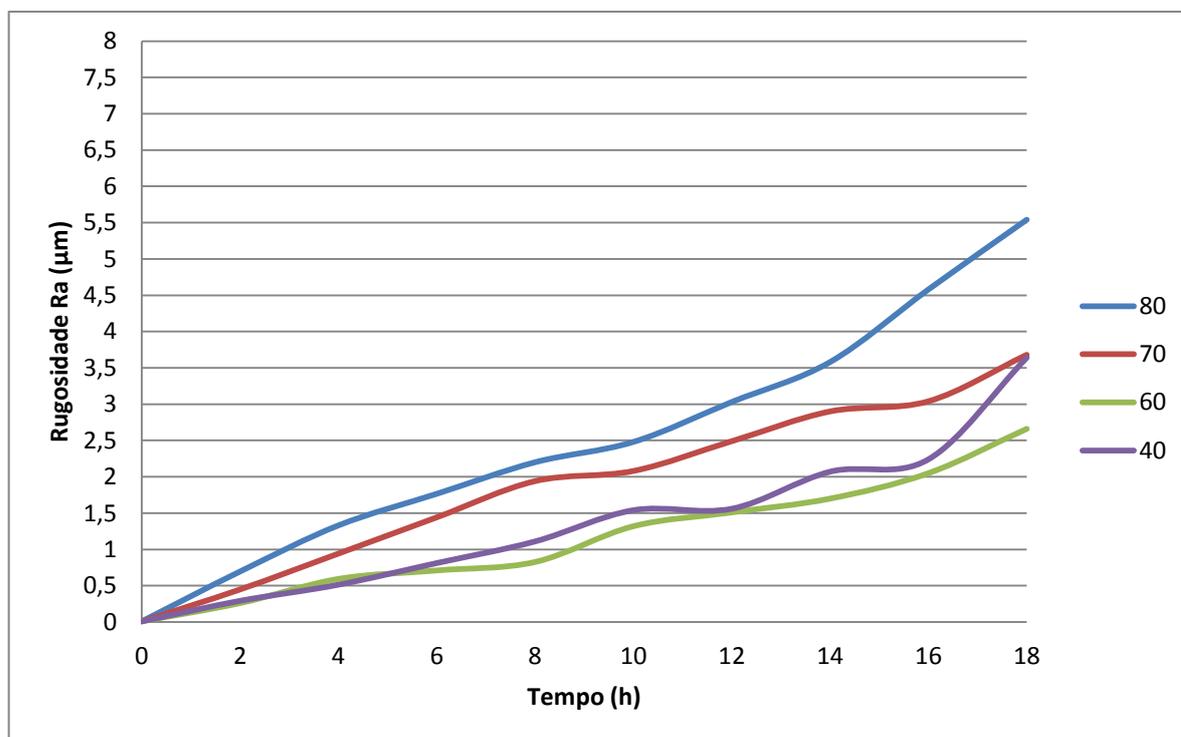
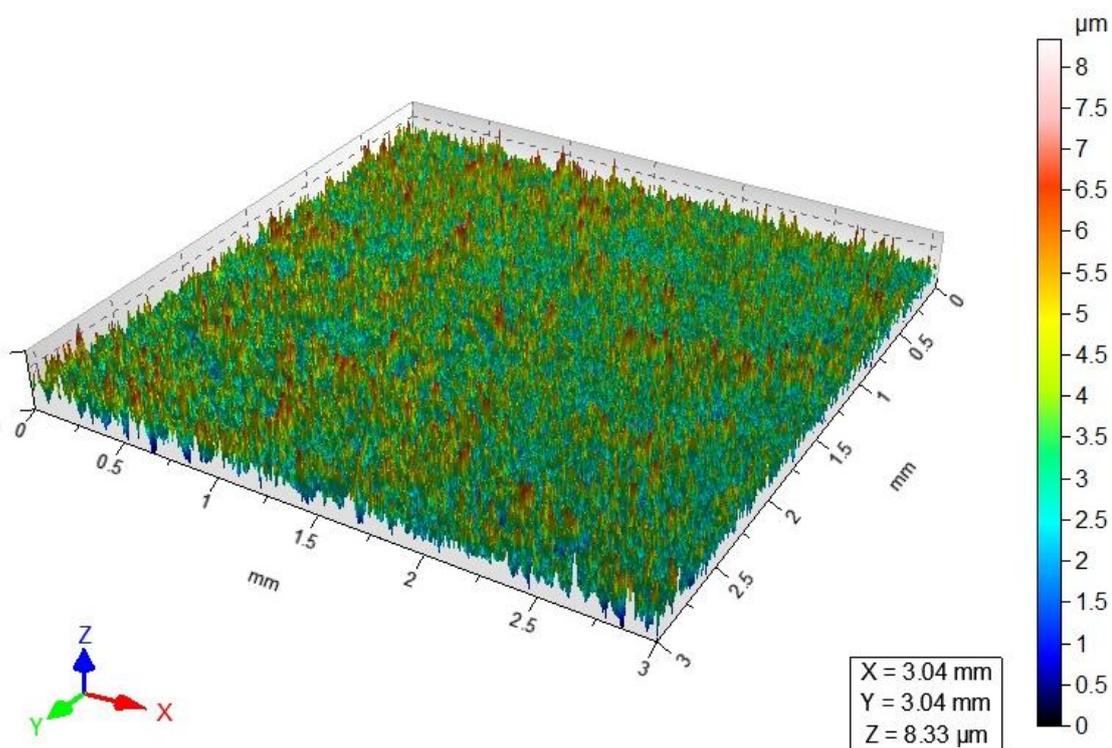


Figura 36 - Desvio médio do perfil ao longo das amplitudes.
Fonte: Autoria própria.

Com o auxílio da Figura 36 é possível constatar que quando acontece um aumento da amplitude de vibração do teste de cavitação a tendência é um aumento do desgaste e dessa forma um aumento também da rugosidade e outra característica citada por Pohl (2002) é o padrão entre estes dois parâmetros durante a exposição à cavitação, acabando por apresentar um formato da curva similar e também no que diz respeito aos estágios de cavitação que acabam sendo próximos, corroborando para a validação do que foi constatado.

4.1.2.3 A evolução da cavitação por meio de imagens 3D

Como um resultado do teste de perfilometria ótica, também são geradas imagens em 3D dos corpos de prova, dessa forma para um maior entendimento são apresentadas na Figura 37 um comparativo entre as 2 horas de cavitação e 18 horas com a amplitude de 80.



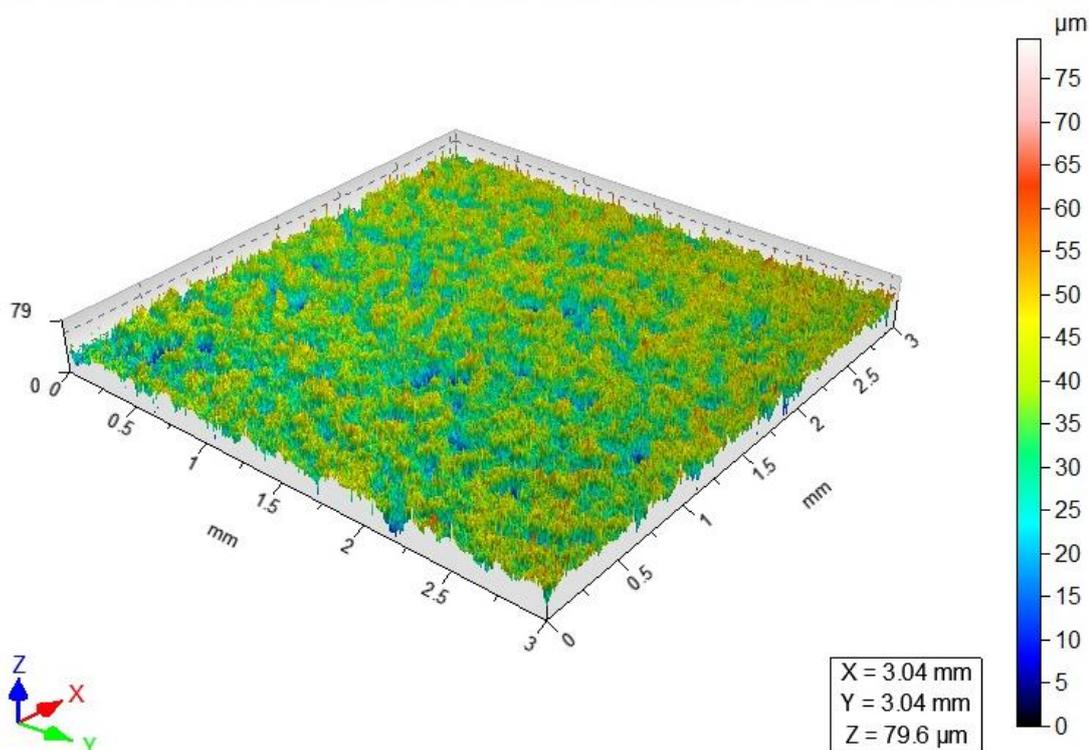


Figura 37 - Comparativo entre região com 2 horas de cavitação e região com 18 horas de cavitação

Fonte: Autoria Própria.

Primeiramente deve ser registrado que foi desconsiderada a imagem da superfície sem cavitação devido que a unidade de medida da superfície tem uma diferença da casa dos milhares sendo que a escala é de nanômetros na região sem cavitação e a escala na região desgastada é de micrometros, com isso foram escolhidas as regiões com 2 horas de cavitação e 18 horas de cavitação.

Como pode ser notada a região com mais horas de cavitação em todos os casos, desde a amplitude de 40 até a amplitude de 80, possui uma característica mais rugosa, com diversos vales e picos maiores que quando é exposto a um numero menor de horas que no caso é 2 horas, para essa constatação a tem-se as Figuras 38 à 47 da evolução ao longo das horas de ensaio com a imagem 3D gerada pelo perfilômetro.

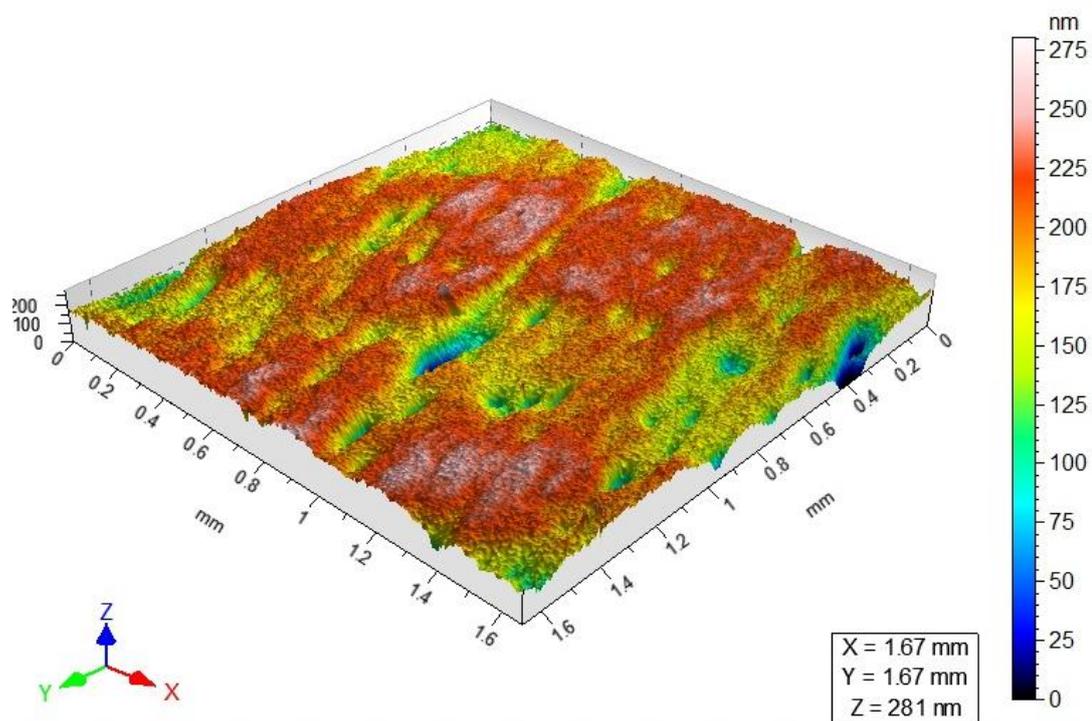


Figura 38 - Zero horas de ensaio de cavitação.
Fonte: Autoria Própria.

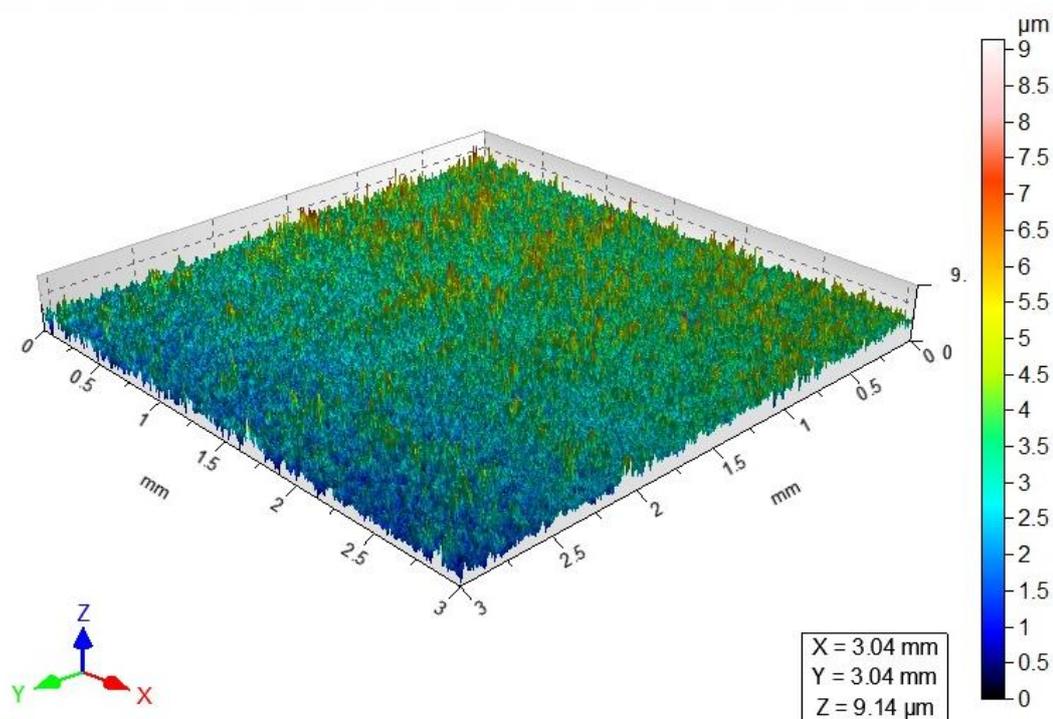


Figura 39 - Duas horas de ensaio de cavitação.
Fonte: Autoria Própria.

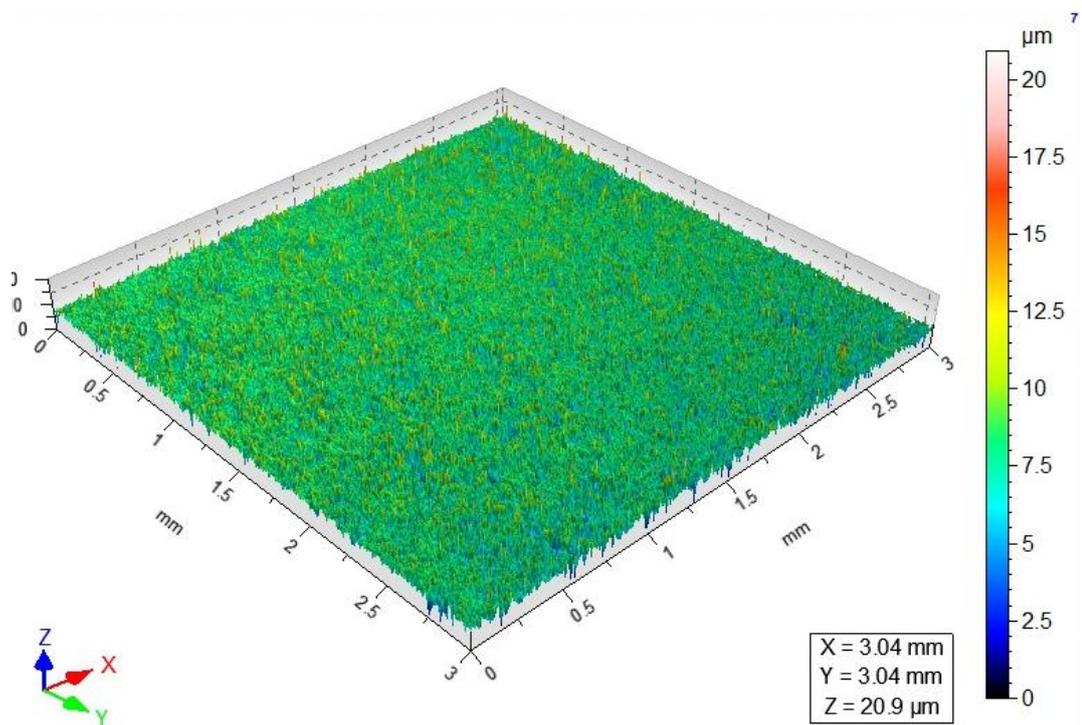


Figura 40 - Quatro horas de ensaio de cavitação.
Fonte: Autoria Própria.

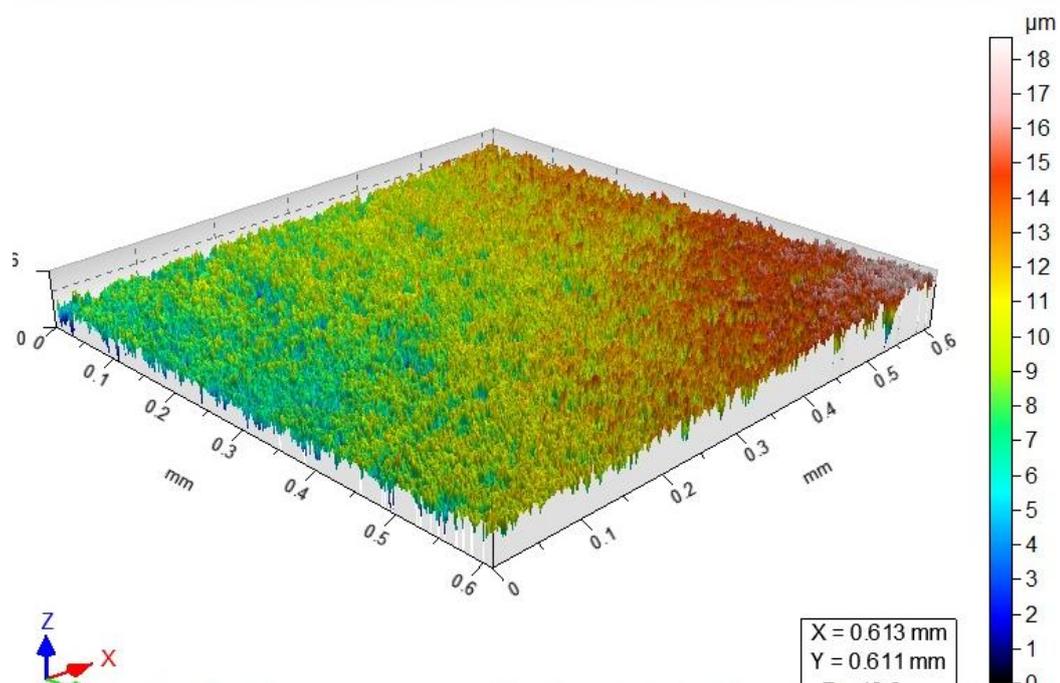


Figura 41 - Seis horas de ensaio de cavitação.
Fonte: Autoria Própria.

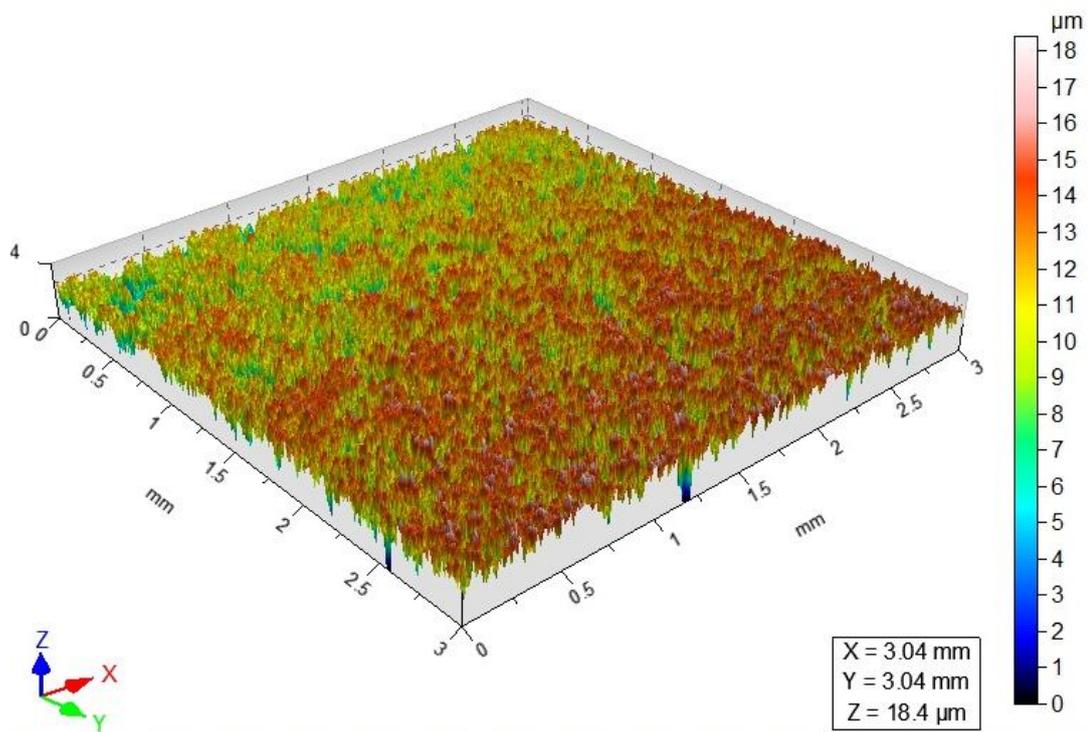


Figura 42 - Oito horas de ensaio de cavitação.
Fonte: Autoria Própria.

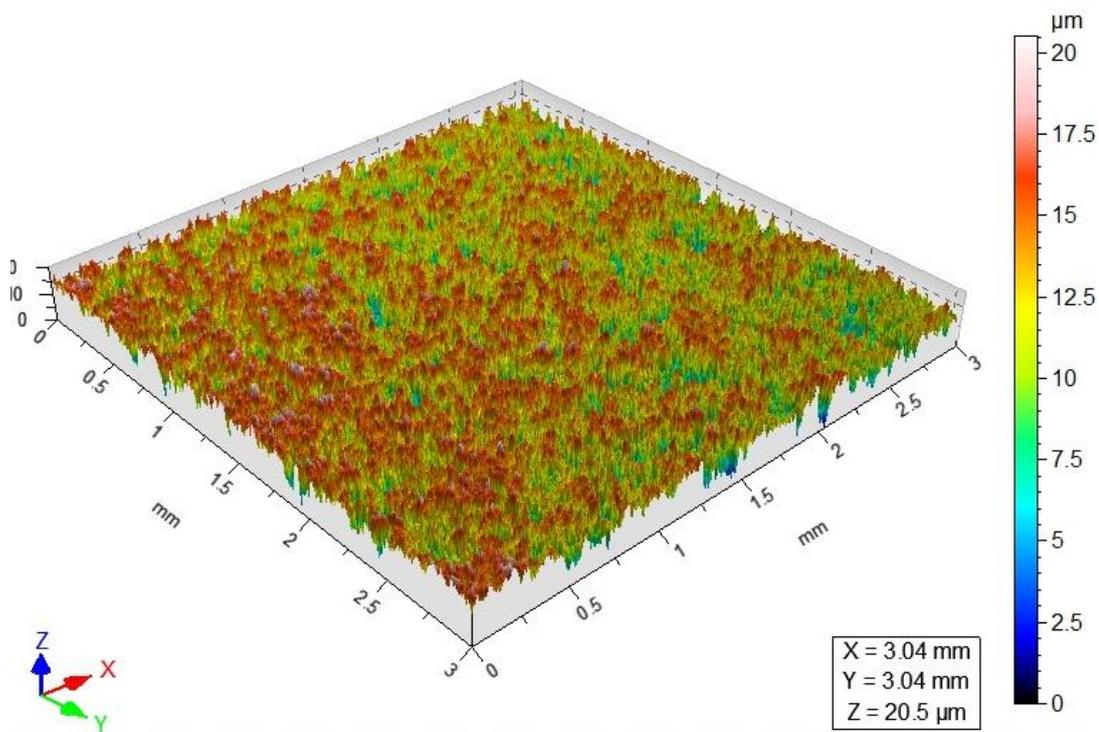


Figura 43 - Dez horas de ensaio de cavitação.
Fonte: Autoria Própria.

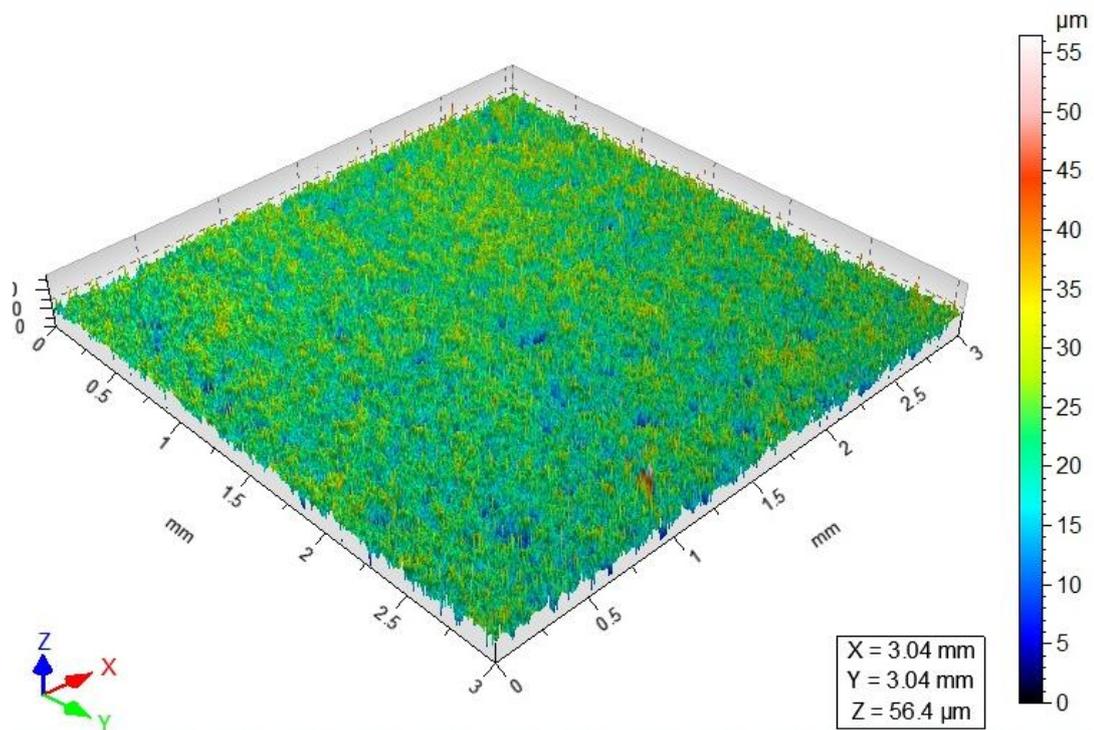


Figura 44 - Doze horas de ensaio de cavitação.
Fonte: Autoria Própria.

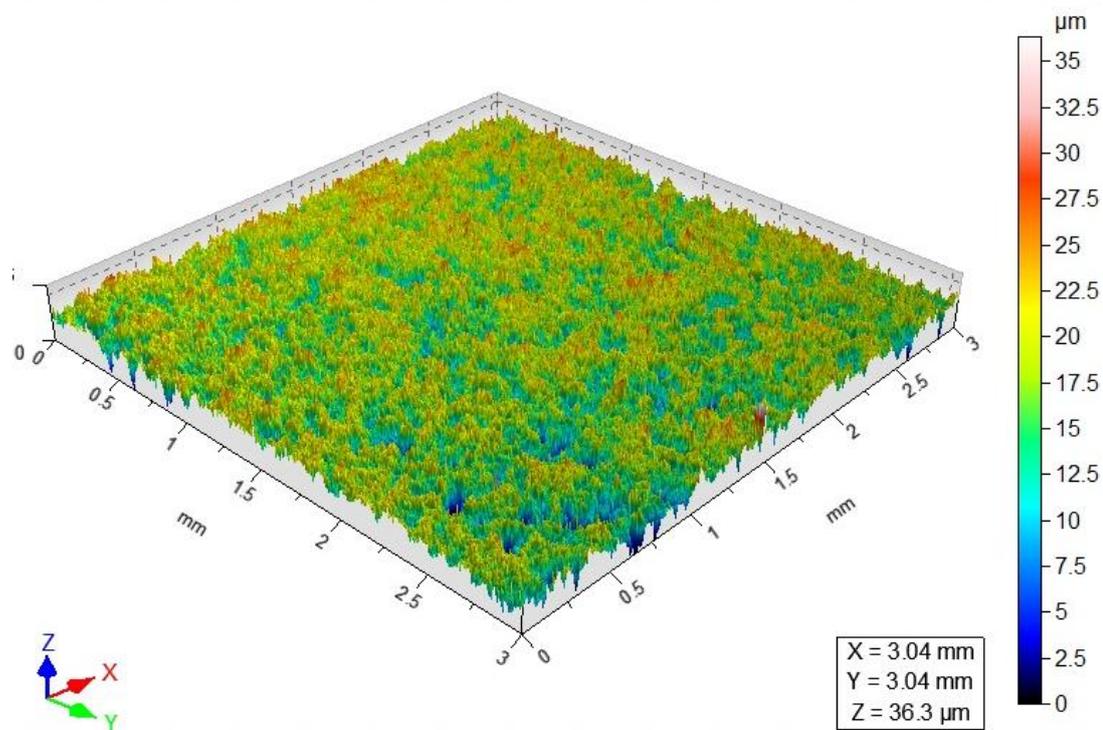


Figura 45 - Quatorze horas de ensaio de cavitação.
Fonte: Autoria Própria.

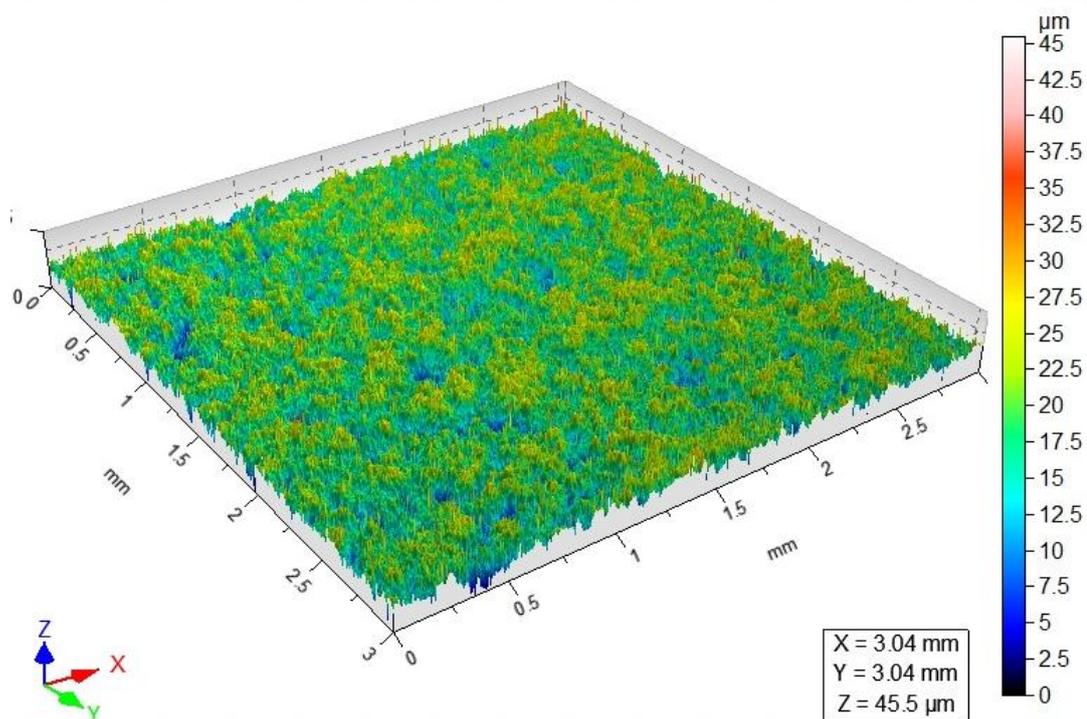


Figura 46 - Dezesesseis horas de ensaio de cavitação.
Fonte: Autoria Própria.

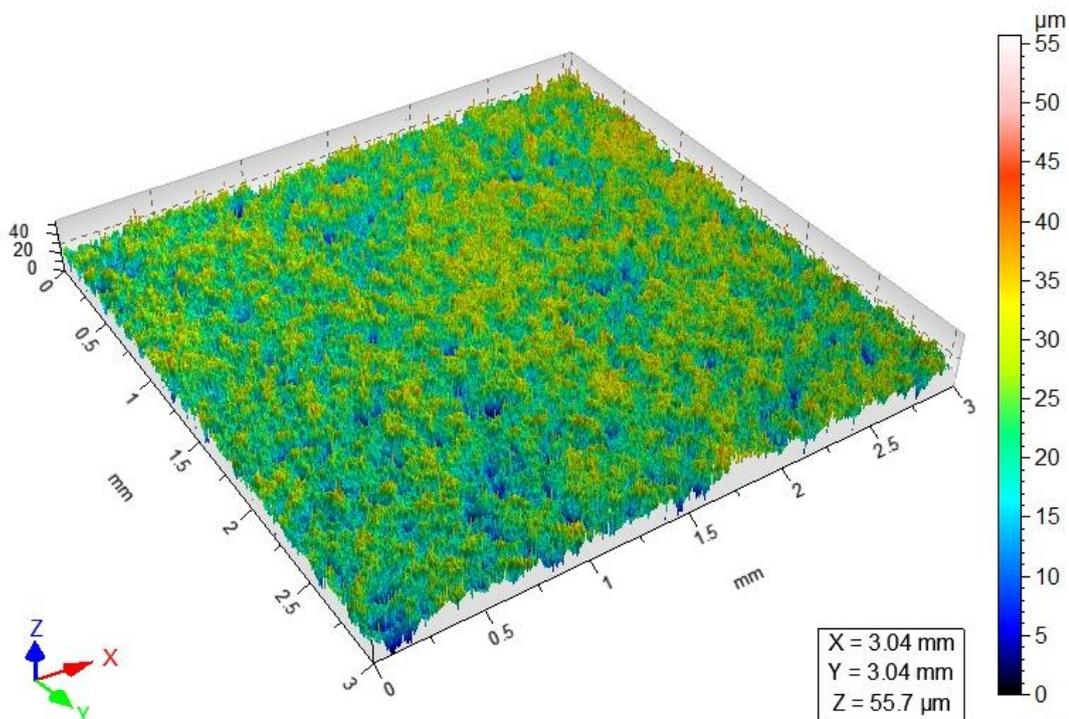


Figura 47 - Dezoito horas de ensaio de cavitação.
Fonte: Autoria Própria.

Foi utilizada a amplitude de 70 para a sequência de Figura 38 até a 47, sendo que fica bem clara a influencia que o tempo tem ao longo do teste de cavitação, sendo assim os conceitos previamente estudados são devidamente comprovados novamente por outro método.

Quando comparado com o método convencional de perda de massa por cavitação, a medida da rugosidade superficial provê um método alternativo e conveniente que possui diversas vantagens:

- Em primeiro lugar, mudanças na rugosidade superficial provem informações sobre as alterações no material antes da perda de massa ser detectada.
- Em segundo lugar não existe restrição para o tamanho do componente, enquanto o estudo que é realizado por meio de pesagem só é utilizado em pequenas amostragens.
- Em terceiro lugar, apenas a área onde realmente acontece o processo é atingida pelo estudo por meio desse método, diferente do método por pesagem, podendo também prover informações a respeito de diferentes locais onde ocorre o processo de cavitação.

5 CONCLUSÕES

A partir deste trabalho pode-se obter as seguintes conclusões foram constatadas:

Observou-se que a dureza da amostra apresentou uma influência significativa no comportamento do aço ABNT 304 quanto a variação da perda de massa com diferentes amplitudes de vibração.

Com a variação da amplitude de vibração houve uma alteração da perda de massa das amostras, de forma que foi possível a relação em que o aumento da amplitude de vibração promoveu um aumento da perda de massa acumulada e da taxa de perda de massa.

Com a variação da amplitude de vibração houve uma alteração no perfil de rugosidades das amostras, de forma que em todas as rugosidades que foram observadas, conforme ocorria um aumento da amplitude de vibração gerava um aumento do perfil de rugosidades.

Devido que conforme acontecia o aumento da amplitude de vibração, as amostras apresentavam um maior desgaste, este desgaste reconhecido pela maior quantidade de picos e vales e as dimensões destes, como visualizado pela observação das imagens 3D e da morfologia das amostras.

6 REFERÊNCIAS

ALLENSTEIN, Ângela Nardelli. **ESTUDO DA RESISTÊNCIA À CAVITAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO CA6-NM NITRETADO POR PLASMA**. 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Ufpr, Curitiba, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

AURET, J.g et al. Cavitation erosion of copper and aluminium in water at elevated temperature. **Tribology International**, África do Sul, p. 421-429. dez. 1993. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0301-679X\(93\)90082-C](http://dx.doi.org/10.1016/0301-679X(93)90082-C)>. Acessoem: 1 jun. 2013.

AVELLAN, François. INTRODUCTION TO CAVITATION IN HYDRAULIC MACHINERY. **The 6th International Conference On Hydraulic Machinery And Hydrodynamics**, Timisoara, n. , p.11-22, 21 out. 2004.

BRENNEN, Christopher E.. **Cavitation and Bubble Dynamics**. California: Oxford University Press, 1995.

6. CALAINHO, José AdalbertoLage et al. CAVITAÇÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS DO TIPO FRANCIS E KAPLAN NO BRASIL. **XvSnptee Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Foz do Iguaçu, n. , p.1-6, 17 out. 1999.

CENGEL, Y.A.; CIMBALA, J.M. Mecânica dos Fluidos – Fundamentos e Aplicações, 1ª Edição, Editora McGrawHill, 2007. AHMED, S.m.; HOKKIRIGAWAB, K.; OBA, R.. Fatigue failure of SUS 304 caused by vibratory cavitation erosion. **Wear**, Japão, p. 129-137. 7 jun. 1994.

CAHN, R.W., Haasen, P., **Physical Metallurgy**, v. 1, Amsterdam: North Holland,1996.

CHIU, K.y.; CHENG, F.t.; MAN, H.c.. Evolution of surface roughness of some metallic materials in cavitation erosion. **Ultrasonics**, Hong Kong, China, p. 713-716. 13 abr. 2005. Disponível em: <[10.1016/j.ultras.2005.03.009](http://dx.doi.org/10.1016/j.ultras.2005.03.009)>. Acessoem: 1 jun. 2013.

CHOI, Jin-keun; JAYAPRAKASH, Arvind; CHAHINE, Georges L.. Scaling of cavitation erosion progression with cavitation intensity and cavitation source. **Wear**, 10. Jessup, Md, Usa, p. 53-61. 12 jan. 2012. Disponível em: <10.1016/j.wear.2012.01.008>. Acesso em: 1 jun. 2013.

Dubé, D., Fiset, M., Laliberté, R., Simoneau R., Cavitation Resistance Improvement of IRECA Steel via Laser Processing, **Materials Letters**, v. 28, nº 1-3, p. 93-99, 1995.

ESCALER, Xavier et al. Detection of cavitation in hydraulic turbines. **Mechanical Systems And Signal Processing**, Spain, n. , p.983-1007, 11 ago. 2004.

ESCOBAR, J.d. et al. Improvement of cavitation erosion resistance of a duplex stainless steel through friction stir processing (FSP). **Wear**. Sao Paulo, Brazil, p. 998-1005. 2 nov. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2012.10.005>>. Acesso em: 18 jan. 2014.

ESPITIA, L.a.; A.TORO. Cavitation resistance, microstructure and surface topography of materials used for hydraulic components. **Tribology International**. Medellín, Colombia, p. 2037-2045. 19 maio 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X10001489>>. Acesso em: 18 jan. 2014.

EULER, L. De motu et reaction aquae per tubos mobiles transfluentis. *Novi Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae* 6, 1754.

HAOSHENG, Chen; JIADAO, Wang; DARONG, Chen. Cavitation damages on solid surfaces in suspensions containing spherical and irregular microparticles. **Wear**, Beijing, China, p. 345-348. 5 jan. 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.05.010>>. Acesso em: 1 jun. 2013.

HAOSHENG, Chen; SHIHAN, Liu. Inelastic damages by stress wave on steel surface at the incubation stage of vibration cavitation erosion. **Wear**, Beijing, China, p. 69-75. 7 jul. 2008. Disponível em: <10.1016/j.wear.2008.05.011>. Acesso em: 1 jun. 2013.

HATTORI, Shuji; ISHIKURA, Ryohei; ZHANG, Qingliang. CONSTRUCTION OF DATABASE ON CAVITATION EROSION AND ANALYSES OF CARBON STEEL DATA. **Fifth International Symposium On Cavitation**, Osaka, n. , p.1-6, 1 nov. 2003.

Heathcock, C. J., Protheroe, B. E., Ball, A., Cavitation erosion of stainless steels, **Wear**, v. 81, p. 311-327, 1982.

HUTH, HANS-JÖRG, Fatigue design of hydraulic turbine runners, Trondheim, Norway 2005, 178 f., Engineering Doctor Thesis, Department of Engineering Design and Materials, Norwegian University of Science and Technology.

SHEIR, L. L., JARMAN, R. A. E BURSTEIN, G. T., Corrosion: Metal/Environment Reactions, v. 01, 3^a ed, Oxford: Butterworth Heinemann, 1994.

JAYAPRAKASH, Arvind et al. Scaling study of cavitation pitting from cavitating jets and ultrasonic horns. **Wear**, Usa, p. 619-629. 30 ago. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2012.07.025>>. Acesso em: 1 jun. 2013.

MEYERS, M. A., Chawla, K. K., **Mechanical Behavior of Materials**, New Jersey: Prentice Hall, 1998.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Síntese do Relatório Final**. Disponível em: <ben.epe.gov.br>. Acesso em: 11 ago. 2013.

NEALE, M. J.. **The tribology handbook**. Oxford: Butterworth-heinemann, 2001.

PARK, M. C. et al. Effects of strain induced martensitic transformation on the cavitation erosion resistance and incubation time of Fe–Cr–Ni–C alloys. **Wear**, Korea, p. 28-33. 19 ago. 2011. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2011.08.011>>. Acesso em: 1 jun. 2013.

POHL, M.: Grundlagen zur Kavitation erosion. DGM-Material fórum Cavitation erosion. Out 1993. Bochum-Alemanha.

POHL, M.; STELLA, J.. Quantitative CLSM roughness study on early cavitation-erosion damage. **Wear**. Bochum, Germany., p. 501-511. 10 jan. 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164802000030>>. Acesso em: 18 jan. 2014.

PUKASIEWICZ, A.G.M. **Desenvolvimento de revestimentos Fe-Mn-Cr-Si-Ni Resistentes à cavitação depositadas por aspersão ASP**, Curitiba 2008,

Engineering Doctor Thesis, Departamento de Pós Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 173p.

QUEIROZ, Fernando Ribeiro. **Avaliação de cavitação em turbinas hidráulicas por emissão acústica**. 2012. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Ufmg, Belo Horizonte, 2012.

KNAPP, R. T.; DAILY, J. W.; HAMMITT, F. G. Cavitation, 1 ed 1970, McGraw-Hill, Inc, USA, 1970, 578 p.

RIBEIRO, João Paulo. **Uma investigação de grandezas hidrodinâmicas no tubo de sucção de turbinas com rotor Francis operando em cargas variáveis**. 2007. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

SANTA, J.f. et al. Cavitation erosion of martensitic and austenitic stainless steel welded coatings. **Wear**, Medellín, Colombia, p. 1445-1453. 23 dez. 2010. Disponível em: <10.1016/j.wear.2010.12.081>. Acesso em: 1 jun. 2013.

KRELLA, Alicja. Influence of cavitation intensity on X6CrNiTi18-10 stainless steel performance in the incubation period. **Wear**, Usa, p. 1723-1731. jun. 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2004.11.025>>. Acesso em: 1 jun. 2013.

WANG, Guogang et al. Numerical study on fatigue damage properties of cavitation erosion for rigid metal materials. **Materials**, Beijing, China, p. 261-266. 26 jun. 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005885008600493>>. Acesso em: 1 jun. 2012.