

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

RAFAEL ANTUNES MATOS

**ANÁLISE DA AMPLITUDE SOBRE A TAXA DE PERDA DE MASSA
EM TESTE DE CAVITAÇÃO PADRONIZADO**

**VITÓRIA – ES
2015**

RAFAEL ANTUNES MATOS

**ANÁLISE DA AMPLITUDE SOBRE A TAXA DE PERDA DE MASSA
EM TESTE DE CAVITAÇÃO PADRONIZADO**

Projeto de graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro do Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para do grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Professor Doutor Temístocles de Sousa Luz, D. Sc.

**VITÓRIA – ES
2015**

MATOS, Rafael Antunes

ANÁLISE DA AMPLITUDE SOBRE A TAXA DE PERDA DE MASSA EM TESTE DE CAVITAÇÃO PADRONIZADO. / Rafael Antunes Matos – Vitória, (ES): [s.n], 2015.

[Quantidade de páginas] 50f.

Orientador: Temístocles de Sousa Luz

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. INTRODUÇÃO. 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL. 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO. 5. CONCLUSÕES. 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS. Universidade Federal do Espírito Santo. Departamento de Engenharia Mecânica. Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais. II. Título.

RAFAEL ANTUNES MATOS

**ANÁLISE DA AMPLITUDE SOBRE A TAXA DE PERDA DE MASSA
EM TESTE DE CAVITAÇÃO PADRONIZADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 8 de julho de 2015.

COMISSÃO EXAMINADORA

Orientador Temístocles de Sousa Luz, D.Sc.
Universidade Federal do Espírito Santo.

M. Sc. Mariana Xavier Milagre.
Universidade Federal do Espírito Santo

M.Sc. Leandro Bitti Santa'Anna
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Espírito Santo.

Dedico este trabalho a minha mãe, pai e ao meu irmão que permitiram que esse sonho pudesse ser realizado. Dedico também a todas as pessoas que sonham um sonho bom, perante Deus, onde projetam, trabalham todo dia, com um único objetivo, de vê-lo realizado.

AGRADECIMENTOS

1. A Deus.
2. Aos meus pais e irmão, pois me ajudaram de todas as formas possíveis para que eu pudesse chegar até este estágio do curso.
3. Ao orientador, Professor Dr. Temístocles de Souza Luz, pela confiança e apoio depositados para a realização deste estudo.
4. Ao mestre Leandro Bitti Santa'Anna pela ajuda e paciência, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.
5. Ao técnico Carlos Alberto Rosa Neto do laboratório TRICORRMAT pela ajuda e paciência nos ensaios.

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos”.

Isaac Newton

RESUMO

A cavitação é um fenômeno recorrente na mecânica do escoamento de fluidos. A análise da resistência a este fenômeno, por parte dos materiais utilizados em engenharia, cresce a cada dia, pois geralmente ocorre em equipamentos industriais de alto custo, como bombas e turbinas. Novos materiais e técnicas de deposição vêm surgindo, na busca da minimização de paradas para manutenção e consequentemente de custos. Uma metodologia de análise que possibilite a caracterização da resistência dos materiais a tal fenômeno é de extrema importância em virtude dos elevados custos inerente aos problemas gerados. O laboratório TRICORRMAT da UFES possui um equipamento para simulação do fenômeno, que está pautado na geração de um sinal de alta frequência, induzindo um dispositivo a oscilar nessa mesma frequência em amplitudes específicas. Essa amplitude, no entanto pode estar gerando distúrbios no equipamento, promovendo situações de falha do dispositivo por fadiga. Outros trabalhos têm utilizado amplitudes diferenciadas para análise do fenômeno, no entanto uma parametrização é necessária para uma robustez dos resultados. O desenvolvimento aqui focou no comportamento de um material com propriedades ao fenômeno que fossem de conhecimento por parte da literatura corrente, e na variação da amplitude por meio da técnica indireta, com base na norma específica. O conhecimento desse comportamento pode possibilitar o uso mais eficiente da técnica, permitindo maior vida útil do sistema. O material utilizado foi o aço inoxidável, AISI304, por ser um material de resistência à cavitação já conhecida, em variações de amplitude com “steps” de $5\mu\text{m}$ ($30\mu\text{m}$, $35\mu\text{m}$, $40\mu\text{m}$). Isso permitiu a observação do comportamento do fenômeno com a variação da amplitude. Os resultados mostram que a variação da amplitude apresenta uma correlação significativa com a perda de massa erosiva acumulada.

Palavras-chave: Cavitação ultrassônica; amplitude; método indireto; taxa de erosão.

ABSTRACT

Cavitation is a recurring phenomenon in the mechanics of fluid flow. Analysis of resistance to this phenomenon, by the materials used in engineering, is growing every day, as often occurs in industrial equipment of high cost, such as pumps and turbines. New materials and deposition techniques are emerging in the search for minimizing maintenance downtime and therefore costs. An analysis method that allows the characterization of strength of materials such phenomenon is of paramount importance due to the high costs inherent problems generated. The TRICORRMAT laboratory equipment UFES has a simulation phenomenon, which is guided in the generation of a high frequency signal, inducing a device to oscillate in the same specific frequency ranges. This breadth, however can be generating disturbances in equipment, promoting fatigue device failure situations. Other studies have used different amplitudes for analysis of the phenomenon, however, a parameter required for reliable results. The development focused here on the behavior of a material which has the knowledge to be phenomenon by the current literature, and the amplitude variation by indirect technique, based on the particular standard. Knowledge of this behavior may enable more efficient use of the technique, allowing longer life of the system. The material was stainless steel, AISI304, as a cavitation-resistant material already known, in amplitude variations with 5 μ m steps of (30 μ m, 35 μ m, 40 μ m). This allowed the observation of the phenomenon's behavior with the change in amplitude. The results show that amplitude variation has a significant correlation with the accumulated loss of erosive mass.

Keywords: ultrasonic cavitation; amplitude; indirect method; erosion rate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos modos de desgaste erosivo.	18
Figura 2 - Esboço do diagrama de fases da água. A ebulição é a mudança de fase de líquido para vapor pelo aumento da temperatura, ao passo que a cavitação é um processo onde a mudança de fase é devida a diminuição da pressão.	19
Figura 3 - Mecanismo do micro-jato. Como resposta a pressão externa na bolha esférica, ela começa a oscilar. Quando as oscilações tornam-se grandes o suficiente, o líquido circundante penetra na bolha e flui através dela em direção à superfície sólida. À medida que atinge a superfície sólida a formação de pit's (deformação plástica) pode ocorrer.	20
Figura 4 - Estágios da superfície contorno da bolha em colapso próximo a superfície.....	21
Figura 5 - Estágios da superfície contorno da bolha em colapso distante da superfície.....	21
Figura 6 - Pressão estática em válvulas com cavitação e <i>flashing</i>	23
Figura 7 - Falha por cavitação e corrosão de um rotor de aço inox 316.	25
Figura 8 - Cavitação no rotor de uma bomba centrífuga. (a) formação da “nuvem” de bolhas de vapor em uma determinada região, (b) erosão ocasionada.....	25
Figura 9 - Diagrama dos processos estável e transiente da cavitação.	27
Figura 10 - Formação das bolhas de cavitação pela forma estável e também transiente. (a) Gráfico do deslocamento em (x); (b) Cavitação transiente; (c) Cavitação estável; (d) Gráfico da pressão (P).....	28
Figura 11 - Ilustração do efeito piezoelétrico inverso.	29
Figura 12 - Fases do processo de erosão.....	30

Figura 13 - Esquema do equipamento para ensaio de erosão por cavitação. Dimensões na figura em milímetros.	31
Figura 14 - Esquema mostrando o método indireto do ensaio de EC.	32
Figura 15 - Geometrias comumente usadas em equipamentos de ensaios ultrassônicos.	33
Figura 16 - Materiais de engenharia em experimentos de erosão.	34
Figura 17 - Esquema do equipamento de cavitação.	38
Figura 18 - Itens do esquema do equipamento de cavitação.	38
Figura 19 - Micrografia em MO da amostra mostrando a microestrutura austenística.	39
Figura 20 - Perda de massa: Intercomparação dos resultados.	43
Figura 21 - Gráfico apresentando a variação da taxa de erosão nas três condições propostas.	44
Figura 22 - Gráfico apresentando a variação perda de massa acumulada total versus a amplitude.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalo de tempo desde a iniciação de um colapso, e a velocidade do limite bolha no ponto axial mais distante da parede, para os casos ilustrados na figura 4 e na figura 5.....	22
Tabela 2 - Composição química do material empregado.....	35
Tabela 3 - Resultados de dureza na escala Vickers.	35
Tabela 4 - Resultados da erosão por cavitação na amostra 1.	40
Tabela 5 - Resultados da erosão por cavitação na amostra 2.	41
Tabela 6 - Resultados da erosão por cavitação na amostra 3.	42

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
LABTECMEC	Laboratório de Tecnologia Mecânica
TRICORRMAT	Laboratório de Tribologia e Corrosão de Materiais
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 HITÓRICO E MOTIVAÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 TIPOS DE DESGASTE EROSIVO	18
3.2 EROSÃO CAVITACIONAL.....	18
3.3 A CAVITAÇÃO E A EBULIÇÃO	19
3.4 A CAVITAÇÃO E O <i>FLASHING</i>	22
3.5 - CONSEQUÊNCIAS DA CAVITAÇÃO	23
3.6 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À EROSÃO POR CAVITAÇÃO.....	25
3.7 CAVITAÇÃO POR MEIO ACÚSTICO	26
3.8 GERAÇÃO ACÚSTICA: POTÊNCIA ULTRASSÔNICA	28
3.9 EROSÃO INDUZIDA PELA CAVITAÇÃO	29
3.10 EXPERIMENTOS DE EROSÃO REALIZADOS COM MATERIAIS DE ENGENHARIA.....	33
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	35
4.1 MATERIAL DE ENGENHARIA SELECIONADO	35
4.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	35
4.3 DUREZA.....	35
4.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	36

4.5 EQUIPAMENTOS	36
4.6 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	36
4.7 ENSAIOS	37
4.8 AMPLITUDE DE PULSAÇÃO (ϕ).....	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
5.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL.....	39
5.2 ENSAIOS	39
6 CONCLUSÕES	46
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 HITÓRICO E MOTIVAÇÃO

Interesse em muitos ramos da Engenharia e das Ciências, o fenômeno da cavitação assume uma importância particular no escoamento de todos os tipos de líquidos, especialmente quando esses escoamentos se processam em altas velocidades.

Entre os grandes problemas que ocorrem em engenharia, em se tratando de escoamento de fluidos está a cavitação. Graves consequências deste fenômeno estão dispostas em quantidades literárias razoáveis em artigos e livros.

O estudo de novos materiais resistentes à cavitação assume total importância. Sabemos que o desenvolvimento tecnológico esta sempre a inclinar para máxima capacidade do equipamento, muitas vezes isto significa um aumento de velocidade no escoamento, contribuindo para acentuar a importância deste fenômeno que pode ser introduzido.

Um dos métodos mais utilizado para avaliar a resistência dos materiais quanto ao desgaste erosivo por cavitação é baseado na vibração ultrassônica, também chamado de cavitação vibratória, descrito na norma ASTM G32(2010).

Os materiais surgidos que possuem grande resistência à cavitação possuem entre outras características a elevada dureza, como consequência apresentam baixa usinabilidade, o que impede que estes materiais sejam ensaiados pelo método direto, pois para a sua aplicação à amostra deve possuir dimensões precisas tornando a usinagem de elevado custo, ou seja, inviável para o ensaio.

Em vários artigos autores utilizaram amplitudes menores que 50 μm (GRAJALES, 2010), ou seja, diferente do que a norma ASTM G32(2010) estabelece para o ensaio. A investigação do comportamento da perda de massa por erosão cavitacional com variação da amplitude pelo método indireto se faz necessária por dois motivos: a confiabilidade dos resultados para essas amplitudes é necessária e a alta amplitude pode ser responsável pelo aumento da sensibilidade de falhas por fadiga no sonotrodo.

Em particular, usaremos o inox AISI 304, que é um material facilmente encontrado e que possui um grande número de estudos na amplitude de 40 μm (MESA *et al.*, 2010), além disso, como ele possuiu uma boa resistência a cavitação isso permitirá uma maior quantidade de horas de ensaio para caracterização da curva de resistência a cavitação, dessa forma possibilitando uma investigação da falha por fadiga no sonotrodo.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi observar o comportamento do aço AISI 304 em ensaios de erosão cavitacional desenvolvido de acordo com as recomendações feitas pela norma ASTM G32(2010), intitulada: *Standard Test Method for Cavitation Erosion Vibratory Apparatus*.

Os objetivos específicos são:

- ✓ Verificar o comportamento da perda acumulada de massa na erosão cavitacional com a variação da amplitude de ensaio.
- ✓ Analisar o comportamento taxa de perda da massa cavitacional.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TIPOS DE DESGASTE EROSIVO

Em geral, segundo ZUM GAHR (1987), o desgaste erosivo no corpo do sólido é causado pela ação de deslizamento ou impacto de sólidos, líquidos, gases ou a combinação deles. Os desgastes erosivos são divididos em seis tipos: erosão por partículas sólidas em meio gasoso, erosão por partículas sólidas em meio líquido, erosão devido à ação de líquidos, erosão-corrosão, erosão por cavitação e erosão térmica (figura1).

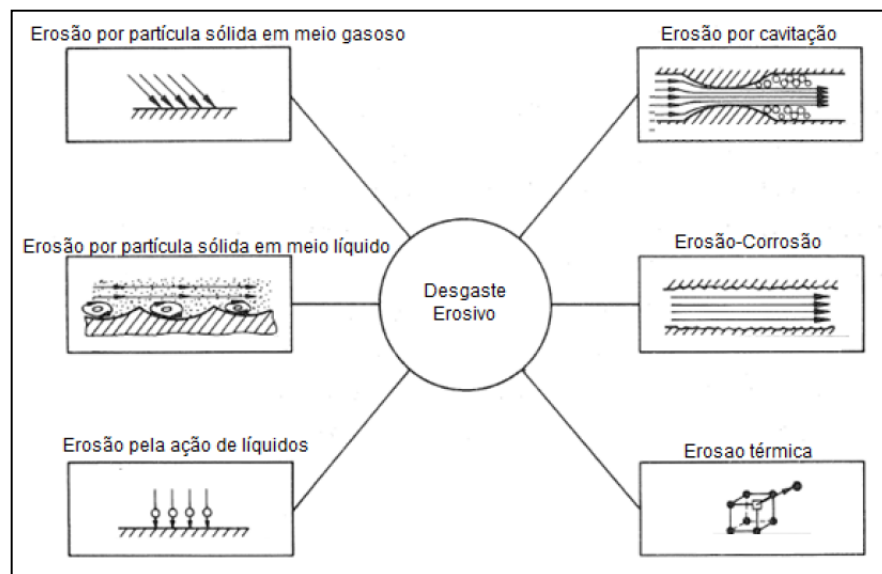


Figura 1 - Classificação dos modos de desgaste erosivo.

Fonte: ZUM GAHR (1987).

3.2 EROSÃO CAVITACIONAL

A cavitação, segundo a norma G32(2010), é um fenômeno de formação e subsequente colapso de bolhas ou “cavidades” contendo vapor, gás ou ambos. A cavitação resulta de uma redução localizada da pressão hidrostática, produzida pela movimentação de líquido (escoamento) ou de uma superfície sólida (vibração). A cavitação é um processo de desgaste por fadiga, ou seja, o material é sujeito a forças consecutivas no processo de colapso de microcavidades próximas à superfície sólida. Portanto, o material cavitado precisa absorver impactos consecutivos para não sofrer os desgastes devido à cavitação.

3.3 A CAVITAÇÃO E A EBULIÇÃO

Em uma substância pura (BRENNEN, 1995), a fase líquida e a fase vapor podem coexistir em equilíbrio somente em uma determinada linha, correlacionando pressão e temperatura, essa linha é chamada de linha líquido-vapor e se estende desde o ponto-tríplice até o ponto crítico. Fora desta linha, uma fase desta substância é mais estável que a outra. No ponto-tríplice as três fases (líquido, vapor e sólido) coexistem, ou seja, a substância pode ter três alternativas de estados estáveis (MIRANDA, 2007). A figura 2 mostra um gráfico típico idealizado, de uma substância pura, relacionando a pressão (P), a temperatura (T) e o volume específico (v), onde cada estado físico da substância é indicado neste gráfico.

O gráfico mostra as condições para que ocorra a transformação de fase de líquido para vapor via o fenômeno de cavitação ou por ebulição. A transformação de fase líquida para vapor por ebulição ocorre quando é mantida no fluido uma pressão constante e ocorrendo o aumento da temperatura. O processo para nucleação da cavitação ocorre quando o fluido mantém-se em uma temperatura constante e ocorre a diminuição da pressão até um valor crítico, que é a pressão do vapor do líquido.

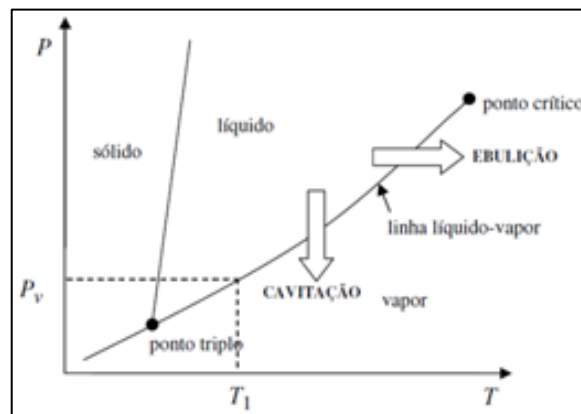


Figura 2 - Esboço do diagrama de fases da água. A ebulição é a mudança de fase de líquido para vapor pelo aumento da temperatura, ao passo que a cavitação é um processo onde a mudança de fase é devida a diminuição da pressão.

Fonte: MIRANDA (2007).

A nucleação, isto é, a formação de bolhas, é no entanto bastante complexa. Na prática, a presença de impurezas no líquido, tais como bolhas gasosas microscópicas ou partículas sólidas, podem criar pontos fracos no líquido, onde as

cavidades de gás crescerão uma vez que a pressão de vapor é atingida. Estas impurezas são chamados núcleos de cavitação. Os núcleos podem ter várias origens, principalmente de gás dissolvido no líquido, ou gás preso em pequena rugosidade superficial.

Depois de formadas as cavidades, preenchidas com vapor ou gás, elas são carregadas pelo fluxo líquido até atingirem regiões de maior pressão, onde elas colapsam por implosão. Essa implosão é conhecida como cavitação (ALLENSTEIN, 2007).

As implosões se dão de forma violenta, em um curto intervalo de tempo (da ordem de milissegundos), liberando ondas de choque e micro-jatos altamente energéticos. A ação conjunta desses dois mecanismos gera tensões muito altas, da ordem de 1,5 GPa, provocando aumento de temperatura local da ordem de 1000°C (GRAJALES, 2010). O efeito mecânico da ação conjunta desses dois mecanismos pode resultar em modificações nas propriedades, e conseqüentemente, perda de material na região cavitada (DA SILVA, 2008). A Figura 3 mostra esquematicamente o fenômeno descrito acima.

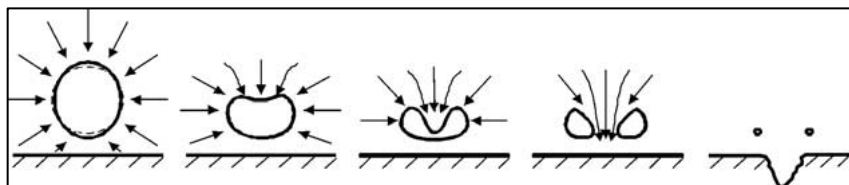


Figura 3 - Mecanismo do micro-jato. Como resposta a pressão externa na bolha esférica, ela começa a oscilar. Quando as oscilações tornam-se grandes o suficiente, o líquido circundante penetra na bolha e flui através dela em direção à superfície sólida. À medida que atinge a superfície sólida a formação de pit's (deformação plástica) pode ocorrer.

Fonte: DULAR *et al.*, (2004).

Para que as ondas de choque possam provocar dano a um material é necessário que o colapso ocorra muito próximo à superfície sólida. Quando o colapso ocorre o fluxo é alterado, dando origem ao segundo mecanismo de desgaste proposto, os micro-jatos (GRAJALES, 2010). Os modelos propostos para explicar a formação dos micro-jatos de líquidos são baseados na instabilidade da simetria esférica da bolha quando se aproxima de uma superfície (CUPARI, 2002, *apud* DA SILVA, 2008). Simulações numéricas deste fenômeno estimam jatos com velocidade de 130 m/s, resultando em pressões de impacto próximas de 2040 kgf/cm² (PLESSET;

CHAPMAN, 1970). A Figura 4 mostra a perda de simetria da bolha de cavitação, em que h representa a distância entre o centro da bolha e a superfície sólida e R_0 o raio da bolha.

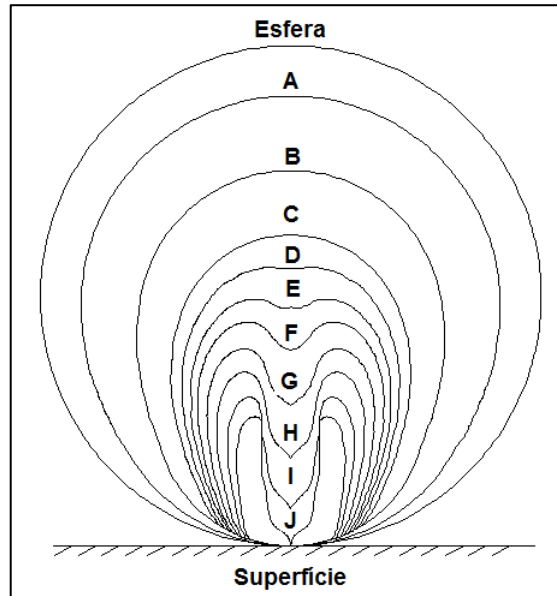


Figura 4 - Estágios da superfície contorna da bolha em colapso próximo a superfície.

Fonte: adaptado de PLESSET, CHAPMAN (1970).

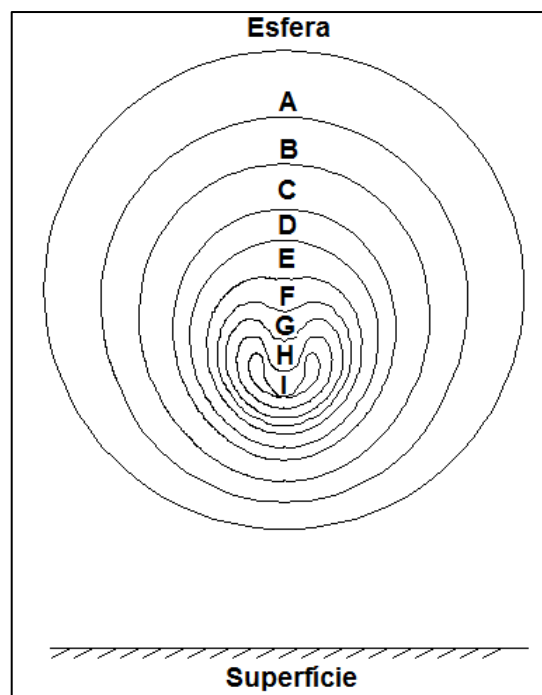


Figura 5 - Estágios da superfície contorna da bolha em colapso distante da superfície.

Fonte: adaptado de PLESSET, CHAPMAN (1970).

Tabela 1 - Intervalo de tempo desde a iniciação de um colapso, e a velocidade do limite bolha no ponto axial mais distante da parede, para os casos ilustrados na figura 4 e na figura 5.

Estágio	Figura 4		Figura 5	
	Tempo	Velocidade (m/s)	Tempo	Velocidade (m/s)
A	0,63	7,7	0,725	10
B	0,885	19	0,875	17
C	0,986	42	0,961	35
D	1,013	65	0,991	53
E	1,033	100	1,016	94
F	1,048	125	1,028	142
G	1,066	129	1,036	160
H	1,082	129	1,044	165
I	1,098	128	1,05	170
J	1,119	128	x	x

FORNE: PLESSET; CHAPMAN (1970).

3.4 A CAVITAÇÃO E O *FLASHING*

Os fenômenos da cavitação e *flashing* podem ocorrer em válvulas de controle. Estes fenômenos apresentam semelhança em sua origem em relação a nucleação e crescimento das bolhas devido a diminuição de pressão abaixo de um valor crítico. A diferença entre estes dois fenômenos está na recuperação de pressão no sistema.

O *flashing*, conforme Mathias (2008), é um fenômeno no qual a pressão do líquido cai abaixo da pressão de vapor (formando bolhas de vapor) e depois se recupera num valor que continua igual ou inferior a essa pressão, não havendo, portanto, a implosão das bolhas.

O *flashing* é menos problemático que a cavitação, porém, também pode causar erosão e vazão bloqueada, mas não há ruído como na cavitação.

Abaixo o gráfico mostra a ocorrência da cavitação e o *flashing* (figura 6).

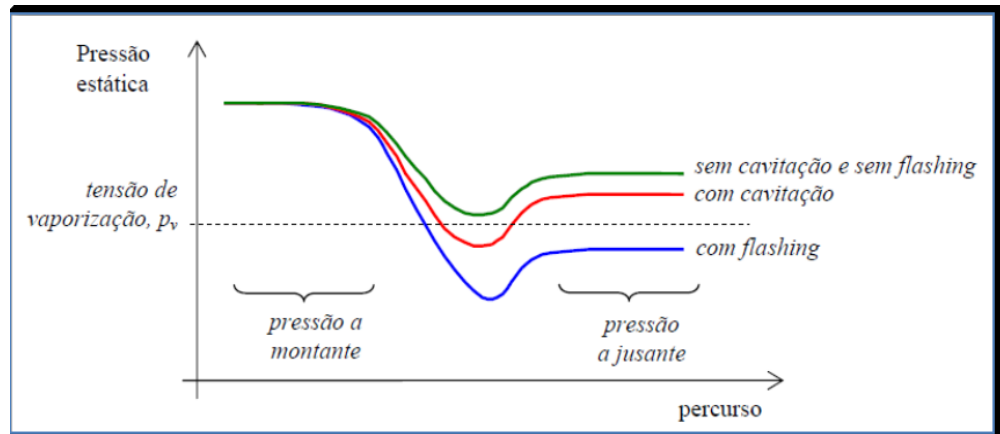


Figura 6 - Pressão estática em válvulas com cavitação e *flashing*.

Fonte: http://lodi.est.ips.pt/gsilva/.../a_teoricas/4-Válvulas%20de%20controlo.pdf

3.5 - CONSEQUÊNCIAS DA CAVITAÇÃO

Os efeitos da cavitação (TOMÁS, 1986) dependem do tempo em que o equipamento estará sobre o efeito do fenômeno, da intensidade da cavitação, das propriedades do líquido, e da resistência do material a erosão por cavitação. Os principais efeitos nocivos da cavitação podem se considerar-se:

- a alteração das características heterodinâmicas do escoamento;
- a produção de fenômenos de ruídos e vibrações e;
- a erosão das fronteiras sólidas em contato com o líquido.

A importância relativa de cada um desses efeitos é variável, dependendo, naturalmente, das situações específicas em questão. Deste modo:

- A alteração das características heterodinâmicas do escoamento (resultante da interrupção das continuidades da fase líquida associada ao aparecimento das cavidades) pode, por vezes, constituir um efeito de importância secundária da cavitação como acontece, em geral, no âmbito das grandes obras hidráulicas. No entanto, pode ter consequências particularmente nocivas como, por exemplo, em turbinas hidráulicas onde, entre outros efeitos, determinará a diminuição dos

respectivos rendimentos ou em disposição de medição do caudal da classe de pressão diferencial (aparelhos deprimogênicos), cuja precisão devera ser significativamente afetada pela ocorrência da cavitação.

- Os fenômenos de ruído e vibrações que acompanham o colapso das bolhas de cavitação tem uma incidência especial na exposição dos seres humanos a efeitos que podem afetar seu conforto, a sua capacidade de trabalho e, em certos casos, mesmo a sua saúde e segurança. No entanto, as vibrações podem ter outra consequência, refletindo-se particularmente na conservação das construções.

A erosão dos materiais que constituem as paredes sólidas em contato com o líquido é, de um modo geral, um dos mais graves e, pelo menos no ramo da engenharia hidráulica, o mais divulgado efeito nocivo da cavitação.

Outros efeitos menos divulgados, também são observados quando ocorre a cavitação, são eles:

- Efeitos de emissão de luz.
- Efeitos químicos.

A figura 7 (BENNEKOM *et al.*, 2001) mostra a falha mecânica causada pela erosão por cavitação em um rotor de aço inox, pode-se notar que houve uma completa danificação deste componente, claramente são verificados os pits de erosão por toda a extensão do rotor. Este rotor foi utilizado em uma bomba onde o fluido era o sulfato de níquel e ácido sulfúrico (pH entre 2 e 3), com escoamento entre 1.300 e 2.000 l/min (MIRANDA, 2007).



Figura 7 - Falha por cavitação e corrosão de um rotor de aço inox 316.

Fonte: BENNEKOM *et al.*, (2001).

Outros exemplos de desgaste por erosão, devido à cavitação, podem ser observados nas figuras abaixo. Na figura 8 (a) nota-se a formação de uma “nuvem” de bolhas de vapor e o colapso destas em uma determinada região específica do rotor, esta incidência constante da cavitação em uma determinada região ocasiona a erosão por cavitação, que é mostrada na figura 8(b). Posteriormente este equipamento poderá sofrer uma falha mecânica devido à erosão por cavitação (MIRANDA, 2007).

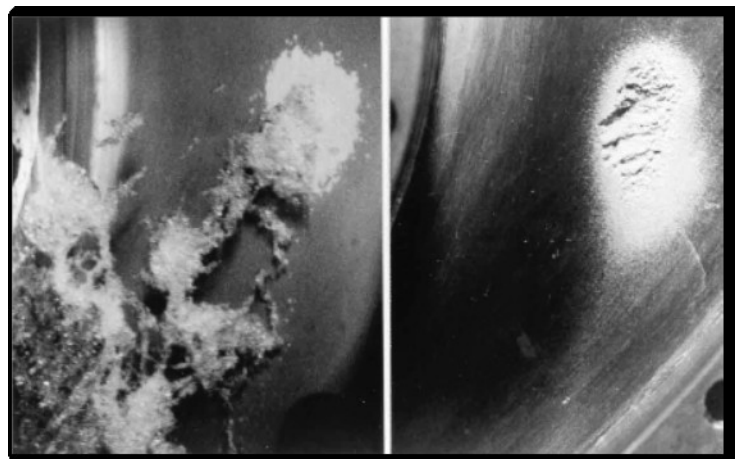


Figura 8 - Cavitação no rotor de uma bomba centrífuga. (a) formação da “nuvem” de bolhas de vapor em uma determinada região, (b) erosão ocasionada.

Fonte: BRENNEN (1995).

3.6 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À EROSIÃO POR CAVITAÇÃO

Equipamentos para testes da erosão por cavitação são requeridos para se estudar o comportamento dos mais variados materiais metálicos, quando expostos ao

fenômeno da cavitação. Diversos conceitos foram empregados no desenvolvimento dos equipamentos utilizados em escala de laboratório, porém nenhum destes consegue simular completamente um componente estrutural e real exposto à cavitação.

A grande dificuldade na compreensão e simulação do fenômeno da cavitação em escala laboratorial foi responsável pelo surgimento de inúmeros métodos para a avaliação da resistência de materiais empregados na construção e recuperação de componentes sujeitos a esse fenômeno. Os diferentes métodos podem ser classificados em função da forma pela qual o fenômeno da cavitação é induzido. Existem, basicamente, dois tipos diferentes de métodos: os que utilizam fluxo de líquido e aqueles em que o fenômeno da cavitação é induzido por vibração, geralmente ultrassônica (ALLENSTEIN, 2007). Entre os que utilizam fluxo de líquido, podem ser citados: discos rotativos, em que os corpos de prova são posicionados e submetidos a jatos de água, tubos de Venturi, utilizados para gerar a cavitação de corpos de prova que são dispostos em sua parede, e; válvulas rotativas, para gerar cavitação em *vortex*. Entretanto, o método mais comum é o de cavitação induzido por vibração ultrassônica, ou cavitação ultrassônica, encontrado na norma ASTM G32 (2010).

O objetivo principal dos testes de cavitação é fazer uma classificação dos materiais quanto à resistência à cavitação.

3.7 CAVITAÇÃO POR MEIO ACÚSTICO

Existem dois modos de cavitação acústica (YOUNG, 1989 *apud* AGUILAR, 2014): estável e transiente.

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

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 *apud* AGUILAR, 2014).

$$P_b = P_o + 0,77 \frac{\sigma}{R_o} \quad (1)$$

Onde:

P_o = Pressão hidrostática (medida em Pa);

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

R_o = Raio inicial das bolha (medidas em m);

A figura 9, abaixo, apresenta de forma esquemática os processos cavitação estável e transiente.

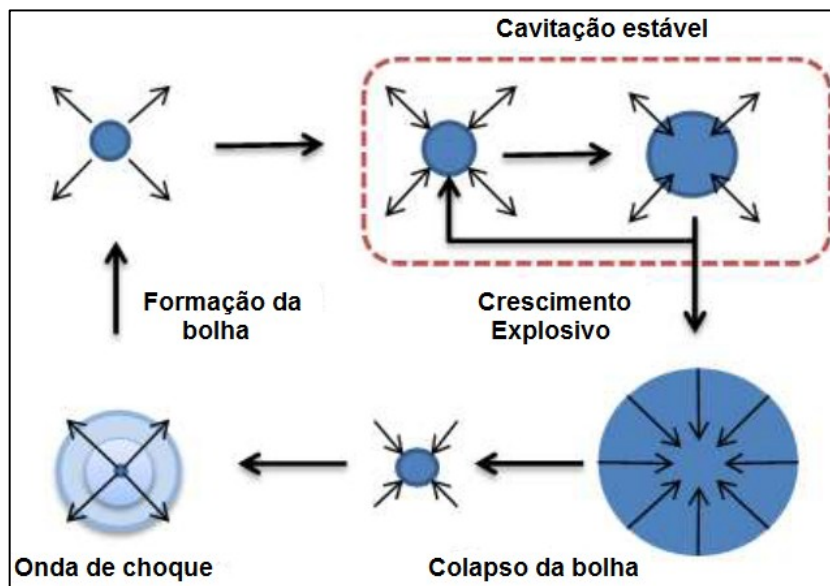


Figura 9 - Diagrama dos processos estável e transiente da cavitação.

Fonte: Aguilar (2010).

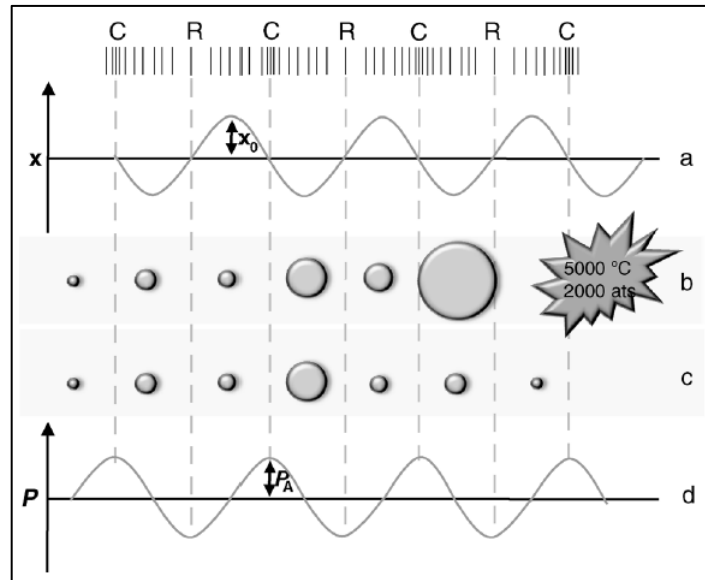


Figura 10 - Formação das bolhas de cavitação pela forma estável e também transiente. (a) Gráfico do deslocamento em (x); (b) Cavitação transiente; (c) Cavitação estável; (d) Gráfico da pressão (P).

Fonte: SANTOS *et al.*, (2009).

3.8 GERAÇÃO 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 a formação de uma onda de pressão acústica que imprime velocidade as partículas do meio.

Dois são os tipo de ultrassom: de alta e de baixa intensidade de potência por área empregados para diferentes aplicações de ultrassom. O uso de ultrassom de alta intensidade induz a expansão e contração de moléculas nos meios, induzindo o fenômeno de cavitação pelo colapso das bolhas e possuindo aplicações em diversos processos (e.g.: limpeza ultrassônica, erosão, emulsificação, degradação molecular, sonoluminescência, efeitos biológicos e químicos).

A produção de ultrassom é possível pela conversão da energia elétrica em ondas sonoras: a energia elétrica em energia alternada de alta frequência é convertida em vibrações mecânicas produzindo ultrassom. O processo de conversão de 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. O esquema do efeito piezoelétrico inverso está ilustrado na figura 11.

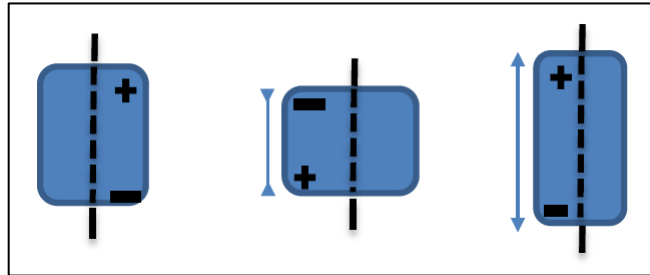


Figura 11 - Ilustração do efeito piezoelétrico inverso.

Fonte: AGUILAR (2010).

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

3.9 EROSÃO INDUZIDA PELA CAVITAÇÃO

A erosão induzida pela cavitação é definida pela norma G32(2010) como a perda progressiva de material de uma superfície sólida, devido à sua exposição contínua de cavitação. Ela também afirma que, embora o mecanismo de geração da cavitação seja diferente daquele que ocorre em sistemas de fluxo, a natureza do mecanismo de desgaste é basicamente a mesma.

As seguintes fases ocorrem em um material que sofreu erosão induzida por cavitação:

- Período de incubação: caracteriza-se por apresentar pouca ou nenhuma perda de massa, sendo de difícil identificação. Normalmente, no início dos ensaios o tempo entre as pesagens é pequeno, justamente para ter uma maior precisão na sua determinação.
- Período de aceleração: estágio no qual a taxa de erosão aumenta gradativamente, chegando a um valor máximo. Essa segunda fase ocorre quando o material já está deformado e não absorve mais deformação, causando

assim perda de massa. Em geral, a perda de massa é mais intensa em regiões de elevada concentração de deformação, como contornos de grãos, maclas e regiões que apresentam transformação de fase induzida por deformação (PUKASIEWICZ, 2008).

- Período de desaceleração da erosão: Estágio no qual se observa uma atenuação da taxa de EC, associado a dois fenômenos: um deles é a redução do impacto das bolhas devido ao aumento da rugosidade superficial, o outro é pelo efeito do amortecimento pelo líquido retido nas reentrâncias da superfície cavitada ou pelo ar ou vapor contido no líquido na zona de cavitação (MARQUES *et. al.*, 2001, *apud* DA SILVA, 2008).

Na figura 12 são mostrados os gráficos característicos para este tipo de ensaio e as fases correspondentes a cada estágio de erosão por cavitação.

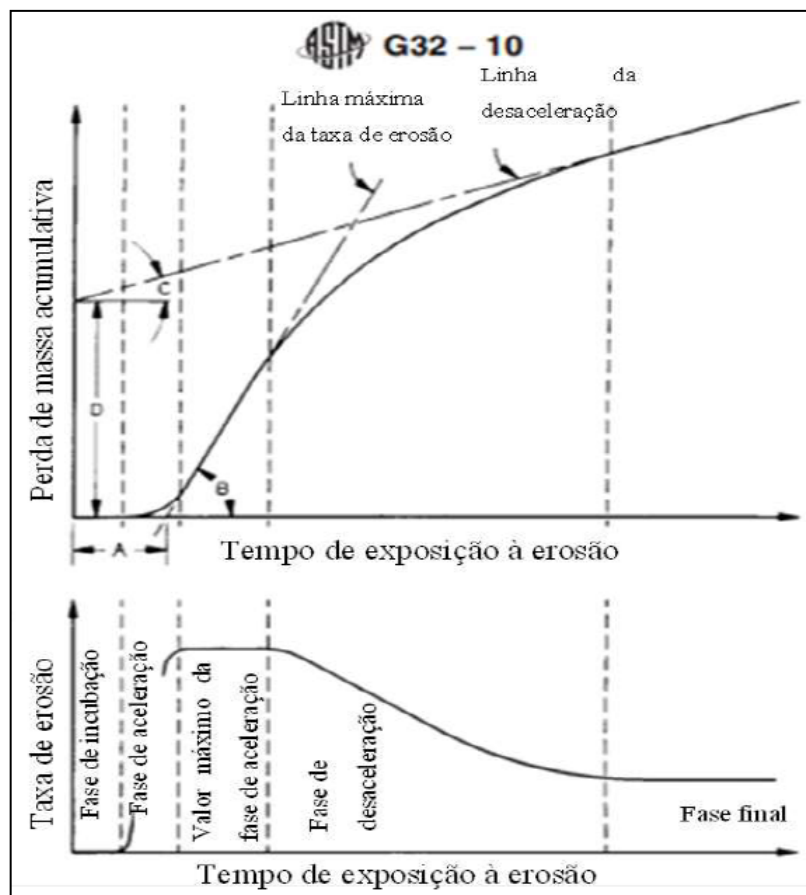


Figura 12 - Fases do processo de erosão.

Fonte: ASTM G32 (2010).

A norma G32(2010) estabelece que o método de cavitação ultrassônica consiste na imersão de uma ponta, chamada de sonotrodo, contendo um corpo de prova em sua extremidade, dentro de um líquido. Esta ponta é colocada para vibrar em alta frequência e baixa amplitude, produzindo zonas de alta e baixa pressão, nucleando e colapsando bolhas na amostra de teste milhares de vezes por segundo. O esquema mostrado na Figura 13 refere-se ao método padrão de cavitação vibratória, chamado neste trabalho de método direto.

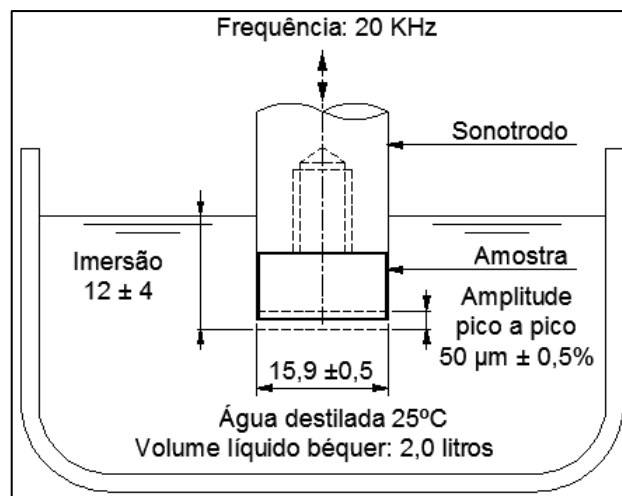


Figura 13 - Esquema do equipamento para ensaio de erosão por cavitação. Dimensões na figura em milímetros.

Fonte: adaptado de ASTM G32 (2010).

Uma variação deste método, chamado de método indireto ou método da amostra estacionária (Figura 14), é encontrado em diversos trabalhos (CUPARI, 2002, *apud* DA SILVA, 2008; ALLENSTEIN, 2007; GRAJALES, 2010). Neste método, o corpo de prova é posicionado dentro do líquido, logo abaixo da ponta do sonotrodo. Neste é fixada uma amostra de sacrifício, ou contra corpo, normalmente feita de um material com elevada resistência à EC, que irá provocar a cavitação no corpo de prova situado logo abaixo.

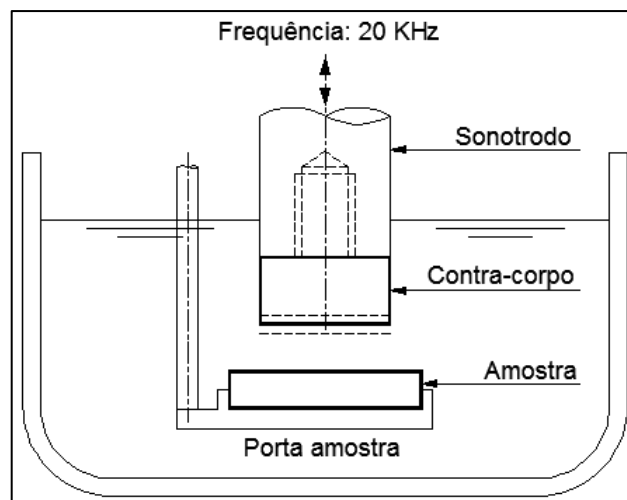


Figura 14 - Esquema mostrando o método indireto do ensaio de EC.

Fonte: adaptado de DA SILVA (2008).

As bolhas geradas pelo contra corpo agem sobre o corpo de prova, resultando em uma erosão de 40 a 60% menor que aquela do método padrão (BOCCANERA *et. al.*, 1998, *apud* DA SILVA, 2008). Não existe padronização quanto à distância entre o corpo de prova e o contra corpo, sendo que a máxima taxa de desgaste é obtida quando a distância é de 0,5 mm (CUPARI, 2002, *apud* DA SILVA, 2008).

Uma das vantagens de se utilizar o método indireto é quando o material da amostra é de difícil usinagem, dificultando a fabricação nas dimensões especificadas pela norma ASTM G32(2010).

A variação de uma condição do experimento foi feita para investigar o seu efeito quanto à perda de massa por erosão. Visto que este equipamento, em particular, é muito sensível quanto a esse parâmetro.

No experimento realizado, segue abaixo algumas nomenclaturas:

- Amplitude de pulsação do transdutor: vibração gerada no transdutor pela potencia de fonte de energia.
- Haste do transdutor: barra de metal afunilado usado para aumentar a amplitude de pulsação fornecida por um transdutor ultrassônico. A figura 15 apresenta as diferentes configurações da haste do transdutor.

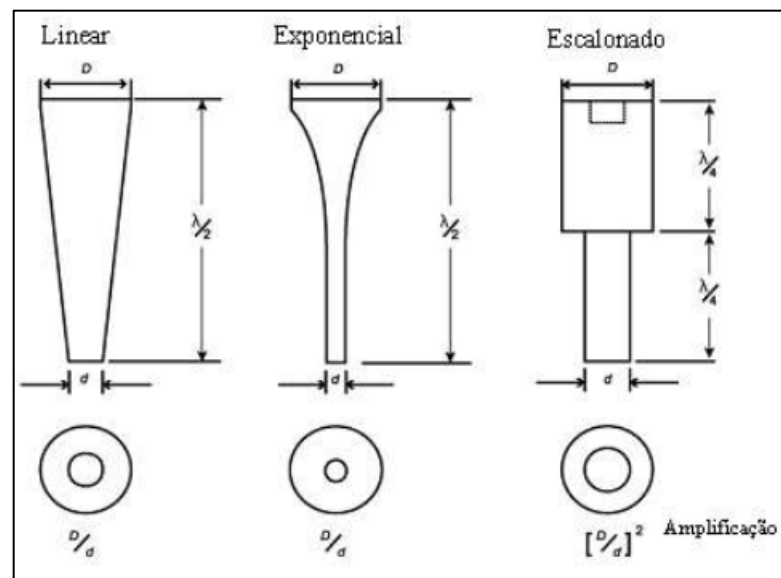


Figura 15 - Geometrias comumente usadas em equipamentos de ensaios ultrassônicos.

Fonte: AGUILAR (2010).

- Fator de amplificação: é a relação dos diâmetros da configuração da haste do transdutor (figura 15).
- Afastamento: distância entre a haste do transdutor e a superfície da amostra a ser estudada.

3.10 EXPERIMENTOS DE EROÇÃO 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, dependendo do tipo de uso industrial o material de engenharia utilizado pode ser composto por aços, ligas, polímeros e cerâmicos.

Processos de melhoria contínua (fundição, laminação, soldagem, implantação iônica, crescimento de cristais, deposição de filmes finos, sinterização, sopro de

vidro) são desenvolvidos a fim de aumentar a resistência a erosão por cavitação dos materiais (AGUILAR, 2014).

Pesquisa bibliográfica em 26 artigos especializados sobre o tema (erosão por cavitação) mostrou que 50% dos estudos fez uso de uma superliga ou aço inoxidável. A figura 16 resume os resultados da pesquisa (AGUILAR, 2014). Os aços inoxidáveis nas últimas décadas tem-se apresentado como materiais econômicos e tecnologicamente viáveis por serem simultaneamente resistentes ao desgaste e a corrosão. Devido a isto surgem novas pesquisas a fim de potencializar a resistência ao desgaste devido a cavitação.

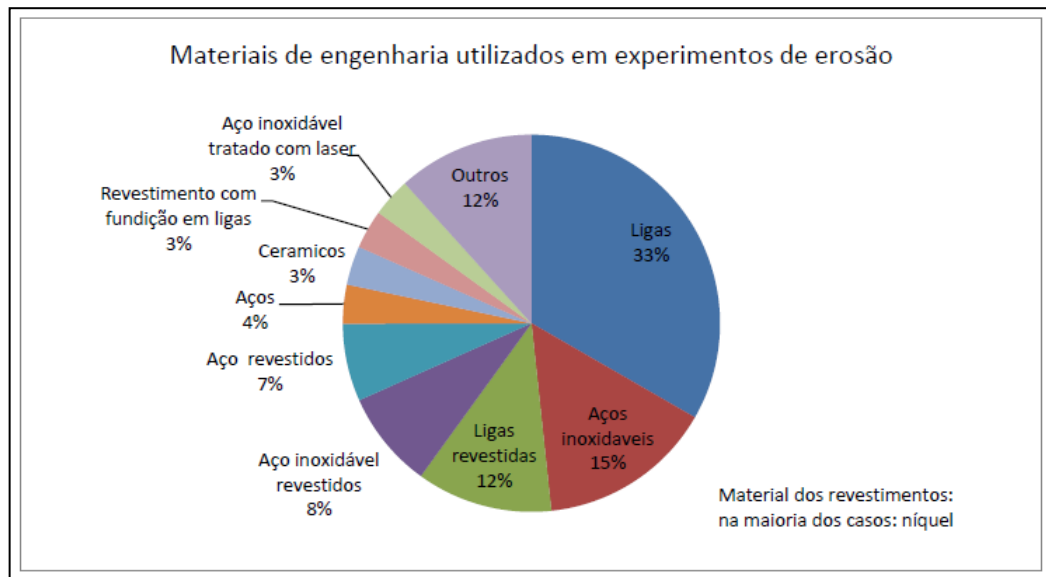


Figura 16 - Materiais de engenharia em experimentos de erosão.

Fonte: AGUILAR (2014).

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 MATERIAL DE ENGENHARIA SELECIONADO

No presente trabalho foi selecionado o material de engenharia mais empregado no setor industrial, o aço inox, AISI 304. Este material é o mais versátil dos aços inoxidáveis, sendo 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 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A tabela 2 ilustra a composição química do material empregado.

Tabela 2 - Composição química do material empregado.

Material de engenharia	Elemento (%)						
	Si	Mn	Cr	Ni	C	P	S
Aço inoxidável 304	1,00 máx	2,00 máx	18 - 20	8 - 12	0,08 máx	0,045 máx	0,03 máx

4.3 DUREZA

O ensaio de dureza foi realizado em um durômetro de marca Rathnow, na escala Vickers com carga de 10 Kgf, segundo a norma NBR NM ISO 6507(2008).

A tabela 3 apresenta o resultado das cinco endentações e sua média.

Tabela 3 - Resultados de dureza na escala Vickers.

MEDIDA	1	2	3	4	5	MÉDIA ± U
HV	209	213	213	222	224	216 ± 18

Fonte: O AUTOR (2015)

Nota: A incerteza relatada U é baseada em uma incerteza padronizada combinada multiplicada por um fator de abrangência K=2,0, fornecendo um nível de confiança de 95%.

4.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

As amostras foram preparadas segundo procedimento padrão de metalografia, que consistiu em lixamento (lixas com granulometria de 80, 120, 320, 400, 600, 1200) e polimento (pano de 0,3 μm) com solução de alumina, segundo a norma NBR 13284(1995).

Após foi utilizado o reagente ácido oxálico 10% (90 ml de água + 10 g ácido oxálico), para ataque químico, a fim de revelar a microestrutura do material, segundo a norma NBR 8108 (1983).

As amostras foram analisadas no microscópio ótico (MO) da marca NICOM MA200.

4.5 EQUIPAMENTOS

A seguir são listados os equipamentos e acessórios utilizados no presente trabalho:

- Bancada de cavitação.
- Banho termostático, Tecnal, modelo TE-180.
- Gerador de ultrassom da marca Telsonic DG-2000.
- Equipamento de limpeza por ultrassom.
- Balança analítica com precisão de 0,01mg.
- Secador convencional.
- Dessecador ARSEC.
- Lixadeira Rotativa Struers.

4.6 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram usinados no torno CNC Romi Centur 35D do Laboratório de Tecnologia Mecânica (LABTECMEC) da UFES. Eles foram pesados em uma balança analítica com precisão de 0,01 mg e receberam lixamento com lixas de 220, 320, 400 e 600 mesh, até obter uma rugosidade superficial inicial de ensaio entre 0,1 μm à 0,2 μm , conforme orienta a NORMA G32(2010).

Os procedimentos predecessores de cada ensaio foram limpeza durante 3 minutos em banho de acetona por ultrassom, secagem em secador convencional e pesagem

em balança analítica. Após esta última etapa, a amostra estava pronta para ser acoplada ao dispositivo gerador de ultrassom.

4.7 ENSAIOS

As superfícies das amostras de teste foram submersas a 12 ± 4 mm em água destilada, a uma temperatura de $25\pm 2^\circ\text{C}$. A temperatura da água do reservatório de ensaio foi controlada por um termômetro de mercúrio manual e por dispositivo de banho termostatzado, modelo TE-184, que é um trocador de calor composto por um sistema de fornecimento de água refrigerada ligado ao reservatório contendo a água destilada, na qual o corpo de prova foi imerso, e uma bomba responsável pela circulação da água refrigerada.

Durante as primeiras 3 horas de ensaio os corpos de prova foram limpos por 3 minutos em banho de acetona por ultrassom e pesados em intervalos de 30 minutos para determinação da perda de massa. Este procedimento foi repetido em intervalos de 1 hora durante as 5 horas seguintes, e em intervalos de 2 horas após a oitava hora de ensaio. Os ensaios se estenderam até a taxa de perda de massa dos corpos de prova atingir seu valor máximo, na prática, representou 30,0 horas de ensaio, visando detalhar a evolução da perda.

O tratamento dos valores de perda de massa obtidos na balança analítica com resolução de 0.01 mg, em cada intervalo regular, baseou-se em cinco pesagens, cada uma com duração fixa de 30 segundos. Os valores extremos foram eliminados e a perda de massa foi obtida pela média aritmética dos três valores restantes.

Na Figura 17 e 18 é apresentado um esquema das diferentes partes que compõem o sistema que possibilita o ensaio. O equipamento está localizado no Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORRMAT) no prédio laboratorial do Centro Tecnológico da UFES.

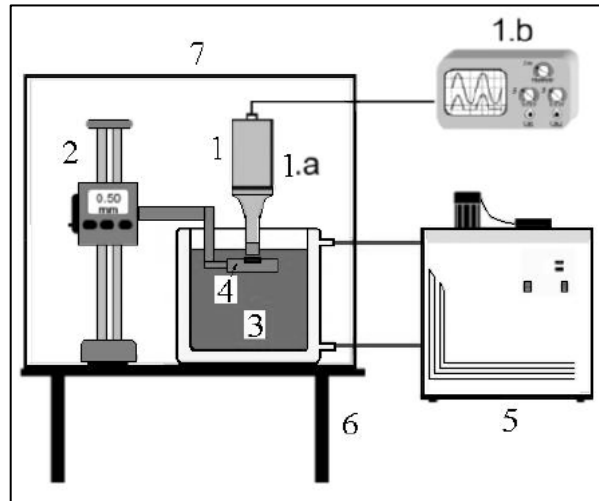


Figura 17 - Esquema do equipamento de cavitação.

Fonte: PFLITSCH *et al.*, (2007).

Item	Descrição	
1	Modulo vibratório, Telsonic DG-2000.	1.a. Transdutor e atuador (titânio) 1.b. Gerador e controlador
2	Suporte com braço articulado com encaixe com paquímetro de resolução de 0,01 mm.	
3	relógio comparador	
4	Porta amostras	
5	Banho termostático, Tecnal, modelo TE-180.	
6	Suporte	
7	Câmeras de isolamento acústica	

Figura 18 - Itens do esquema do equipamento de cavitação.

Fonte: adaptado MIRANDA (2007).

4.8 AMPLITUDE DE PULSAÇÃO (ϕ)

Três condições de ensaio foram utilizadas, todas com a mesma medida de afastamento de 0,5mm da amostra para o transdutor. As condições foram:

- Condição #1 [$\phi=30 \mu\text{m}$]
- Condição #2 [$\phi=35 \mu\text{m}$]
- Condição #3 [$\phi=40 \mu\text{m}$]

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

A micrografia apresenta a microestrutura homogênea da fase austenística presente no aço inoxidável 304 e também alguns pontos de inclusões. Estas são características inerentes a este tipo de material.

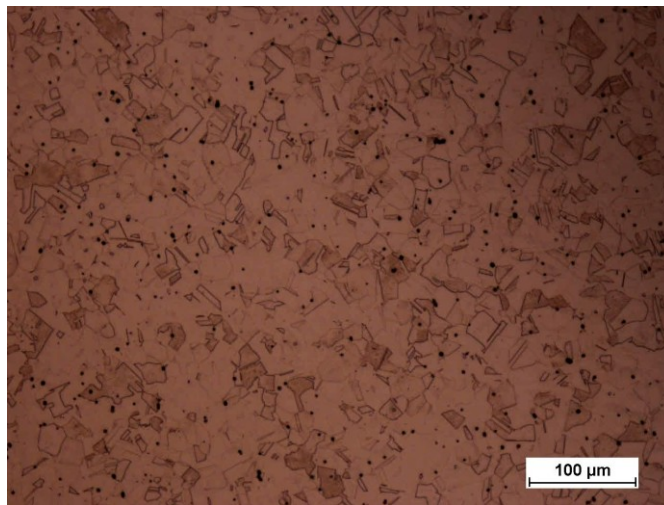


Figura 19 - Micrografia em MO da amostra mostrando a microestrutura austenística.
Fonte: O AUTOR (2015).

5.2 ENSAIOS

Foram realizados testes conforme as recomendações da norma ASTM-G32(2010) - “*ASTM Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus*” a fim de comparar os resultados obtidos em relação às diferentes amplitudes.

No intuito de verificar os resultados de cada ensaio, registrou-se a perda de massa de cada corpo de prova a cada intervalo de medição até totalizar 30 horas de ensaio.

Desta forma, considera-se possível avaliar a perda de massa através dos valores médios obtidos para cada condição e comparar os resultados. A tabela 4 apresenta os resultados da perda de material da amostra na condição #1 em 30 horas de ensaio cavitacional.

Tabela 4 - Resultados da erosão por cavitação na amostra 1.

Tempo [horas]	Fases[horas]	Massa da amostra	Massa erodida		Taxa de erosão/fase	Taxa de erosão acumulativa	Taxa de erosão
			fase	acumulada			
t	Δt	m	Δm	Δmc	vef	vef	tah
[h]	[h]	[mg]	[mg]	[mg]	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]
0	0	43,56884	0	0	0	0	0
0,5	30	43,56882	0,020	0,020	0,040	0,040	0,040
1,0	30	43,56880	0,020	0,040	0,020	0,040	0,040
1,5	30	43,56875	0,050	0,090	0,033	0,060	0,100
2,0	30	43,56866	0,090	0,180	0,045	0,090	0,180
2,5	30	43,56842	0,240	0,420	0,096	0,168	0,480
3,0	30	43,56792	0,500	0,920	0,167	0,307	1,000
4,0	60	43,56657	1,350	2,270	0,338	0,568	1,350
5,0	60	43,56452	2,050	4,320	0,410	0,864	2,050
6,0	60	43,56240	2,120	6,440	0,353	1,073	2,120
7,0	60	43,56025	2,150	8,590	0,307	1,227	2,150
8,0	60	43,55826	1,990	10,580	0,249	1,323	1,990
10,0	120	43,55449	3,770	14,350	0,377	1,435	1,885
12,0	120	43,55055	3,940	18,290	0,328	1,524	1,970
14,0	120	43,54643	4,120	22,410	0,294	1,601	2,060
16,0	120	43,54251	3,920	26,330	0,245	1,646	1,960
18,0	120	43,53872	3,790	30,120	0,211	1,673	1,895
20,0	120	43,53465	4,070	34,190	0,203	1,710	2,035
22,0	120	43,53040	4,250	38,440	0,193	1,747	2,125
24,0	120	43,52615	4,250	42,690	0,177	1,779	2,125
26,0	120	43,52218	3,970	46,660	0,153	1,795	1,985
28,0	120	43,51811	4,070	50,730	0,145	1,812	2,035
30,0	120	43,51421	3,900	54,630	0,130	1,821	1,950

Fonte: O AUTOR (2015).

Na tabela 4, podemos ver que a taxa de erosão a partir de 5 horas de ensaio oscila em valores próximos, máximo 2,150 mg/h e mínimo 1,885 mg/h, isso significa que foi atingida a taxa máxima de erosão, o que se confirma observando a perda de massa por fase a partir da quinta hora onde seus valores oscilam minimamente. A taxa máxima de erosão permaneceu em um valor médio de 2,02 mg/h.

Da mesma forma como na primeira amostra, o teste de cavitação foi realizado de acordo com a condição #2. Também foi realizado o ensaio num tempo total de 30 horas. A tabela 5 apresenta os resultados nesta condição e observando um aumento da perda da massa por erosão.

Tabela 5 - Resultados da erosão por cavitação na amostra 2.

Tempo [horas]	Fases[horas]	Massa da amostra	Massa erodida		Taxa de erosão/fase	Taxa de erosão acumulativa	Taxa de erosão
			fase	acumulada	vef	vef	tah
t	Δt	m	Δm	Δmc	vef	vef	tah
[h]	[h]	[mg]	[mg]	[mg]	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]
0	0	43,76361	0	0	0	0	0
0,5	30	43,76361	0,000	0,000	0,000	0,000	0
1,0	30	43,76362	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010	-0,020
1,5	30	43,76358	0,040	0,030	0,027	0,020	0,080
2,0	30	43,76348	0,100	0,130	0,050	0,065	0,200
2,5	30	43,76324	0,240	0,370	0,096	0,148	0,480
3,0	30	43,76275	0,490	0,860	0,163	0,287	0,980
4,0	60	43,76109	1,660	2,520	0,415	0,630	1,660
5,0	60	43,75870	2,390	4,910	0,478	0,982	2,390
6,0	60	43,75590	2,800	7,710	0,467	1,285	2,800
7,0	60	43,75305	2,850	10,560	0,407	1,509	2,850
8,0	60	43,75028	2,770	13,330	0,346	1,666	2,770
10,0	120	43,74511	5,170	18,500	0,517	1,850	2,585
12,0	120	43,73968	5,430	23,930	0,452	1,994	2,715
14,0	120	43,73439	5,290	29,220	0,378	2,087	2,645
16,0	120	43,72880	5,590	34,810	0,349	2,176	2,795
18,0	120	43,72361	5,190	40,000	0,288	2,222	2,595
20,0	120	43,71848	5,130	45,130	0,257	2,257	2,565
22,0	120	43,71308	5,400	50,530	0,245	2,297	2,700
24,0	120	43,70791	5,170	55,700	0,215	2,321	2,585
26,0	120	43,70237	5,540	61,240	0,213	2,355	2,770
28,0	120	43,69651	5,860	67,100	0,209	2,396	2,930
30,0	120	43,69105	5,460	72,560	0,182	2,419	2,730

Fonte: O AUTOR (2015).

Na tabela 5 os valores de taxa de erosão a partir 5 horas de ensaio, ponto onde se torna máxima a taxa de erosão, oscilam entre máximo 2,930 mg/h e mínimo 2,585 mg/h, no qual taxa máxima de erosão permaneceu em um valor médio de 2,695 mg/h.

A tabela 6 apresenta os resultados nesta condição #3. Podemos observar como na condição #2 que ocorre o aumento da perda de massa acumulada, taxa de erosão acumulada e a taxa de erosão.

Tabela 6 - Resultados da erosão por cavitação na amostra 3.

Tempo [horas]	Fases[horas]	Massa da amostra	Massa erodida		Taxa de erosão/fase	Taxa de erosão acumulativa	Taxa de erosão
			fase	acumulada	vef	vef	taf
t	Δt	m	Δm	Δmc	vef	vef	taf
[h]	[h]	[mg]	[mg]	[mg]	[mg/h]	[mg/h]	[mg/h]
0	0	45,88728	0	0	0	0	0
0,5	30	45,88724	0,040	0,040	0,080	0,080	0,080
1,0	30	45,88718	0,060	0,100	0,060	0,100	0,120
1,5	30	45,88718	0,000	0,100	0,000	0,067	0,000
2,0	30	45,88697	0,210	0,310	0,105	0,155	0,420
2,5	30	45,88642	0,550	0,860	0,220	0,344	1,100
3,0	30	45,88555	0,870	1,730	0,290	0,577	1,740
4,0	60	45,88276	2,790	4,520	0,698	1,130	2,790
5,0	60	45,87936	3,400	7,920	0,680	1,584	3,400
6,0	60	45,87583	3,530	11,450	0,588	1,908	3,530
7,0	60	45,87242	3,410	14,860	0,487	2,123	3,410
8,0	60	45,86905	3,370	18,230	0,421	2,279	3,370
10,0	120	45,86261	6,440	24,670	0,644	2,467	3,220
12,0	120	45,85587	6,740	31,410	0,562	2,617	3,370
14,0	120	45,84903	6,840	38,250	0,489	2,732	3,420
16,0	120	45,84260	6,430	44,680	0,402	2,792	3,215
18,0	120	45,83658	6,020	50,700	0,334	2,817	3,010
20,0	120	45,83054	6,040	56,740	0,302	2,837	3,020
22,0	120	45,82380	6,740	63,480	0,306	2,885	3,370
24,0	120	45,81715	6,650	70,130	0,277	2,922	3,325
26,0	120	45,81015	7,000	77,130	0,269	2,967	3,500
28,0	120	45,80304	7,110	84,240	0,254	3,009	3,555
30,0	120	45,79631	6,730	90,970	0,224	3,032	3,365

Fonte: O AUTOR (2015).

Os valores de taxa de erosão a partir 5 horas de ensaio, ponto onde se torna máxima, atingiu valores entre máximo 3,555 mg/h e mínimo 3,01 mg/h, no qual taxa máxima de erosão permaneceu em um valor médio de 3,33 mg/h.

Dos dados obtidos dispostos nas tabelas 4, 5 e 6, podemos ver que ocorreu o aumento de parâmetros que quantificam a influencia do impacto do fenômeno da cavitação com a amplitude: a perda de massa acumulada e taxa de erosão com a amplitude.

O gráfico 20 apresenta a comparação da perda de massa acumulada com o tempo nas três condições de ensaio. Vemos claramente no gráfico o aumento proporcionado pela amplitude de ensaio no acréscimo da perda de massa acumulada.

Ao final do ensaio vemos que a cada “step” houve um aumento em torno de 20% de perda acumulada em 30 horas de ensaio.

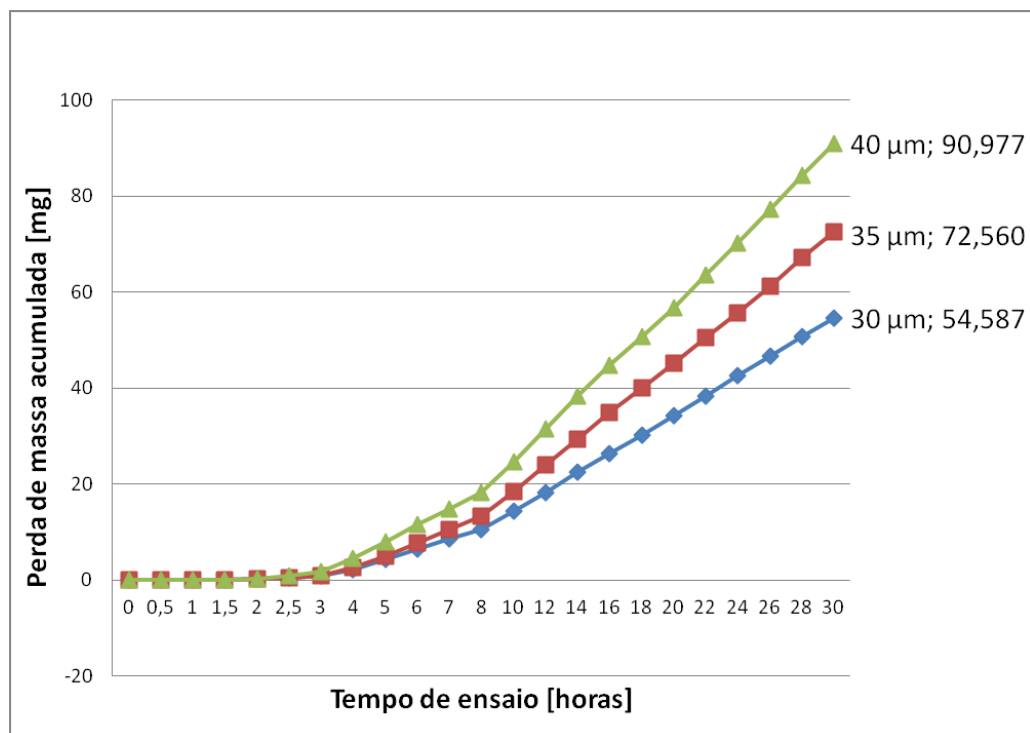


Figura 20 - Perda de massa: Intercomparação dos resultados.

Fonte: O AUTOR (2015).

A figura 21 apresenta a comparação da taxa de erosão em relação ao tempo nas três condições. Ele revela que a maior taxa de erosão foi estabelecida com a maior amplitude. Podemos ver também que apesar do aumento da taxa máxima a sua proporção de aumento decresceu.

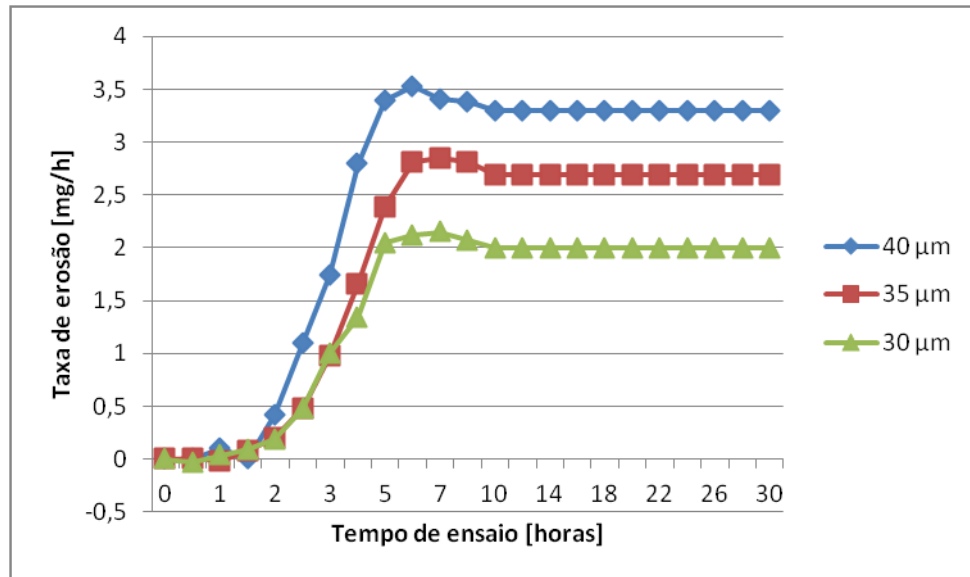


Figura 21 - Gráfico apresentando a variação da taxa de erosão nas três condições propostas.

Fonte: O AUTOR (2015).

A figura 22 apresenta a variação da perda de massa acumulada de ensaio em relação à amplitude. Vemos que houve um comportamento linear da perda massa do material com a amplitude. Diferentemente do resultado encontrado por CUPPARI *et al.*,(1999), que em seu estudo experimental, verificou uma perda de massa não linear e com um máximo de erosão na amplitude de ensaio de 35 μm em um afastamento 2 milímetros entre o sonotrodo e a amostra estacionária, mantendo igualmente todos os outros parâmetros de ensaio, este ensaio apresentou um comportamento totalmente diferente, alterando apenas a amplitude.

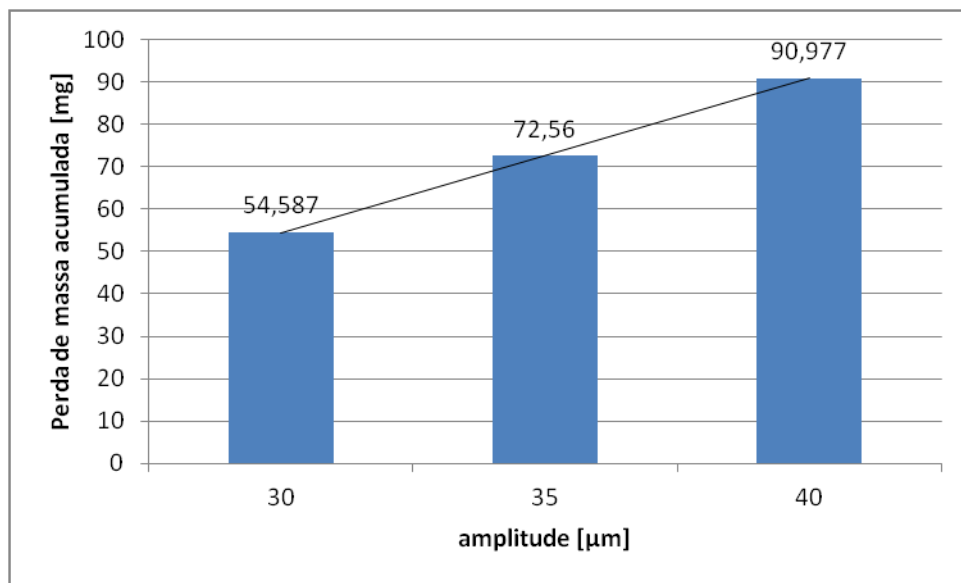


Figura 22 - Gráfico apresentando a variação perda de massa acumulada total versus a amplitude.

Fonte: O AUTOR (2015).

Podemos ao final deste trabalho constatar que pode ser sim, provável que o equipamento é sensível a altas amplitudes, visto que ao final de noventa horas de ensaio o equipamento para a simulação da cavitação permaneceu em legítimas e apropriadas condições de uso, diferentemente do que ocorrido com SENA *et al.*, (2013), que em 90 horas de ensaio, com este mesmo equipamento, ocorreram duas falhas por fadiga no sonotrodo.

6 CONCLUSÕES

Com este experimento realizado e a análise dos resultados podemos concluir que:

- ✓ Há um comportamento linear sobre a perda de massa acumulada e proporcional a 20 % em cada “step”.
- ✓ O aumento da amplitude representou uma maior perda de massa acumulada, taxa de erosão acumulada e taxa de erosão.
- ✓ Apesar do aumento da taxa máxima a sua proporção de aumento decresceu.
- ✓ O comportamento da perda de massa acumulada, taxa de erosão acumulada e taxa de erosão diferem totalmente alterando apenas distancia entre o sonotrodo e a amostra estacionária.
- ✓ Pode ser possível sim, que o equipamento seja sensível à alta amplitude.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Sugere-se a realização de ensaios em mesma liga diminuindo os “steps” da amplitude para maiores pontos de ensaio, a fim de se avaliar o comportamento da erosão cavitacional em toda a faixa de amplitudes permitida pelo equipamento.
- Sugere-se a realização de ensaios com afastamentos diferentes entre o sonotrodo e a amostra estacionária, avaliando o comportamento da erosão cavitacional e comparando com resultados de literaturas existentes (Cuppari *et al.*, 1999).
- Sugere-se a realização de ensaios de mesma variação de parâmetro com outros materiais e comparando estes resultados com os existentes nas literaturas (Cuppari *et al.*, 1999).
- Numa outra frente de pesquisa, mas diretamente ligada ao presente estudo, sugere-se um estudo mais aprofundo das razões da causa de falhas por fadiga no sonotrodo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8108: **Ataque com reativos metalográficos em ligas ferrosas**, 1983.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6507: **Materiais Metálicos – Dureza Vickers – Parte 1: Método de ensaio**, 2008.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13284: **Preparação de corpos de provas para análise metalográfica**, 1995.

AGUILAR, Ivan Fernney Ibañez. **Medição e influencia da cavitação induzida por ultrassom na erosão de materiais de engenharia**. Rio de Janeiro, 2014.

ALLENSTEIN, Ângela Nardelli. **Estudo da resistência à cavitação do aço inoxidável matensítico CA6-NM nitretado por plasma**. Curitiba, 2007.

ASTM-G32. **Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus**. 2010. ASTM-G32/2010.

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

CUPPARI, M. G., Padovese, L. R. **Correlation between collapse pressure and material loss in cavitation erosion**. São Paulo, 1999.

DA SILVA, Flávio José. **Erosão, corrosão, erosão-corrosão e cavitação do aço ABNT 8550 nitretado a plasma**. Uberlândia, 2008.

DULAR, Matevz., BACHERT, Bernd., STOFFEL, Bernd., SIROK, Brane. **Relationship between cavitation structures and cavitation damage**. Elsevier, 2004.

GRAJALES, Dairo Hernán Mesa. **Análise dos mecanimos de dano de aços inoxidáveis austeníticos com elevado teor de nitrogênio durante desgaste erosivo por cavitação**. São Paulo, 2010.

ITODI: Páginas com alguns artigos e informações sobre algumas áreas técnicas. **Válvulas de controlo**. Disponível em: < [Itodi.est.ips.pt/gsilva/.../a_teoricas/4-Válvulas%20de%20controlo.pdf](http://itodi.est.ips.pt/gsilva/.../a_teoricas/4-Válvulas%20de%20controlo.pdf)>. Acesso em: 10 de maio 2015.

MATHIAS, Arthur Cardozo. **Válvulas: industriais, segurança, controle: tipos, seleção, dimensionamento.** São Paulo. 2008.

MESA, D.H., Pinedo, C.E., Tschiptschin, A.P. **Improvement of the cavitation erosion resistance of UNS S31803 stainless steel by duplex treatment,** 2010.

MIRANDA, C. Z. **Projeto, fabricação e operação de uma máquina de ensaio de erosão por cavitação.** Joinville, 2007.

PFLITSCH, C., Curdts, B., Buck, V., Atakan, B., **Wear Properties of MOCVD-grown Aluminium Oxide Films Studied by Cavitation Erosion Experiments. Surface & Coatings Technology** 201, 2007, pp. 9299-9303.

PLESSET, M.S., CHAPMAN, R. B. **Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary.** California, 1970.

PUKASIEWICZ, Anderson Geraldo Marena. **Desenvolvimento de revestimentos Fe-Mn-Cr-Si-Ni resistentes à cavitação depositadas por aspersão ASP.** Curitiba, 2008.

SANTOS, M. S., Lodeiro, C., Capelo-Martinez, José-Luis. **Ultrasound in Chemistry: Analytical Applications.** Weinheim, 2009.

SENA, L. F., Rabelo, M. B. **Calibração do equipamento de cavitação ultrassônica e análise de resistência à cavitação das ligas de inconel 625, 686 e hastelloy c276 depositados por soldagem no aço astm a516 gr60.** Vitoria, 2013.

TOMÁS, M. T. D. L. G. **Estudo do fenômeno da cavitação de técnicas experimentais.** Porto, 1986.

ZUM-GAHR, K. **Microstructure and wear of materials.** First. Amsterdam: Elsevier, 1987.