

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

LUIZ FERNANDO MOREIRA SENA

MARCELO BONESI RABELO

**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**

Vitória, 2013

LUIZ FERNANDO MOREIRA SENA

MARCELO BONESI RABELO

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

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.

Orientador: Prof. Dr. Temístocles de Sousa  
Luz

Co-orientador: Prof. Dr. Flávio José da  
Silva/

Vitória, 2013

SENA, Luiz Fernando Moreira; RABELO, Marcelo Bonesi

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/ Luiz Fernando Moreira Sena; Marcelo Bonesi Rabelo – 2013.

[Quantidade de páginas] 66f.

Orientador: Flávio José da Silva/ 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. DIFICULDADES ENCONTRADAS. 6. CONCLUSÕES. 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS. 8. REFERÊNCIAS. I. Universidade Federal do Espírito Santo. Departamento de Engenharia Mecânica. Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais. II. Título.

LUIZ FERNANDO MOREIRA SENA

MARCELO BONESI RABELO

**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**

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 \_\_\_\_\_ de setembro de 2013.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Orientador Temístocles de Sousa Luz, D.Sc.  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Co-orientador Flávio José da Silva, D.Sc.  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

Eng. Davi Pereira Garcia  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

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



Primeiramente a Deus, que nos deu condições de enfrentar todas as dificuldades durante toda trajetória acadêmica. Aos nossos familiares e amigos que sempre estiveram juntos nas horas difíceis.

## **AGRADECIMENTOS**

- ✓ Ao nosso orientador, Prof. Dr. Flávio José da Silva por acreditar neste trabalho e em nossa capacidade, pela paciência, ajuda e orientação prestadas, de fundamental importância para o sucesso deste trabalho.
- ✓ A nossos pais Mauricio Faria Santos Rabelo Luiz Antonio Moreira da Silva e nossas mães Luciana Helena Montenegro Bonesi e Maria Penha Barbosa Sena.

“A persistência é o menor caminho do êxito” ...”.

Charles Chaplin

## RESUMO

Com o objetivo de calibrar o equipamento de cavitação ultrassônica, por meio do método direto, foi utilizada a norma ASTM G32-98, assim como foi utilizado o mesmo equipamento, por meio do método indireto, para verificar a resistência à cavitação das superligas de níquel, Inconel 625, Inconel 686 e Hastelloy C-276, depositadas por soldagem TIG em uma chapa de aço ASTM A516 Gr60. Com esses resultados obtidos, foi realizada uma comparação da resistência à cavitação das ligas ensaiadas com algumas superligas de cobalto comerciais existentes para o determinado fim, como o Cavitec e o Stellite. O equipamento de cavitação ultrassônica mostrou-se perfeitamente calibrado e adequado para a utilização, já o ensaio realizado nos revestimentos de superliga de níquel, demonstrou que o Inconel 625 obteve um desempenho superior em relação ao Inconel 686 e ao Hastelloy C-276.

**Palavras-Chave:** Cavitação ultrassônica; Método direto; Método indireto; Calibração; Superligas; Inconel 625; Hastelloy C-276; Inconel 686.

## ABSTRACT

In order to calibrate the vibratory apparatus for cavitation erosion, through the direct method, it was used the ASTM G32-98 standard, and then the same equipment was used, through indirect method, to verify the resistance to cavitation erosion of nickel, Inconel 625, Inconel 686 and Hastelloy C-276 superalloys, deposited by TIG welding on a common steel carbon plate. With these results, the resistance to cavitation erosion of each alloy tested was compared with some commercial cobalt alloys, as Cavitec and Stellite. The the vibratory apparatus has shown to be perfectly calibrated and fit for the use, and the test performed nickel superalloys coating, has shown that Inconel 625 had a superior performance in relation to Inconel 686 and Hastelloy C-276.

**Keywords:** Ultrasonic cavitation; Direct method; Indirect method; Superligas; Inconel 625; Hastelloy C-276; Inconel 686.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Figura 2.1 – Classificação dos modos de desgaste erosivo.....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 19                                   |
| Figura 2.2 – Formação e colapso das cavidades.....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>Erro! Indicador não definido.</b> |
| Figura 2.3 – a) Rotor de turbina Francis apresentando deste erosivo por cavitação. b) Rotor de bomba centrífuga danificado por cavitação. ..                                                                                                                                                                                          | <b>Erro! Indicador não definido.</b> |
| Figura 2.4 – Representação esquemática do fenômeno da cavitação: a) nucleação e colapso de micro-bolhas emitindo ondas de choque, b) formação e colapso de micro-jatos.....                                                                                                                                                           | 24                                   |
| Figura 2.5 – Formação de micro jatos, a) Modelo da formação de uma microbolha (TOMITA, 1990). E b) Fotografia da formação de um micro jato (UNIVERSITÄT ROSTOCK, FB CHEMIE, GERMANY, capturado em 18 de maio de 2003). ....                                                                                                           | 25                                   |
| Figura 2.6 – Esquema do equipamento para ensaio de erosão por cavitação.....                                                                                                                                                                                                                                                          | 27                                   |
| Figura 2.7 – Esquema mostrando o método indireto do ensaio de EC. ....                                                                                                                                                                                                                                                                | 27                                   |
| Figura 2.8 – Representação das curvas características de ensaios EC, (a) Identificação dos estágios da taxa de perda de massa com o tempo, (b) Parâmetros da curva de perda de massa com o tempo, A= tempo nominal de incubação, tangente B= taxa máxima de EC, tangente C= taxa terminal de EC, D= intercepto da linha terminal..... | 28                                   |
| Figura 2.9 – Relação perda de massa e dureza de diferentes aços-C.....                                                                                                                                                                                                                                                                | 29                                   |
| Figura 2.10 – Relação perda de massa e dureza de diferentes ligas.....                                                                                                                                                                                                                                                                | 30                                   |
| Tabela 2.1 – Taxas de erosão por cavitação obtidas em ensaios de cavitação pelo método indireto, distância corpo-contra corpo de 1 mm, amplitude de 40 $\mu$ m, frequência de 20 kHz, temperatura de 20°C. ....                                                                                                                       | 32                                   |
| Tabela 2.2 – Propriedades físicas e mecânicas do Níquel e do Ferro (ASM, 1990) .                                                                                                                                                                                                                                                      | 34                                   |
| Figura 3.1 – Bancada de Cavitação Vibratória .....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 37                                   |
| Figura 3.2 – Equipamento Banho Termostático, Tecnal, modelo TE-180 .....                                                                                                                                                                                                                                                              | 37                                   |
| Figura 3.3 – Equipamento Gerador de ultrassom, Telsonic DG-2000.....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 38                                   |
| Figura 3.4 – Equipamento de limpeza por ultrassom .....                                                                                                                                                                                                                                                                               | 38                                   |
| Figura 3.5 – Balança Analítica de precisão .....                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 39                                   |
| Figura 3.6 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) .....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 39                                   |

|                                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.7 – Analisador Tridimensional de Superfície .....                                                                                                                                                       | 40 |
| Figura 3.8 – Rugosímetro Portátil.....                                                                                                                                                                           | 40 |
| Figura 3.9 – Curvas de perda cumulativa de massa para Ensaios de Cavitação por vibração ultrassônica em amostras de Níquel 200 realizados em cinco laboratórios. ....                                            | 41 |
| Figura 3.10 – Detalhe do equipamento utilizado. ....                                                                                                                                                             | 43 |
| Figura 3.11 – Corpo de prova para realização do ensaio de erosão por cavitação vibratória.....                                                                                                                   | 45 |
| Figura 3.12 – Esquema da parte do dispositivo de ensaio utilizado nos testes de calibração. ....                                                                                                                 | 46 |
| Figura 3.13 – Representação esquemática do método indireto. ....                                                                                                                                                 | 49 |
| Figura 4.1 – a) Vista externa da bancada de ensaios, b) Vista interna do enclausuramento da bancada de ensaios, c) Detalhe para os ensaios de cavitação ultrassônica pelo método direto.....                     | 52 |
| Figura 4.2 – Perdas de massa dos corpos de prova ensaiados a cada intervalo de medição.....                                                                                                                      | 53 |
| Figura 4.3 – Perda média de massa acumulada ao longo do tempo dos corpos de prova ensaiados. ....                                                                                                                | 53 |
| Figura 4.4 – Taxas de perda de massa ao longo dos ensaios de erosão por cavitação induzida por vibração ultrassônica. ....                                                                                       | 56 |
| Figura 4.5 – a) Amostra lixada com lixas 220, 320, 420 e 600 mesh, b) Amostra após 6 horas de ensaio.....                                                                                                        | 56 |
| Figura 4.6 – Aparência da esperada pela norma ASTM G32 para a superfície após o ensaio.....                                                                                                                      | 57 |
| Figura 4.7 – Topografia de áreas da: a) periferia e b) do centro da amostra cavitada. ....                                                                                                                       | 58 |
| Figura 4.8– Imagens feitas em MEV mostrando aproximação de 50 vezes até 20.000 vezes de um ponto na superfície de uma das amostras expostas à EC por 6 horas. ....                                               | 60 |
| Figura 4.9 – Perda de massa acumulada para ensaios de Níquel 200 realizados em cinco laboratórios e perda de massa acumulada para os ensaios realizados com as amostras 1 e 2 no laboratório TRICORMA-UFES. .... | 61 |
| Figura 4.10 – Ensaio de líquido penetrante que comprovou a falha no sonotrodo....                                                                                                                                | 63 |

Figura 4.11 – a) Vista externa da bancada de ensaios, b) Vista interna do enclausuramento da bancada de ensaios, c) Detalhe do suporte de amostras projetado para ensaios de cavitação ultrassônica pelo método indireto. ....63

Figura 4.13 – Perda média de massa acumulada ao longo do tempo dos corpos de prova ensaiados. ....64

Figura 4.12 – Imagem feita em MEV mostrando aproximação de 1000 vezes de um ponto na borda da superfície de uma das amostras expostas à EC por 3 horas que evidencia os pontos de erosão nas marcas de lixamento. ....64

Figura 4.14 – Taxas de perda de massa ao longo dos ensaios de erosão por cavitação induzida por vibração ultrassônica. ....66

Figura 4.15 – Comparativo de perda de massa acumulada das ligas comerciais já conhecidas na literatura. ....66

Tabela 4.3 – Tempo de ensaio, período de incubação e taxa de erosão das ligas ensaiadas e materiais de referência.....67

Figura 4.16 – Comparação da resistência a cavitação das ligas Inconel 625, Inconel 686 e Hastelloy C-276 e ligas comerciais já conhecidas na literatura. ....69

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.1 – Material usado em estudo interlaboratorial.....                               | 44 |
| Tabela 4.1– Perda de massa a cada intervalo de medição.....                                | 52 |
| Tabela 4.2 – Perda de massa acumulada dos corpos de prova ao longo do tempo de ensaio..... | 54 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|           |                                                    |
|-----------|----------------------------------------------------|
| ABNT      | Associação Brasileira de Normas Técnicas           |
| ASTM      | <i>American Society for Testing and Materials</i>  |
| AWS       |                                                    |
| DEM       | Departamento de Engenharia Mecânica                |
| DIN       | <i>Deutsches Institut für Normung</i>              |
| EC        | Erosão Cavitacional                                |
| LABTECMEC | Laboratório de Tecnologia Mecânica                 |
| MEV       | Microscópio Eletrônico de Varredura                |
| TRICORMAT | Laboratório de Tribologia e Corrosão dos Materiais |
| UFES      | Universidade Federal do Espírito Santo             |

## SUMÁRIO

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                                | <b>17</b> |
| 1.1. HISTÓRICO E MOTIVAÇÃO .....                                          | 17        |
| 1.2. OBJETIVOS .....                                                      | 18        |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                      | <b>18</b> |
| 2.1. TIPOS DE DESGASTE EROSIVO .....                                      | 18        |
| 2.2. EROSÃO CAVITACIONAL .....                                            | 22        |
| 2.2.1. Conceitos fundamentais.....                                        | 22        |
| 2.2.2. Ensaios para determinação da resistência à erosão por cavitação .. | 25        |
| 2.2.3. Relação entre propriedades mecânicas e resistência à EC .....      | 29        |
| 2.3. SUPERLIGAS.....                                                      | 32        |
| 2.3.1. Superligas de Níquel.....                                          | 33        |
| <b>3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>                                 | <b>36</b> |
| 3.1. MATERIAIS.....                                                       | 36        |
| 3.2. EQUIPAMENTOS .....                                                   | 36        |
| 3.3. METODOLOGIA .....                                                    | 40        |
| 3.3.1 Procedimento experimental de calibração do equipamento .....        | 40        |
| 3.3.2 Procedimento experimental do ensaio de cavitação .....              | 47        |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                    | <b>51</b> |
| 4.1. RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO.....                                        | 51        |
| 4.2. RESULTADOS DE CAVITAÇÃO .....                                        | 62        |
| <b>5. DIFICULDADES ENCONTRADAS.....</b>                                   | <b>70</b> |
| <b>6. CONCLUSÕES.....</b>                                                 | <b>71</b> |
| <b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>                          | <b>72</b> |
| <b>8. REFERÊNCIAS .....</b>                                               | <b>73</b> |

## INTRODUÇÃO

### 1.1. HISTÓRICO E MOTIVAÇÃO

A cavitação é o fenômeno que consiste na formação e subsequente colapso de bolhas ou cavidades contendo vapor e/ou gás dentro de fases líquidas. A formação dessas bolhas ocorre devido à queda de pressão dentro de um escoamento. Se a pressão do fluxo atingir valores inferiores à pressão de saturação do fluido, dar-se-á início a formação de bolhas ou cavidades que escoarão para uma região de mais alta pressão até ocorrer seu colapso. Quando as bolhas ou cavidades colapsam próximas a uma superfície sólida ocorre uma grande liberação de energia e até a perda de matéria dessa superfície.

Este fenômeno acontece em válvulas, difusores, hélices de navio e principalmente nos rotores de máquinas de fluxo, como turbinas e bombas, onde é inevitável a ocorrência de regiões de alta e baixa pressão, podendo levar ao sucateamento desses componentes e possíveis falhas catastróficas, principalmente quando se trata de indústrias sensíveis como a indústria do petróleo, pois, no âmbito econômico, pequenas paradas para manutenção apresentam custos muito elevados, e no ambiental, qualquer falha pode levar a grandes desastres nos ecossistemas.

Diante disso, vários estudos têm sido realizados visando minimizar os efeitos desse fenômeno. Uma opção para isso é investir em melhorias nos projetos dos equipamentos ou nas condições de operação. Quando se atinge um limite de projeto e das condições de operação, deve-se investir na escolha e na melhoria dos materiais utilizados, sobretudo nos revestimentos e tratamentos térmicos e termoquímicos.

Para avaliar a resistência dos materiais quanto ao desgaste erosivo por cavitação, devem ser utilizados ensaios que permitam compará-los de forma rápida e confiável, e com viabilidade econômica. Um dos métodos utilizados é baseado na vibração ultrassônica, também chamado de cavitação vibratória, descrito na norma ASTM G32 (1998). O teste de vibração ultrassônica admite dois métodos: o direto e o indireto. Neste trabalho está descrito de forma detalhada qual a diferença entre os métodos.

Uma das ligas mais resistentes à cavitação são as superligas a base de cobalto, sendo o Stellite-6, uma dessas superligas. O Stellite-6 é composto por carbonetos (principalmente de W ou Mo) dispersos em uma solução rica em cobalto como matriz (GRAJALES, 2010). O Stellite-6 tem ampla aplicabilidade na produção de peças e recobrimentos utilizados em diversos tipos de turbinas, em que uma alta resistência à cavitação é requerida. Entretanto, o alto preço destas superligas e a dificuldade da sua usinagem tem motivado a procura por outras ligas mais acessíveis econômica e tecnologicamente (GRAJALES, 2010). Frente a isso, um grupo de material muito utilizado em aplicações em que se deseja alta resistência ao desgaste cavitacional são as superligas a base de níquel.

## 1.2. OBJETIVOS

Os objetivos desse trabalho são:

- Calibrar o equipamento de cavitação ultrassônica, conforme a norma ASTM G32-98.
- Verificar a resistência à cavitação de três superligas de níquel, Inconel 625, Hasteloy C-276 e Inconel 686.
- Comparar os resultados obtidos através da perda de massa acumulada e taxa de cavitação com resultados já conhecidos de outras bibliografias.

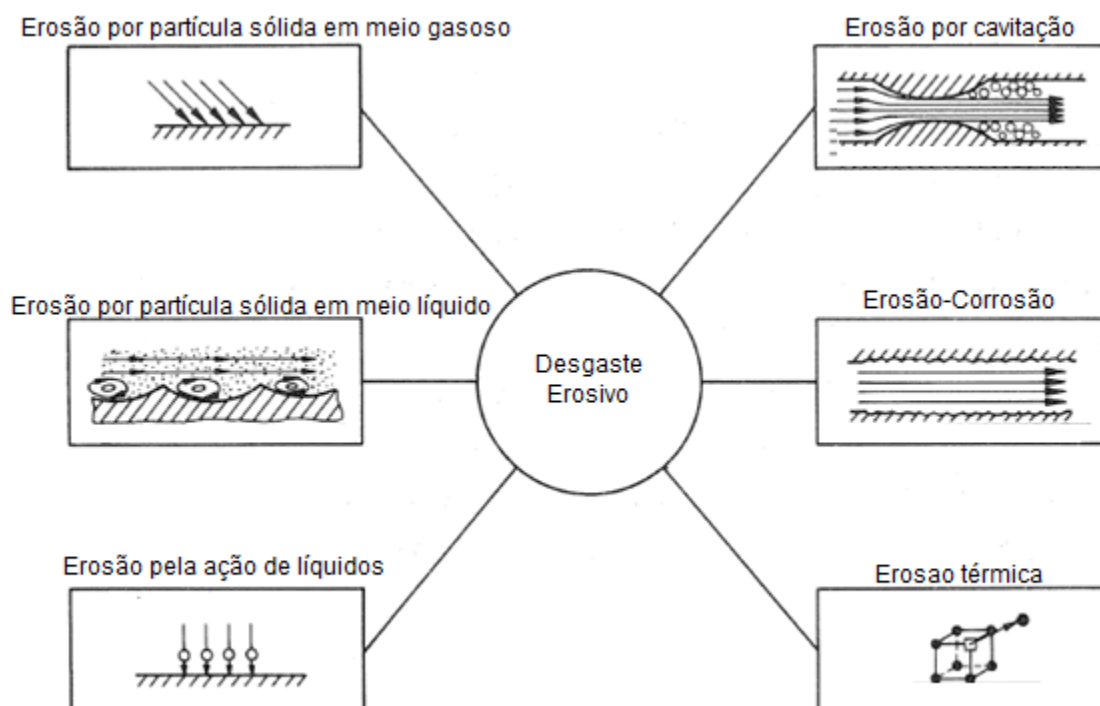
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. TIPOS DE DESGASTE EROSIVO

Segundo Zum Gahr (1987) o desgaste erosivo é causado pela ação do impacto repetitivo de partículas sólidas, líquidas, gasosas ou uma combinação dessas contra uma superfície sólida. A erosão é frequentemente observada em uma grande variedade de condições ambientais, principalmente naquelas que envolve transporte de fluidos (líquidos ou gases), com ou sem a presença de particulados. Equipamentos de diversos tipos de indústrias estão sujeitos a esse tipo de desgaste.

O desgaste erosivo pode ser dividido em 6 diferentes tipos, conforme a Figura 2.1: a) erosão por partículas sólidas em meio gasoso; b) erosão por partículas sólidas em meio líquido; c) erosão devido a ação de líquidos; d) erosão-corrosão; e) erosão por cavitação e f) erosão térmica (ZUM GAHR, 1987).

Figura 2.1 - Classificação dos modos de desgaste erosivo.



Fonte: Zum Gahr (1987).

A erosão por partículas sólidas em meio gasoso é causada por partículas sólidas que são carregadas pelo fluxo de gás ou vapor ou são aceleradas por forças externas. O ângulo de incidência da partícula influencia o desgaste substancialmente, e pode alterar o mecanismo de desgaste. A erosão por partículas sólidas pode resultar em problemas principalmente nas áreas de transporte pneumático de pó de carvão ou turbinas a gás (ZUM GAHR, 1987).

A erosão por partículas sólidas em meio líquido ocorre pela ação de uma corrente de líquido que carrega partículas sólidas, por exemplo, em tubulações para transporte de lama (ZUM GAHR, 1987).

A erosão devido à ação de líquidos é causada pela colisão de gotas de líquido em uma superfície sólida, ocorrendo, por exemplo, quando uma aeronave passa através da chuva ou em paletas de turbinas a vapor. No caso da erosão por partículas líquidas,

a velocidade de impacto é a variável mais influente e deve ser suficientemente elevada (ZUM GAHR, 1987).

A erosão por cavitação é capaz de causar sérios danos à superfície e ocorre devido à implosão de bolhas na superfície sólida. Ocorre principalmente em bombas em geral ou em turbinas hidráulicas quando as condições de velocidade, pressão, e fluxo em um fluido são capazes de nuclear bolhas de gás ou vapor de água (ZUM GAHR, 1987).

A erosão-corrosão descreve os danos causados pela ação simultânea de processos erosivos e corrosivos, presentes durante o transporte de líquidos quimicamente agressivos, como os presentes na indústria do petróleo. Na presença de meios quimicamente agressivos, a erosão pode atuar junto com a corrosão, resultando em efeitos mecânicos e eletroquímicos que levam a uma perda de massa do material maior que erosão e corrosão atuando separadamente (ZUM GAHR, 1987).

A erosão térmica inclui processos eletromecânicos que causam perda de material por fusão ou evaporação devido à ação de forças mecânicas, térmicas, elétricas ou magnéticas. Esse tipo de erosão pode ocorrer, por exemplo, em contatos elétricos quando ocorrem faíscas (ZUM GAHR, 1987).

Cada tipo de erosão tem seu mecanismo particular e depende de condições específicas. A erosão por partículas sólida e a erosão-corrosão, por exemplo, são influenciadas principalmente pela velocidade de impacto, pela quantidade e massa individual das partículas erosivas, pelo ângulo de incidência e pelo tipo de meio envolvido, dentre outros.

No capítulo seguinte será abordada de forma específica a erosão cavitacional (EC), um dos tipos de erosão mais comum na indústria em que se tem transporte de fluidos, merecendo o devido destaque a indústria petrolífera, principalmente nas áreas de produção e transporte.

## 2.2. EROSÃO CAVITACIONAL

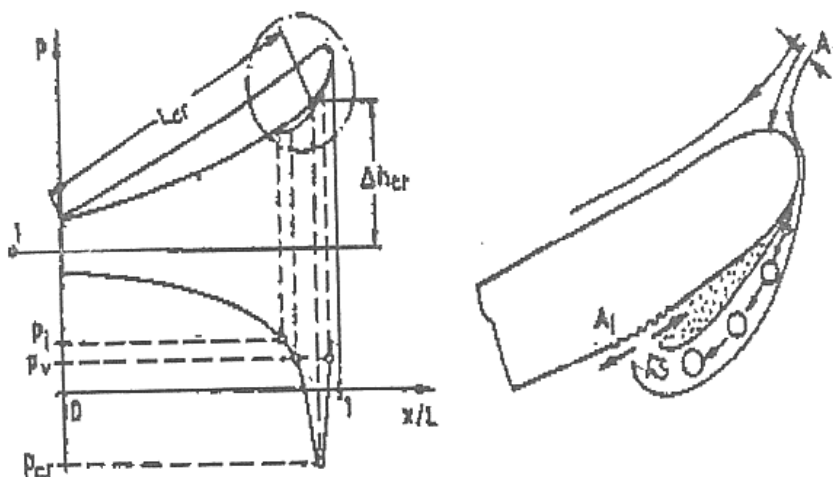
### 2.2.1. Conceitos fundamentais

O termo cavitação tem origem do latim *cavus*, que significa cavidade. A norma ASTM G32-98 define cavitação como sendo a formação e o subsequente colapso de bolhas ou “cavidades” contendo vapor ou gás, dentro de fases líquidas. Isto ocorre devido à queda repentina de pressão do líquido, podendo alcançar valores tão baixos que parte do fluido pode atingir sua pressão de saturação, mesmo à temperatura ambiente, causando a nucleação de bolhas de vapor.

Em 1754, Euler cita a possibilidade de ocorrência de zonas de pressões negativas e a formação de vazios nestas regiões, presentes em turbinas de reação (EULER, 1754, *apud* ALLENSTEIN, 2007). A erosão por cavitação foi primeiramente encontrada em pás de hélices de navio, na Inglaterra, em 1894 (FIGUEROA, 2006).

A Figura 2.2 abaixo mostra um desenho esquemático do fenômeno da cavitação ocorrendo na borda de uma turbina Francis (ALLENSTEIN, 2007) e a Figura 2.3 mostra uma fotografia real de um rotor de turbina Francis que sofreu cavitação.

Figura 2.2 - Formação e colapso das cavidades.



Fonte: Allenstein (2007).

Figura 2.3 – a) Rotor de turbina Francis apresentando dano erosivo por cavitação. b) Rotor de bomba centrífuga danificado por cavitação.

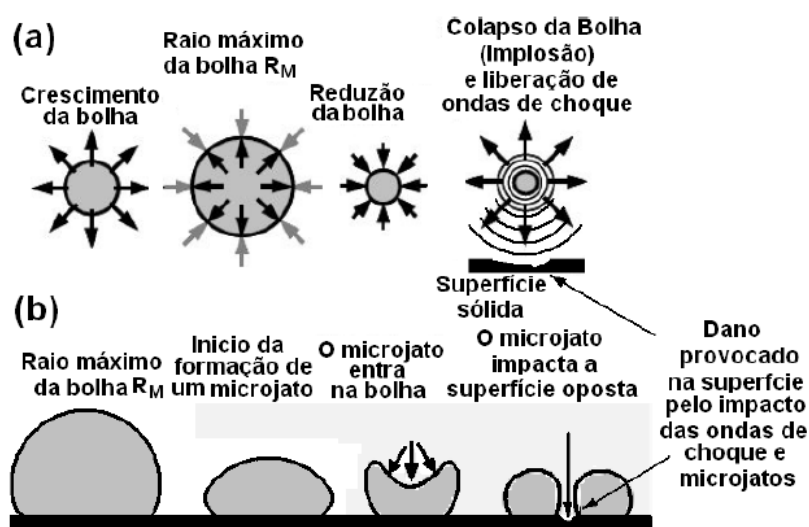


Fonte: Allenstein (2007), Coelho (2006).

As cavidades são formadas quando a pressão no fluxo ( $P$ ) cai a valores inferiores ( $P_{cr}$ ) a da pressão de vapor de líquido para aquela temperatura ( $P_v$ ), quando então se tem a formação de bolhas. Depois de formadas, estas cavidades, preenchidas com vapor ou gás, são carregadas pelo fluxo líquido até atingirem regiões de maior pressão ( $P_i$ ), onde elas colapsam por implosão. Essa implosão é conhecida como cavitação e se dá normalmente acompanhada de outros fenômenos, como vibração, ruídos e erosão das paredes sólidas próximas ao fluxo ( $A_i$ ) (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 2.4 mostra esquematicamente o fenômeno descrito acima.

Figura 2.4 – Representação esquemática do fenômeno da cavitação: a) nucleação e colapso de micro-bolhas emitindo ondas de choque, b) formação e colapso de micro-jatos.

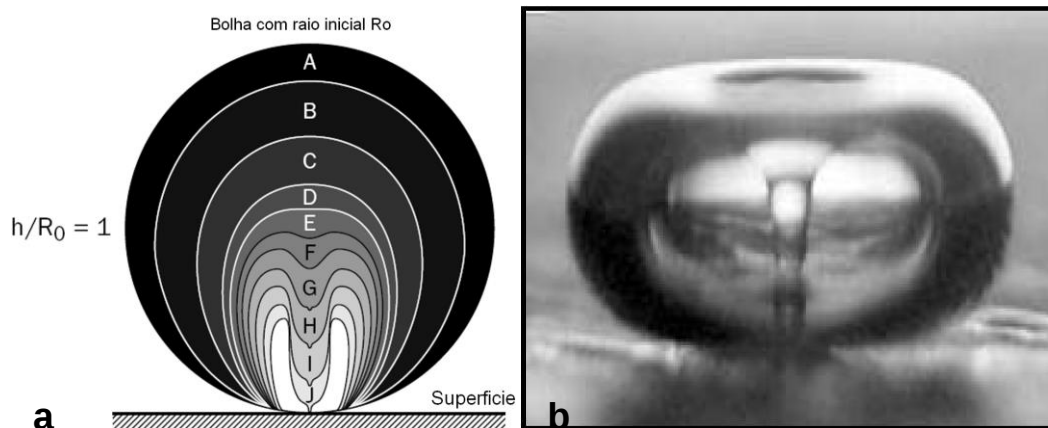


Fonte: Grajales (2010).

A formação de ondas de choque é provocada pelas perturbações do fluido durante sua movimentação. Pulsos de alta amplitude são gerados com a descontinuidade do escoamento e como consequência a superfície é submetida a impactos repetidos (CUPPARI, 2002, *apud* DA SILVA, 2008).

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 microjatos (GRAJALES, 2010). Os modelos propostos para explicar a formação dos microjatos de líquidos são baseados na instabilidade da simetria esférica da bolha quando se aproxima de uma superfície (CUPARI, 2002, *apud* DA SILVA, 2008). Algumas simulações numéricas deste fenômeno estimam jatos com velocidade de 130 m/s, resultando em pressões de impacto próximas de 2040 kgf/cm<sup>2</sup> (PLESSET; CHAPMAN, 1970, CUPARI, 2002; *apud* DA SILVA, 2008). A Figura 2.5a 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 2.5 – Formação de micro jatos, a) Modelo da formação de uma microbolha (TOMITA, 1990). E b) Fotografia da formação de um micro jato (UNIVERSITÄT ROSTOCK, FB CHEMIE, GERMANY, capturado em 18 de maio de 2003).



### 2.2.2. Ensaios para determinação da resistência à erosão por 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 (1998).

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

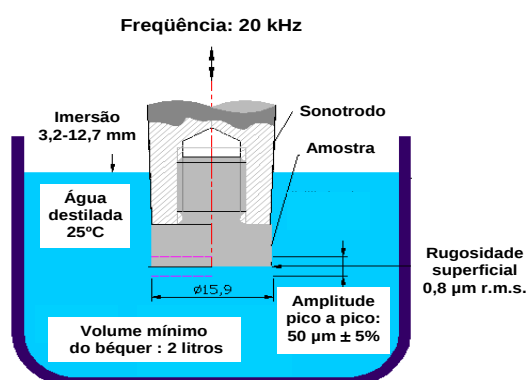
O método de cavitação ultrassônica consiste na imersão de uma ponta, chamada de sonotrodo, contendo um corpo de prova em sua extremidade, dentro de um líquido (Figura 2.6). Esta ponta é colocada para vibrar em alta frequência e baixa amplitude, produzindo zonas de alta e baixa pressão, nucleando e colapsando bolhas na amostra de teste milhares de vezes por segundo. 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 (ASMT G32, 1998). O esquema mostrado na Figura 2.6 refere-se ao método padrão de cavitação vibratória, chamado neste trabalho de método direto.

Uma variação deste método, chamado de método indireto ou método da amostra estacionária (Figura 2.7), 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.

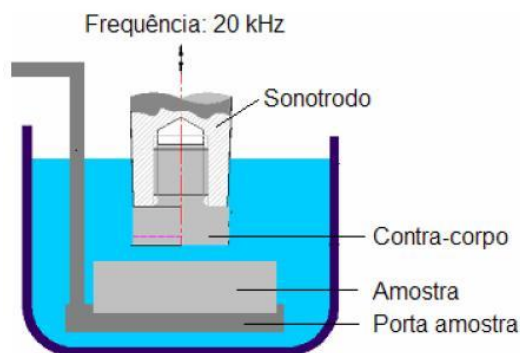
As bolhas geradas pelo contra corpo agem sobre o corpo de prova, resultando em uma erosão de 40 a 60% menor que aquela do método padrão (BOCCANERA *et al.*, 1998, *apud* DA SILVA, 2008). Não existe padronização quanto à distância entre o corpo de prova e o contra corpo, sendo que a máxima taxa de desgaste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

Figura 2.6 – Esquema do equipamento para ensaio de erosão por cavitação.



Fonte: ASTM G32 (1998).

Figura 2.7 – Esquema mostrando o método indireto do ensaio de EC.



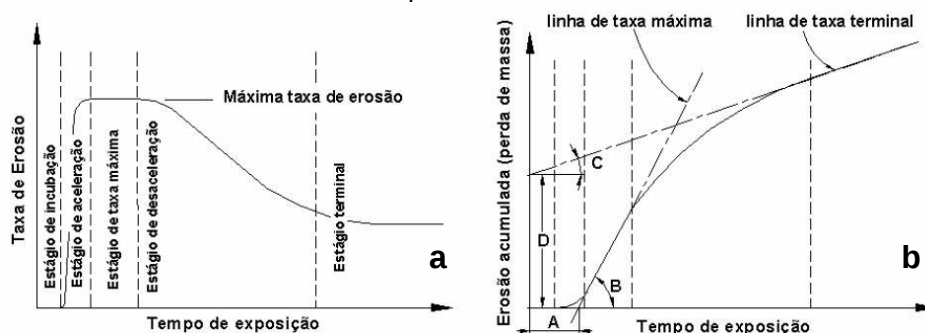
Fonte: Da Silva (2008).

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 G32-98.

#### 2.2.2.1. Avaliação dos resultados dos testes de EC

Nos testes de EC, pretende-se medir a perda de massa de determinado material para assim classificá-lo quanto à sua resistência a este tipo de desgaste. Durante o processo de erosão, podem-se notar diferentes etapas de perda de massa, surgindo assim uma denominação para cada uma delas: período de incubação, período de aceleração, taxa máxima, atenuação e período terminal ou catastrófico (DA SILVA, 2008). Na Figura 2.8 está representado um gráfico com os diferentes estágios de perda de massa.

Figura 2.8 – Representação das curvas características de ensaios EC, (a) Identificação dos estágios da taxa de perda de massa com o tempo, (b) Parâmetros da curva de perda de massa com o tempo, A= tempo nominal de incubação, tangente B= taxa máxima de EC, tangente C= taxa terminal de EC, D= intercepto da linha terminal.



Fonte: ASTM G32 (1998).

O período de incubação se caracteriza 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.

Logo após o período de incubação, a taxa de erosão aumenta gradativamente, chegando a um valor máximo. Essa segunda fase ocorre devido ao material já estar deformado e não absorver 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).

A taxa máxima de EC pode-se manter constante por longos ou curtos períodos. Após esse estágio observa-se 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).

As taxas de perda de massa com o tempo podem variar durante um ensaio e de um ensaio para outro. Já a perda de massa acumulada tem uma variação bem menos notável. Variações de até 20% nos resultados em testes realizados em mesmas condições são consideradas aceitáveis (ASMT G32, 1998).

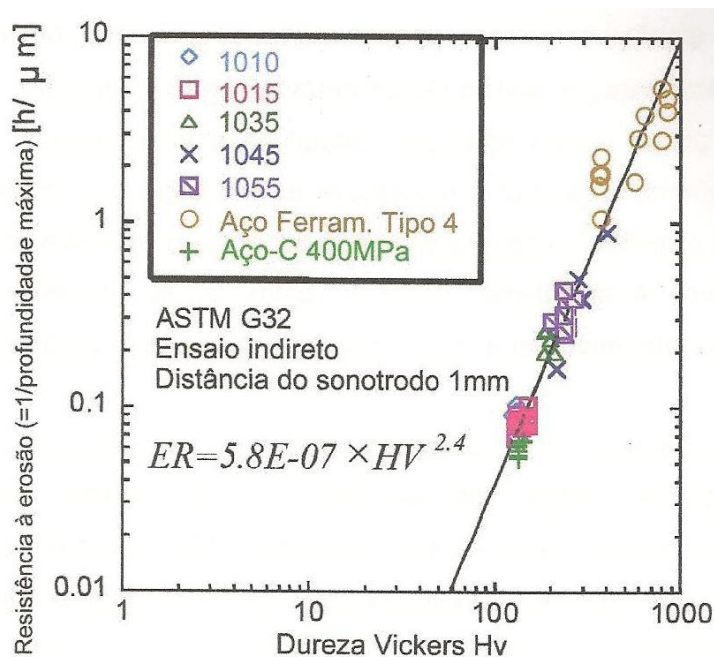
### **2.2.3. Relação entre propriedades mecânicas e resistência à EC**

A correlação entre propriedades mecânicas e resistência à EC tem como finalidade comparar diferentes ligas ou classes de materiais, bem como correlacionar as propriedades mecânicas com elevada resistência a EC, a um maior período de incubação e a uma menor taxa de erosão.

Dureza, resistência à tração, energia de deformação, resiliência, ductilidade, entre outras foram correlacionadas com a resistência à EC e tempo de incubação. Boas relações e correlações foram encontradas somente em algumas classes de materiais com a mesma microestrutura, por exemplo, dureza e resistência à cavitação de aços carbonos (Figura 2.9). Porém quando comparam-se diferentes materiais esta

correlação não é muito satisfatória, indicando que as propriedades mecânicas, isoladamente, não definem a resistência à cavitação (Figura 2.10) (PUKASIEWICZ, 2008).

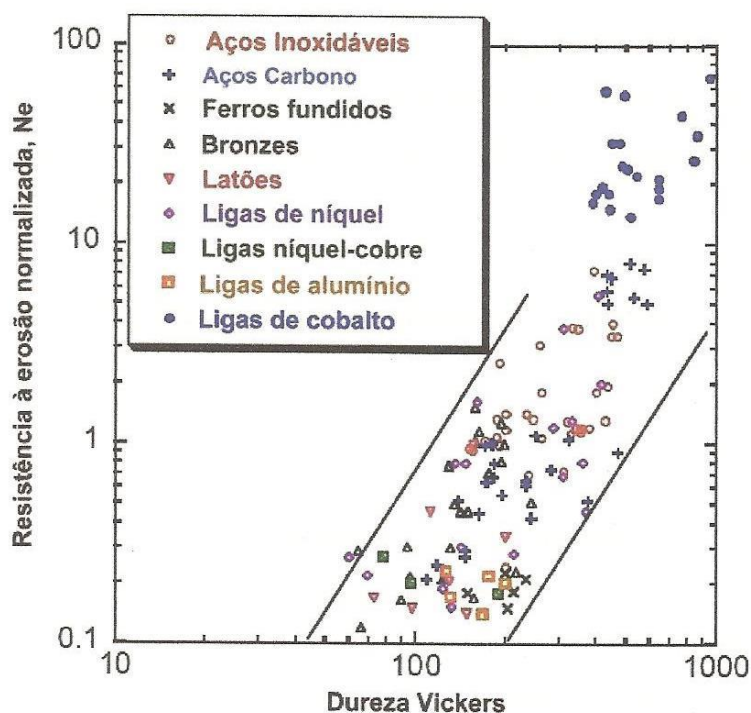
Figura 2.9 – Relação perda de massa e dureza de diferentes aços-C.



Fonte: Hattori e outros (2003), citado por Pukasiewicz (2008).

Portanto, a dureza somente pode ser correlacionada com a resistência à EC quando se compara materiais da mesma família (BOCCANERA *et. al.*, 1998, *apud* DA SILVA, 2008). Da mesma forma, a energia de deformação (área sob a curva tensão *versus* deformação até o ponto de fratura) só parece ser adequada como indicador de resistência à EC apenas para materiais muito dúcteis, e a resiliência para materiais frágeis (MARQUES *et. al.*, 2001, *apud* DA SILVA, 2008).

Figura 2.10 – Relação perda de massa e dureza de diferentes ligas



Fonte: Hattori e outros (2003), citado por Pukasiewicz (2008).

Segundo Richman e McNaughton, citados por Da Silva (2008) e Pukasiewicz (2008), a EC é mais bem descrita como um processo de fadiga, sendo desta forma, a resistência determinada predominantemente pelo coeficiente de resistência à fadiga, que depende fortemente do encruamento cíclico (endurecimento por deformação cíclica). Esta característica fica evidente quando se compara as ligas *Hadfield* e AISI 304, que têm dureza e microestrutura semelhantes. A maior resistência à EC das ligas *Hadfield* pode ser explicada pelo endurecimento por deformação desta liga.

Segundo Cuppari (2002) e Nakao e Hattori (2002), citados por Da Silva (2008), um dos motivos para a falta de correlação entre propriedades mecânicas e resistência à EC é que as propriedades são medidas em condições quase estáticas, enquanto que no fenômeno da cavitação são impostas altas taxas de deformação, ou fraturas dinâmicas.

Vários autores (SIMONEAU, 1986; RICHMAN, 1990; CUPARI, 2002) ressaltam que a resistência à EC não está relacionada apenas com as propriedades mecânicas, pois dependem também do meio e das características microestruturais do material, tais

como: estrutura cristalina, capacidade de encruamento, capacidade de transformação de fase e presença de uma segunda fase.

A Tabela 2.1 apresenta taxas de EC obtidas em ensaios de cavitação para alguns tipos de materiais, incluindo metais monofásicos, com diferentes estruturas, e polifásicos. Para aços com diferentes frações de austenita e ferrita, a taxa aumenta com o aumento da fase ferrítica (HEATHCOCK *et. al.*, 1936, *apud* DA SILVA, 2008).

Tabela 2.1 - Taxas de erosão por cavitação obtidas em ensaios de cavitação pelo método indireto, distância corpo-contra corpo de 1 mm, amplitude de 40 µm, frequência de 20 kHz, temperatura de 20°C.

| Material                     | Estrutura              | Taxa de erosão por cavitação (mg/min) |
|------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Alumínio                     | monofásico – CFC       | 0,500                                 |
| Cobre                        | monofásico – CFC       | 0,670                                 |
| Níquel                       | monofásico – CFC       | 0,290                                 |
| Zinco                        | monofásico – HC        | 1,670                                 |
| Cobalto *                    | monofásico – HC        | 0,002                                 |
| AISI 304                     | austenita              | 0,030                                 |
| SAE 1045                     | ferrita+ perlita       | 0,060                                 |
| AISI 347 (12% ferrita)       | austenita + ferrita    | 0,040                                 |
| Aço Duplex                   | austenita + ferrita    | 0,030-0,190                           |
| Ligas fundidas de Fe-Cr-Ni-C | austenita + carbonetos | 0,010-0,050                           |

(\*) Preece *et al.*, (1979)

Fonte: Cuppari, 2002.

### 2.3. SUPERLIGAS

As superligas constituem uma classe especial de materiais de engenharia, as quais são classificadas em três grandes grupos: Superligas a base de níquel, superligas a base de cobalto e superligas a base de ferro. Esta classificação considera o elemento químico majoritário presente na liga. Sims (1987) propôs uma definição de superligas, com razoável aceitação da comunidade científica e tecnológica, como sendo:

Ligas desenvolvidas para aplicações em serviço à alta temperatura, geralmente baseadas em elementos químicos do grupo VIIIA, na qual

tensionamentos mecânicos relativamente severos são encontrados, e no qual alta estabilidade superficial é frequentemente requerida.

Na presente revisão será dado enfoque às superligas à base de níquel.

### **2.3.1. Superligas de Níquel**

As superligas de níquel constituem uma das principais classes das superligas. O níquel puro apresenta estrutura cristalina cúbica de face centrada (FCF) estável até seu ponto de fusão, sem transformações alotrópicas de fase. Possui solubilidade total ao cobre, e ampla faixa de solubilidade para elementos como cromo e ferro. Sob alguns aspectos, apresenta uma marcante similaridade com o ferro, sendo um pouco mais denso, e tendo propriedades mecânicas e magnéticas bastante similares.

A expansão térmica nas ligas de níquel é menor do que nas ligas ferrosas autênticas e isso é importante para várias aplicações, e especialmente em turbinas de jatos, já que esses componentes são projetados com estreitas tolerâncias dimensionais para operar bem em serviço. Além disso, um baixo coeficiente de expansão térmica contribui para minimizar as tensões térmicas, minimizando assim a ocorrência de empenamento e fadiga térmica (ASM, 1930a). Entretanto, para aplicações industriais na forma de revestimento sobre aços, esta condição é crítica, porque pode causar um gradiente de expansão térmica, gerando elevados níveis de tensões, ocasionando problemas de fadiga térmica. Algumas propriedades do níquel e do ferro são listadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Propriedades físicas e mecânicas do Níquel e do Ferro (ASM, 1990)

| Propriedade                          | Níquel                | Ferro                 |
|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> )       | 8,89                  | 7,87                  |
| Ponto de fusão (°C)                  | 1.453                 | 1.535                 |
| Coef. de expansão térmica (m/(m.°C)) | $13,3 \times 10^{-6}$ | $11,8 \times 10^{-6}$ |
| Condutividade térmica (25°C) (W/m*K) | 92                    | 80                    |
| Resistividade elétrica ( $\Omega$ m) | $9,7 \times 10^{-8}$  | $7,0 \times 10^{-8}$  |
| Módulo de elasticidade (kPa)         | $204 \times 10^6$     | $211 \times 10^6$     |
| Limite de resistência (MPa)          | 462                   |                       |
| Limite de escoamento, 0,2% (MPa)     | 148                   |                       |
| Alongamento em 51 mm (%)             | 47                    |                       |

Fonte: ASM, 1990.

Embora níquel e ferro apresentem características muito semelhantes, a estrutura cristalina das ligas de níquel é completamente diferente do ferro. Isto torna metalurgia do níquel e de suas ligas de ferro, possibilitando uma alta versatilidade na elaboração de ligas com composições químicas as mais variadas para garantir excelente resistência mecânica e elevada resistência ao desgaste, especialmente em condições de elevada temperatura, além de excelente resistência à corrosão em uma infinidade de meios agressivos (ASM, 1990; ASM, 1993a).

O uso inicial das ligas de níquel para aplicações críticas em sistemas que operam em alta temperatura se deve especialmente à sua alta resistência à corrosão e oxidação, a qual é baseada na adição de cromo à liga, e a sua alta resistência mecânica à elevada temperatura, conferida pela presença de outros elementos químicos (BROOKS, 1984).

Essas ligas possuem uma matriz gama ( $\gamma$ ) com estrutura cúbica de face centrada (CFC), e são classificadas em quatro grupos, com base no mecanismo de aumento de resistência (BROOKS, 1984; SIMS, 1987; STOLOF, 1987; ASM, 1990):

- ✓ Ligas endurecidas por solução sólida.
- ✓ Ligas endurecidas por precipitação
- ✓ Ligas endurecidas por dispersão de óxido.
- ✓ Ligas fundidas.

O endurecimento por solução sólida pode ser aplicado em praticamente todas as ligas a base de níquel. O segundo grupo usa como mecanismo endurecedor a formação de precipitados, como fase intermetálicas tipo  $\gamma'$ ,  $\gamma''$ , Laves, além de boretos e carbonetos (ASM, 1990). O terceiro grupo obtém o aumento de resistência pela dispersão de partículas muito finas de óxido refratário ao longo da matriz. O último grupo é constituído por ligas que são destinadas a aplicações de fundição e podem ter sua resistência aumentada por solução sólida ou por precipitação.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. MATERIAIS

No presente trabalho os materiais avaliados pelo método indireto são os revestimentos de Inconel 625, Hastelloy C-276 e Inconel 686, produzidos conforme a tese de Silva (2011). Estes foram depositados por soldagem TIG em substrato de ASTM A516 Gr60. Utilizou-se a máquina de corte Labtom-3 Struers para preparar as amostras nas dimensões adequadas para os ensaios de cavitação ultrassônica. O contra corpo, utilizado pelo método indireto, é de Stellite-6, fornecida pela empresa Telsonic. Já a amostra utilizada na calibragem do equipamento, pelo método direto, é de Níquel 200, produzido no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LABTECMEC) da UFES.

#### 3.2. EQUIPAMENTOS

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

- ✓ Bancada de cavitação (Figura 3.1).
- ✓ Banho termostático, Tecnal, modelo TE-180 (Figura 3.2).
- ✓ Gerador de ultrassom da marca Telsonic DG-2000 (Figura 3.3).
- ✓ Equipamento de limpeza por ultrassom (Figura 3.4).
- ✓ Balança analítica com precisão de 0,01mg (Figura 3.5).
- ✓ Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) (Figura 3.6).
- ✓ Analisador Tridimensional de Superfície (Figura 3.7).
- ✓ Rugosímetro Portátil (Figura 3.8).
- ✓ Secador convencional.
- ✓ Dessecador ARSEC.
- ✓ Lixadeira Rotativa Struers.

Figura 3.1 - Bancada de Cavitação Vibratória

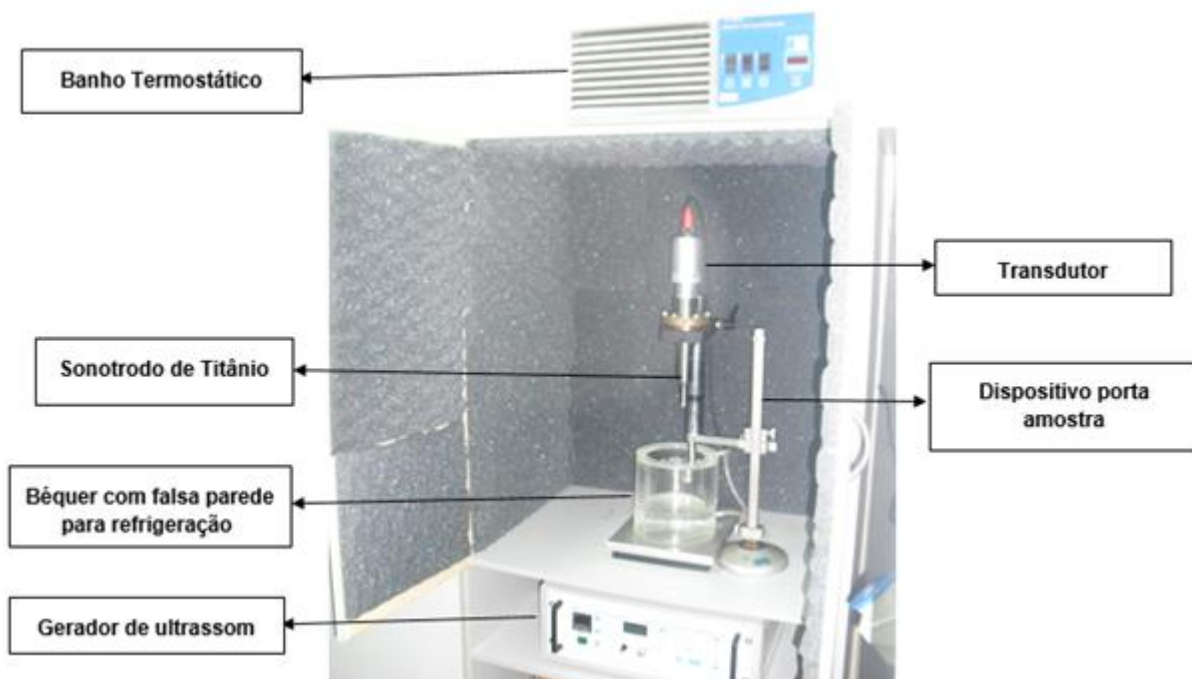


Figura 3.2 - Equipamento Banho Termostático, Tecnal, modelo TE-180



Figura 3.3 - Equipamento Gerador de ultrassom, Telsonic DG-2000



Figura 3.4 - Equipamento de limpeza por ultrassom



Figura 3.5 – Balança Analítica de precisão



Figura 3.6 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)



Figura 3.7 - Analisador Tridimensional de Superfície

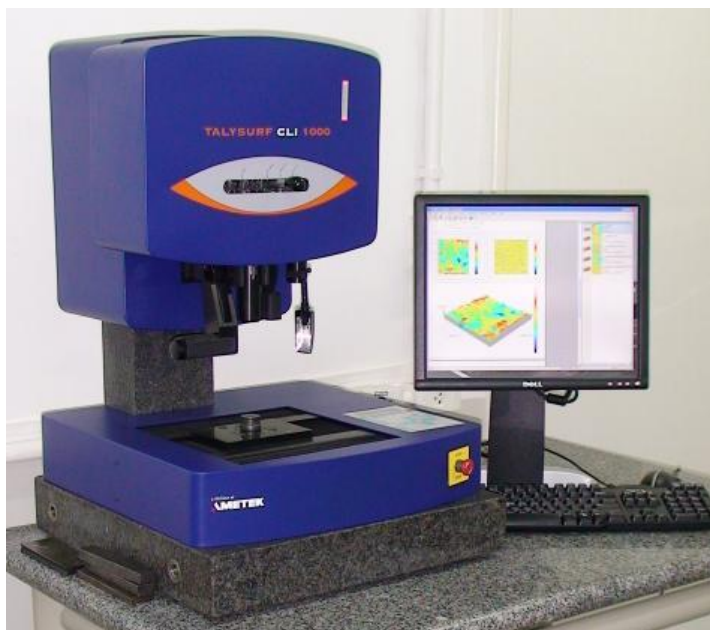


Figura 3.8 - Rugosímetro Portátil



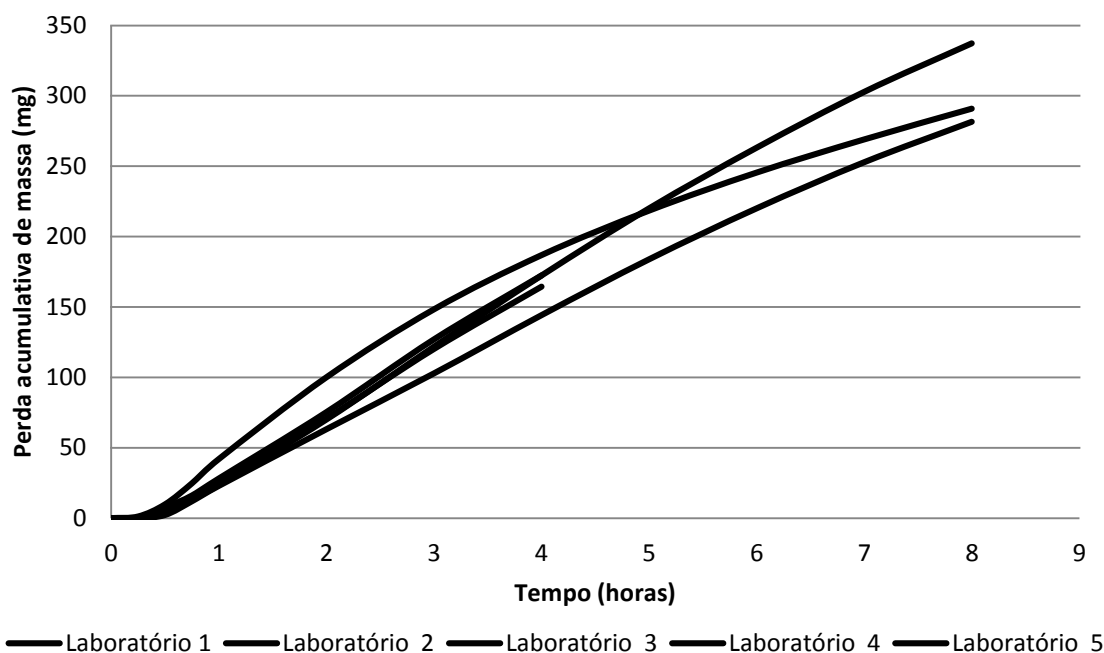
### 3.3. METODOLOGIA

#### 3.3.1 Procedimento experimental de calibração do equipamento

Os ensaios de calibração foram realizados conforme a norma ASTM G32 (1998) - “ASTM Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus” no Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORMAT) da Ufes, a fim de se

comparar os resultados obtidos com o equipamento desta universidade, com o intervalo de resultados obtidos em diversos laboratórios e apresentados através dos gráficos fornecidos pela norma e apresentados na Figura 3.9.

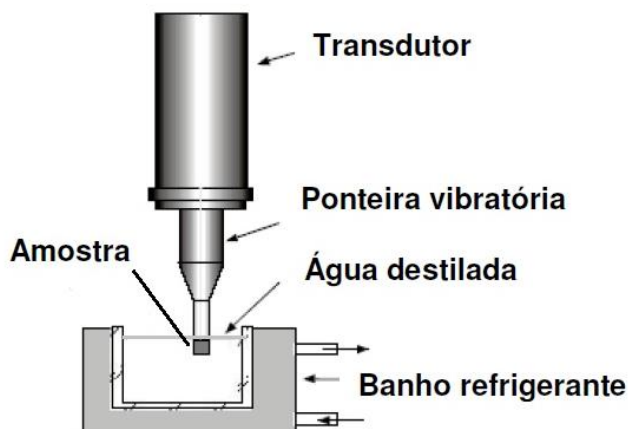
Figura 3.9 - Curvas de perda cumulativa de massa para Ensaios de Cavitação por vibração ultrassônica em amostras de Níquel 200 realizados em cinco laboratórios.



Fonte: ASTM G32 (1998).

Os ensaios foram realizados pelo método direto de erosão por cavitação vibratória segundo a norma ASTM G32-98, utilizando-se um gerador de ultrassom da marca Telsonic DG-2000 operando a uma frequência de  $20 \pm 0,2 \text{ kHz}$  a uma amplitude de  $50 \mu\text{m} \pm 5\%$ . A Figura 3.10 apresenta os detalhes do esquema do equipamento utilizado.

Figura 3.10 – Detalhe do equipamento utilizado.



Fonte: Allenstein (2007).

Para o procedimento experimental de calibração foram utilizados corpos de prova de Níquel 200, comercialmente puro (99,5%) cujas propriedades são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Material usado em estudo interlaboratorial.

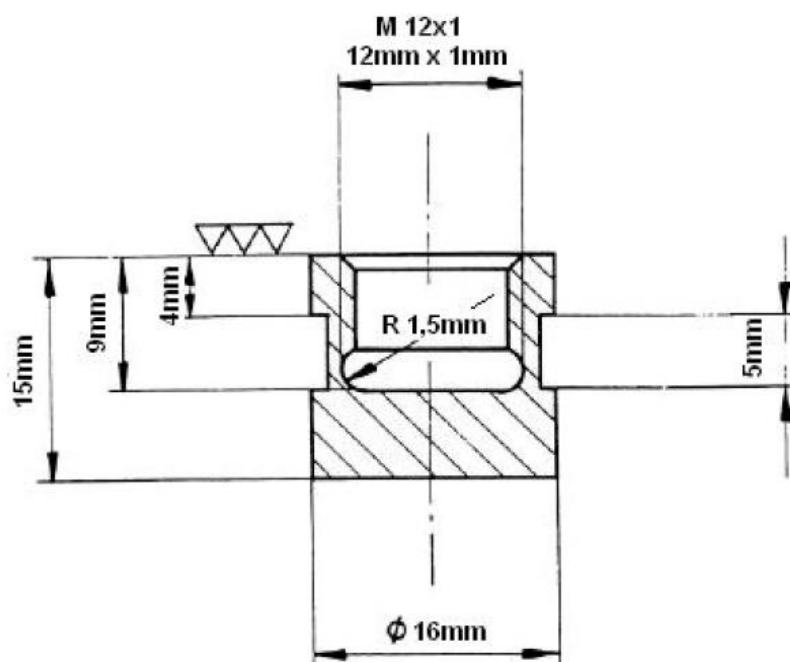
|                              |                                                                   |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Designação                   | Níquel 200, UNS N02200, ASTM B 160                                |
| Composição (valores limites) | Ni 99% (min), (max) 0,25Cu, 0,40Fe; 0,35Mn; 0,15C; 0,15Si; 0,01S. |
| Massa específica (nominal)   | 8,89 g/cm <sup>3</sup>                                            |
| Forma                        | Vara de 0.75-in (19mm), trefilados e recozidos                    |
| <b>Propriedades:</b>         |                                                                   |
| Resistência ao escoamento    | Nominal: 103-207MPa (15 a 30 Ksi)                                 |
|                              | Medido: 284 MPa (41,2 Ksi)                                        |
| Resistência à tração         | Nominal: 379-517 MPa (55 a 75 Ksi)                                |
|                              | Medido: 586 MPa (85 ksi)                                          |
| Alongamento                  | Nominal: N/A                                                      |
|                              | Medido: 76%                                                       |
| Dureza                       | Nominal: 45-70 HRB, 90-120HB                                      |
|                              | Medido: 49HRB                                                     |

Fonte: ASTM G32 (1998).

Os corpos de prova foram usinados no torno CNC Romi Centur 35D do Laboratório de Tecnologia Mecânica (LABTECMEC) da UFES, conforme indicado na Figura 3.11. Os corpos de prova foram pesados em uma balança analítica com precisão de 0,01 mg. A massa adequada para o ensaio é  $14,5 \pm 1,5$  g de acordo com a norma ASTM

G32 (1998). Para adequar a amostra, foi realizado um cálculo de volume a ser subtraído das mesmas, baseado na densidade do níquel 200, e realizou-se um faceamento em torno convencional até alcançar a massa adequada. Os corpos de prova foram lixados com lixas 220, 320, 400 e 600 mesh, até se obter uma rugosidade inicial da superfície de ensaio de  $0,04 \mu\text{m}$ .

Figura 3.11 - Corpo de prova para realização do ensaio de erosão por cavitação vibratória



Fonte: Telsonic Ultrasonics (2011).

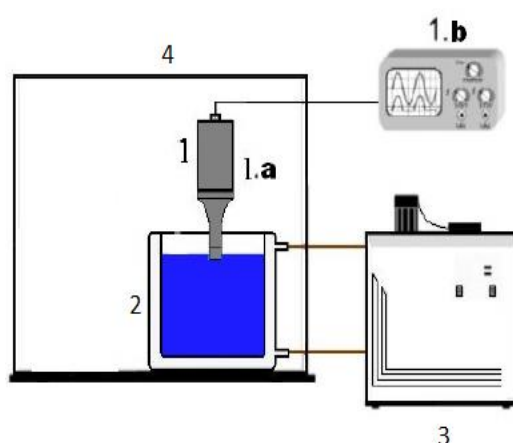
Os procedimentos predecessores de cada ensaio foram limpeza durante 3 minutos em banho de acetona por ultrassom, secagem em secador convencional e pesagem em balança analítica. Após essa etapa a amostra estava pronta para ser acoplada ao dispositivo gerador de ultrassom.

A superfície de teste foi imersa  $12 \pm 4$  mm em água destilada, a uma temperatura de  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ . Essa temperatura de ensaio foi controlada usando um dispositivo de banho termostático modelo TE-184 composto por um sistema de fornecimento de água refrigerada que foi ligado ao béquer contendo a água destilada, na qual o corpo de prova foi imerso, e uma bomba responsável pela circulação da água de refrigeração.

Durante os primeiros 30 minutos de ensaio os corpos de prova foram limpos por 3 minutos em banho de acetona por ultrassom e pesados em intervalos de 5 minutos para determinação da perda de massa. Este procedimento foi repetido em intervalos de 10 minutos durante os 30 minutos seguintes, e em intervalos de 1 hora após a primeira hora de ensaio. Os ensaios se estenderam, conforme recomendado pela norma, até a taxa de perda de massa dos corpos de prova atingir seu valor máximo e diminuir que, na prática, representou 6,0 horas de ensaio, visando detalhar a evolução da perda de massa e o tempo de incubação.

Na Figura 3.12 é apresentado um esquema da parte do equipamento utilizada na calibração e as diferentes partes que compõem o sistema. O equipamento está localizado no Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORMAT) no prédio laboratorial do Centro Tecnológico da Ufes.

Figura 3. 12 - Esquema da parte do dispositivo de ensaio utilizado nos testes de calibração.



| Item | Descrição dos itens da figura                         |                                        |
|------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1    | Módulo vibratório TELSONIC DG-2000                    | 1.a. Transdutor e Sonotrodo (Titânio). |
|      |                                                       | 1.b. Gerador e Controlador.            |
| 2    | Béquer com falsa parede para refrigeração, 2l.        |                                        |
| 3    | Banho termostático, Tecnal, modelo TE-180.            |                                        |
| 4    | Câmeras de isolamento acústico, construção artesanal. |                                        |

### 3.3.2 Procedimento experimental do ensaio de cavitação

Para a fabricação dos corpos de prova foram utilizados metais de adição de superligas à base de Ni, classificadas segundo a AWS como AWS ER-NiCrMo-3 (Inconel 625), AWS ER-NiCrMo-4 (Hasteloy C-276) e AWS ER-NiCrMo-14 (Inconel 686), todas em arame bobinado com diâmetro de 1,12 mm.

O metal de base utilizado foi o aço ASTM A516 Gr 60. As composições químicas desses materiais encontram-se na Tabela 3.2. Os gases de proteção utilizados foram

argônio puro (99,99%), argônio com 30% de hélio e argônio com 0,01% de óxido nítrico. O eletrodo de tungstênio utilizado no processo TIG foi do tipo toriado, com diâmetro de 4,0 mm.

Tabela 3.2 - Composição química dos metais de adição fornecida pelos fabricantes.

| Item                                  | Composição, % em peso |           |           |           |           |           |           |           |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                       | Ni                    | C         | Cr        | Mo        | W         | Fe        | Al        | Ti        |
| <b>INCONEL 625</b><br>(ERNiCrMo-3)    | 64,43                 | 0,011     | 22,2      | 9,13      | -         | 0,19      | 0,09      | 0,23      |
|                                       | <b>Nb</b>             | <b>Mn</b> | <b>Si</b> | <b>Cu</b> | <b>Co</b> | <b>V</b>  | <b>P</b>  | <b>S</b>  |
|                                       | 3,53                  | 0,01      | 0,05      | 0,01      | 0,03      | -         | 0,002     | 0,002     |
| <b>HASTELOY C-276</b><br>(ERNiCrMo-4) | <b>Ni</b>             | <b>C</b>  | <b>Cr</b> | <b>Mo</b> | <b>W</b>  | <b>Fe</b> | <b>Al</b> | <b>Ti</b> |
|                                       | 56,80                 | 0,002     | 16,13     | 16,28     | 3,38      | 6,07      | -         | -         |
|                                       | <b>Nb</b>             | <b>Mn</b> | <b>Si</b> | <b>Cu</b> | <b>Co</b> | <b>V</b>  | <b>P</b>  | <b>S</b>  |
| <b>INCONEL 686</b><br>(ERNiCrMo-14)   | -                     | 0,52      | 0,03      | 0,06      | 0,13      | 0,17      | 0,07      | 0,002     |
|                                       | <b>Ni</b>             | <b>C</b>  | <b>Cr</b> | <b>Mo</b> | <b>W</b>  | <b>Fe</b> | <b>Al</b> | <b>Ti</b> |
|                                       | 58,22                 | 0,01      | 20,53     | 16,39     | 3,97      | 0,29      | 0,26      | 0,04      |
| <b>ASTM A516 Gr. 60</b>               | <b>Nb</b>             | <b>Mn</b> | <b>Si</b> | <b>Cu</b> | <b>Co</b> | <b>V</b>  | <b>P</b>  | <b>S</b>  |
|                                       | -                     | 0,23      | 0,059     | 0,01      | -         | -         | 0,002     | 0,001     |
|                                       | <b>Ni</b>             | <b>C</b>  | <b>Cr</b> | <b>Mo</b> | <b>Fe</b> | <b>Al</b> | <b>Mn</b> | <b>Si</b> |
|                                       | 0,01                  | 0,15      | 0,02      | 0,01      | Bal.      | 0,02      | 0,95      | 0,2       |

A deposição das camadas foi realizada sobre as chapas de aço ASTM A516 Gr. 60 com 200 x 150 x 12,5 mm. O comprimento do revestimento foi de 180 mm e a largura da camada depositada foi superior à 55 mm. Para garantir a largura mínima da camada foram depositados de 4 a 7 cordões dispostos lado a lado, cuja sobreposição deve ser suficiente para proporcionar um bom acabamento superficial e ausência de defeitos.

Todas as chapas foram previamente identificadas e passaram por processo de limpeza superficial. Alguns parâmetros foram previamente estudados e mantidos constantes. A Distância da Ponta do Eletrodo à Peça (DPEP) de 10 mm foi escolhida por resultar em baixos níveis de diluição, uma característica importante para os revestimentos (SILVA *et. al.*, 2009). Já o modo de alimentação de arame foi à frente da tocha com o arame passando por dentro do arco e com uma distância da Ponta do Arame à Peça (DPAP) fixada em 3 mm, o ângulo de alimentação do arame foi de 50°, o ângulo de afiação do eletrodo de 50° e a vazão de gás de 15 l/min, por também apresentarem uma boa relação entre geometria e diluição (MIRANDA *et. al.*, 2009).

Após o processo de soldagem as amostras foram fresadas em fresa de topo e retificadas em retifica plana a fim de se obter uma superfície plana o suficiente para

posteriormente serem lixadas com lixas 220, 320, 400 e 600 mesh, até se obter uma rugosidade inicial da superfície de ensaio de  $0,04\mu\text{m}$ .

Os ensaios de cavitação foram realizados segundo a norma ASTM G32/98 - “ASTM Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus” modificado para o método indireto, no Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORMAT) da Ufes.

Os ensaios foram conduzidos em um equipamento gerador de ultrassom da marca Telsonic DG-2000 (Figura 3.3) operando a uma frequência de  $20\pm 0,2\text{ kHz}$  e amplitude de  $50\mu\text{m} \pm 5\%$ . A amostra a ser ensaiada é colocada em um porta e posicionada a uma distância de 0,5 mm do contra corpo de Stellite-6 com o auxílio de um dispositivo com suporte para posicionamento que possibilitou com resolução de 0.01 mm (Figura 3.13).

Figura 3.13 – Representação esquemática do método indireto.



Ressalta-se, que a intensidade do ensaio direto é de 40 a 60% maior que o ensaio indireto (BOCCANERA *et. al.*, 1998, *apud* DA SILVA, 2008). A frequência de vibração do Sonotrodo foi de  $20\pm 0,2\text{ kHz}$ . A amplitude foi mantida em  $50\mu\text{m} \pm 5\%$  pico a pico, sob uma temperatura de ensaio de  $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  em água destilada.

Na determinação do desgaste, o ensaio era interrompido em intervalo de tempos regulares de 3, 12, 24, e 30h após o início e as amostras limpas em ultrassom. A perda de massa foi determinada por meio de balança analítica com resolução de 0,01 mg. Nessas interrupções, a evolução das superfícies de desgaste foi analisada por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Interferometria a laser. Os parâmetros de rugosidade foram calculados e imagens de perfil e área das superfícies foram geradas.

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 para as próximas 3 horas e em intervalos de 2 horas após a oitava hora de ensaio. Os ensaios se estenderam até totalizar 30 horas de ensaio, visando detalhar a evolução da perda de massa e o tempo de incubação.

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 s. Os valores extremos foram eliminados e a perda de massa obtida pela média aritmética dos três valores restantes.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO

Foram realizados testes conforme as recomendações da norma ASTM- G32-98- “ASTM Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus” a fim de se avaliar a aproximação dos resultados obtidos em relação ao intervalo de resultados de diferentes laboratórios apresentados na norma.

Para os ensaios de calibração foram utilizadas duas amostras usinadas na Norma ASTM- G32-98, Níquel 200, com rugosidade 0.04  $\mu\text{m}$ , cujas propriedades foram apresentadas no item 3.3.1.

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 tais resultados são mostrados na Tabela 4.2.

Através da Figura 4.2 observa-se que as dispersões dos dados obtidos dos dois ensaios foram similares até o instante que a amostra 2 falhou, provavelmente devido a erros de usinagem. Uma explicação para a dispersão dos dados obtidos neste tipo de ensaio é que a perda de massa é medida em pequenos intervalos de tempo pré-definidos, algumas vezes não sendo este o suficiente para gerar um valor de perda considerável. Desta forma, justifica-se também a representação gráfica da perda de massa acumulada média ao longo do tempo de ensaio.

Figura 4.1 – a) Vista externa da bancada de ensaios, b) Vista interna do enclausuramento da bancada de ensaios, c) Detalhe para os ensaios de cavitação ultrassônica pelo método direto.

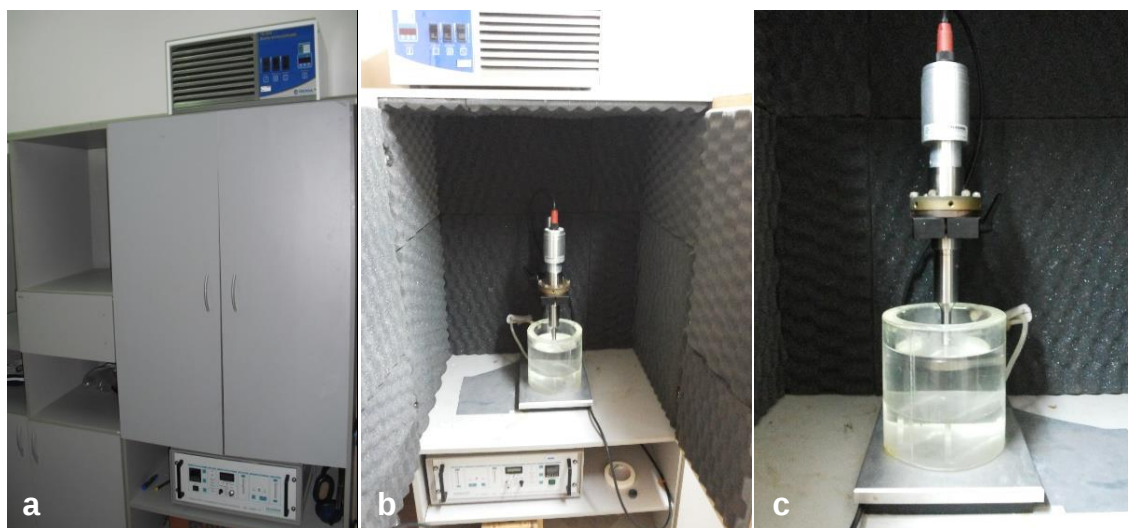
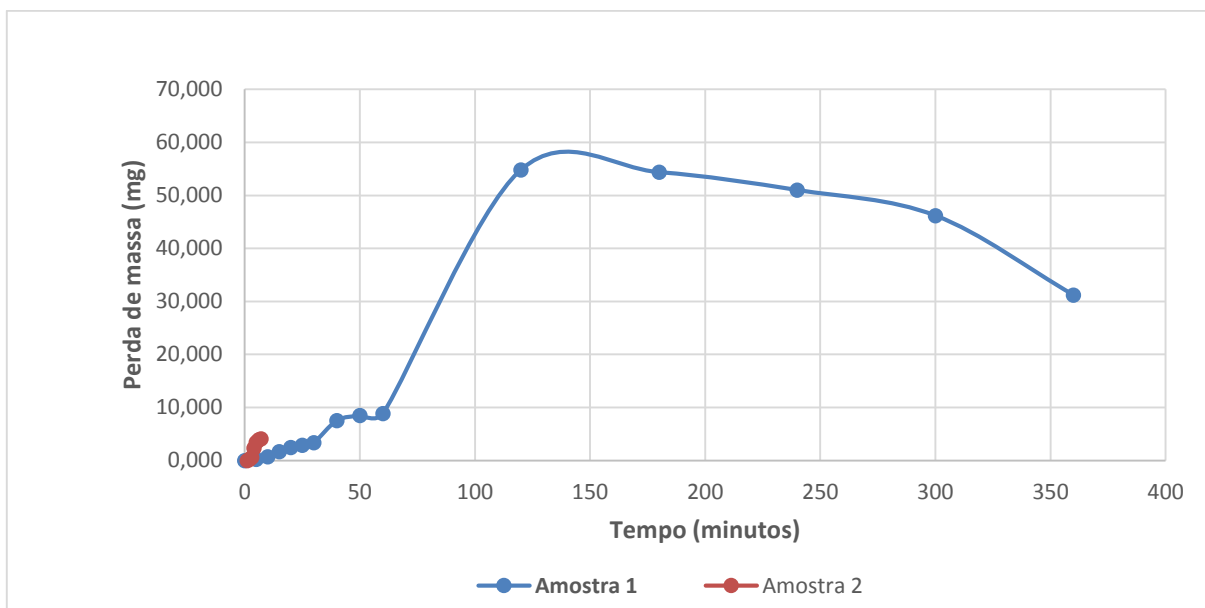


Tabela 4.1- Perda de massa a cada intervalo de medição

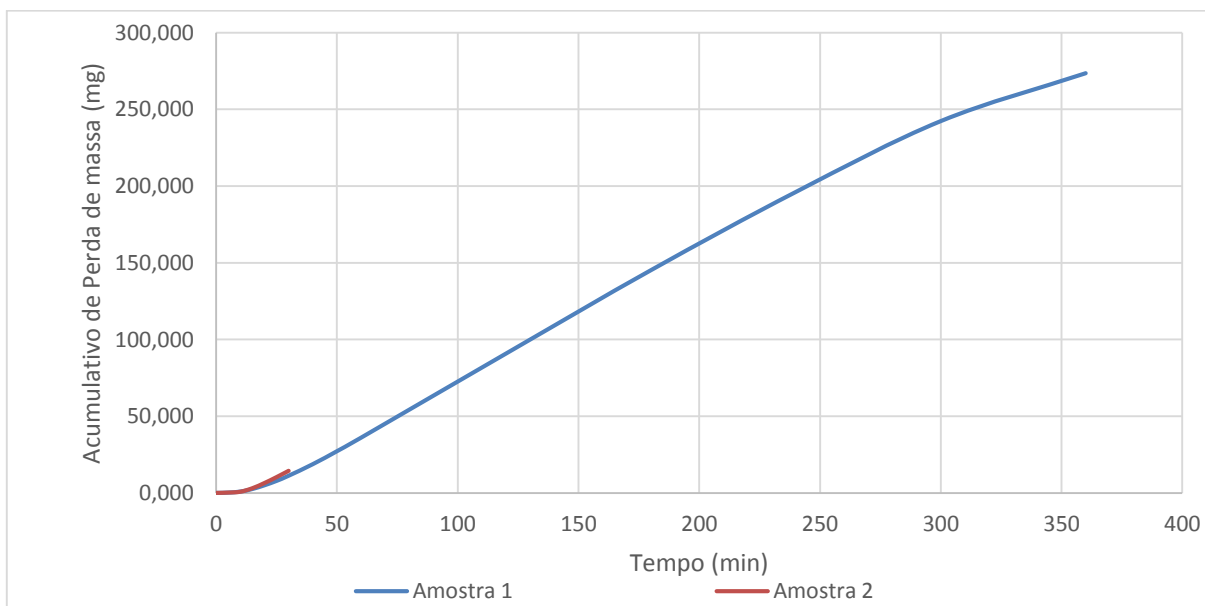
| Tempo (minutos) | Amostra 1 (mg) | Amostra 2 (mg) |
|-----------------|----------------|----------------|
| 0               | 0,000          | 0,000          |
| 5               | 0,203          | 0,223          |
| 10              | 0,677          | 0,557          |
| 15              | 1,693          | 2,317          |
| 20              | 2,437          | 3,410          |
| 25              | 2,857          | 3,873          |
| 30              | 3,367          | 4,103          |
| 40              | 7,527          | -              |
| 50              | 8,460          | -              |
| 60              | 8,833          | -              |
| 120             | 54,830         | -              |
| 180             | 54,357         | -              |
| 240             | 50,997         | -              |
| 300             | 46,183         | -              |
| 360             | 31,213         | -              |

Figura 4.2 – Perdas de massa dos corpos de prova ensaiados a cada intervalo de medição.



Devido à ocorrência de uma dispersão muito pequena da perda de massa medida a cada intervalo, não é observada ao longo do ensaio nenhuma tendência de um corpo de prova específico sofrer maior erosão do que outro na mesma situação. Desta forma, considera-se possível avaliar a perda de massa através dos valores médios obtidos para cada situação. A Figura 4.3 mostra os resultados obtidos para as perdas de massa médias acumuladas ao longo do tempo, cujos valores registrados são mostrados na Tabela 4.2.

Figura 4.3 – Perda média de massa acumulada ao longo do tempo dos corpos de prova ensaiados.



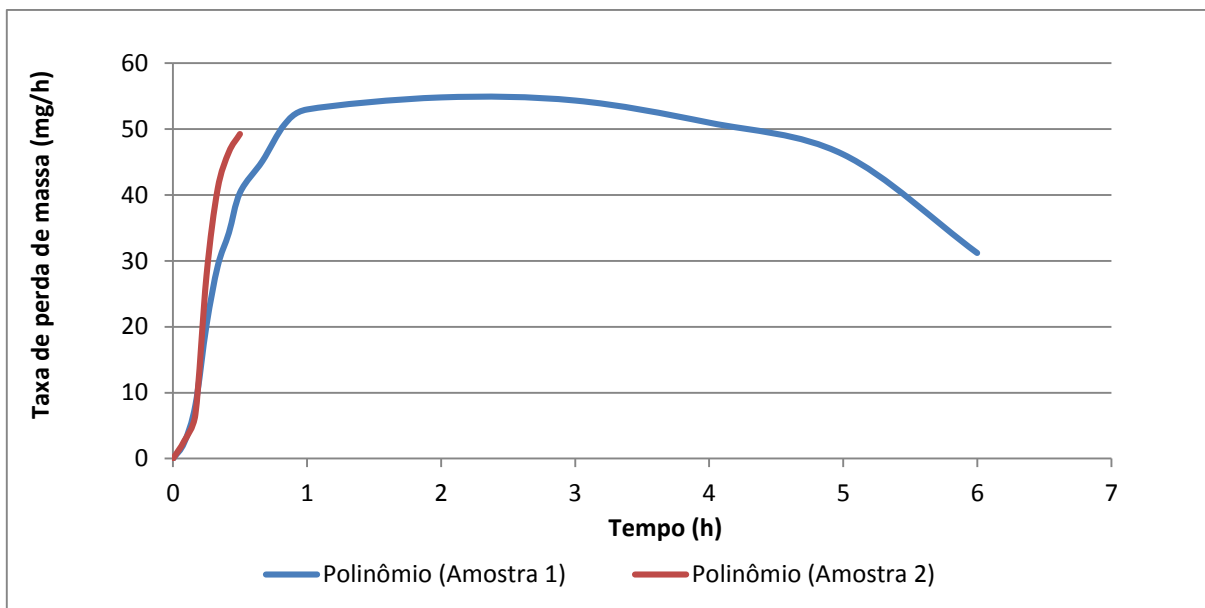
Observando-se o gráfico de perda de massa acumulada com o tempo (Figura 4.3), nota-se que todas as curvas apresentam perda de massa desde os intervalos iniciais de medição, podendo-se considerar a inexistência do período de incubação para o Níquel 200 por se tratar de um material de baixa resistência à cavitação, como já era esperado.

Tabela 4.2 - Perda de massa acumulada dos corpos de prova ao longo do tempo de ensaio

| Tempo (minutos) | Amostra 1 (mg) | Amostra 2 (mg) |
|-----------------|----------------|----------------|
| 0               | 0,000          | 0,000          |
| 5               | 0,203          | 0,223          |
| 10              | 0,880          | 0,780          |
| 15              | 2,573          | 3,097          |
| 20              | 5,010          | 6,507          |
| 25              | 7,867          | 10,380         |
| 30              | 11,233         | 14,483         |
| 40              | 18,760         | -              |
| 50              | 27,220         | -              |
| 60              | 36,053         | -              |
| 120             | 90,883         | -              |
| 180             | 145,240        | -              |
| 240             | 196,237        | -              |
| 300             | 242,420        | -              |
| 360             | 273,633        | -              |

A Figura 4.4 mostra a taxa de perda de massa ao longo do tempo de ensaio, calculada através da perda de massa obtida em cada intervalo de medição ( $\Delta$ perda de massa/ $\Delta$ tempo) em cada caso. Polinômios de quarta ordem representam as curvas de taxa de perda de massa e são mostrados no gráfico apenas como referência para comparação do desempenho dos corpos de prova no ensaio.

Figura 4.4 – Taxas de perda de massa ao longo dos ensaios de erosão por cavitação induzida por vibração ultrassônica.



A Figura 4.5 mostra duas fotos da amostra 1, uma feita antes de um ensaio e outra feita 6 horas depois da amostra ser exposta à EC, utilizando a lupa microscópica. Observa-se que a aparência da superfície da amostra após o ensaio está de acordo com aparência esperada pela norma ASTM G32 (1998) (Figura 4.6).

Figura 4.5 – a) Amostra lixada com lixas 220, 320, 420 e 600 mesh, b) Amostra após 6 horas de ensaio.

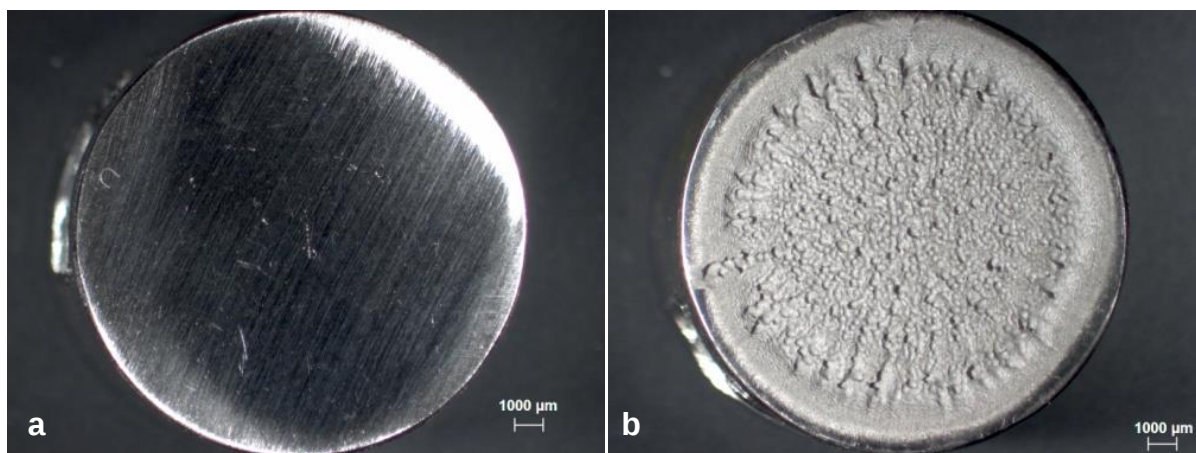


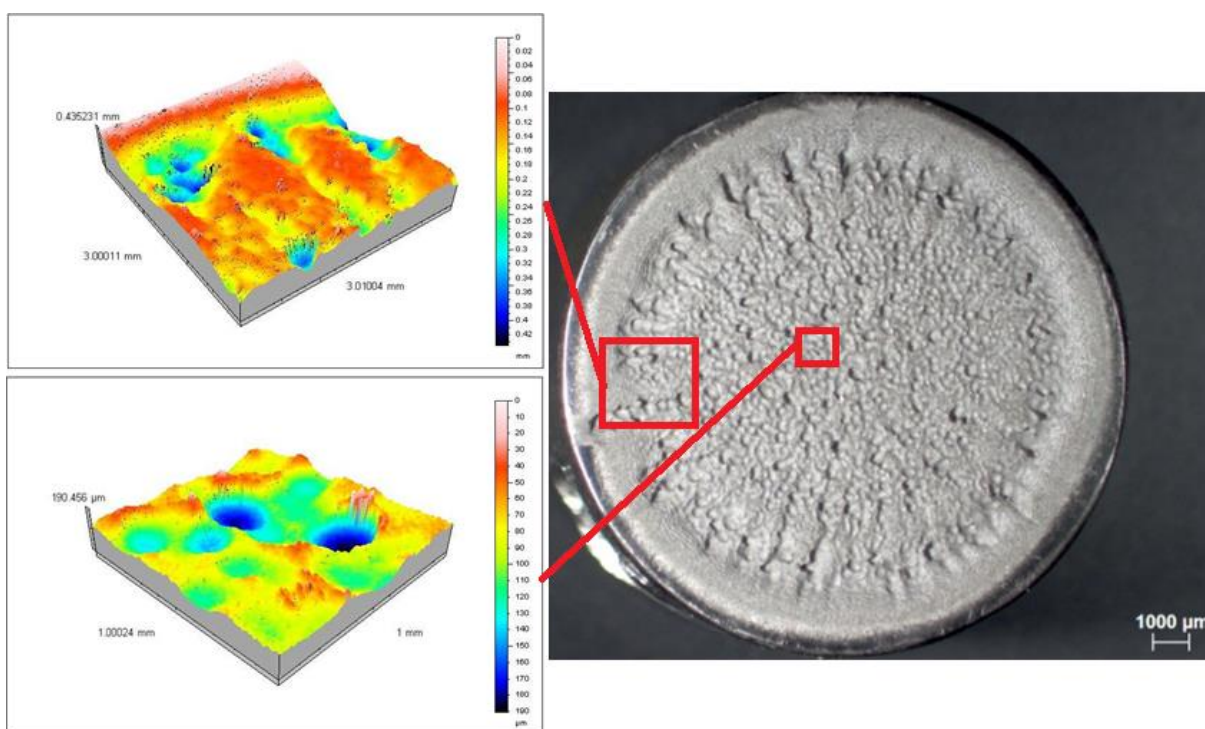
Figura 4.6 – Aparência da esperada pela norma ASTM G32 para a superfície após o ensaio.



Fonte: ASTM G32 (1998).

Foi escolhida uma área próxima à periferia e outra no centro da amostra para traçar o perfil topográfico. Os detalhes são mostrados na Figura 4.7 onde observam-se crateras alongadas no sentido radial, adjacentes à periferia devido a criação de caminhos preferenciais ao escoamento do fluido e crateras circulares próximas ao centro. Esse aspecto de “picos e vales” é normalmente observado em materiais muito dúcteis como o Níquel 200, que é característica a formação de crateras profundas como foi verificado na literatura.

Figura 4.7 – Topografia de áreas da: a) periferia e b) do centro da amostra cavitada.

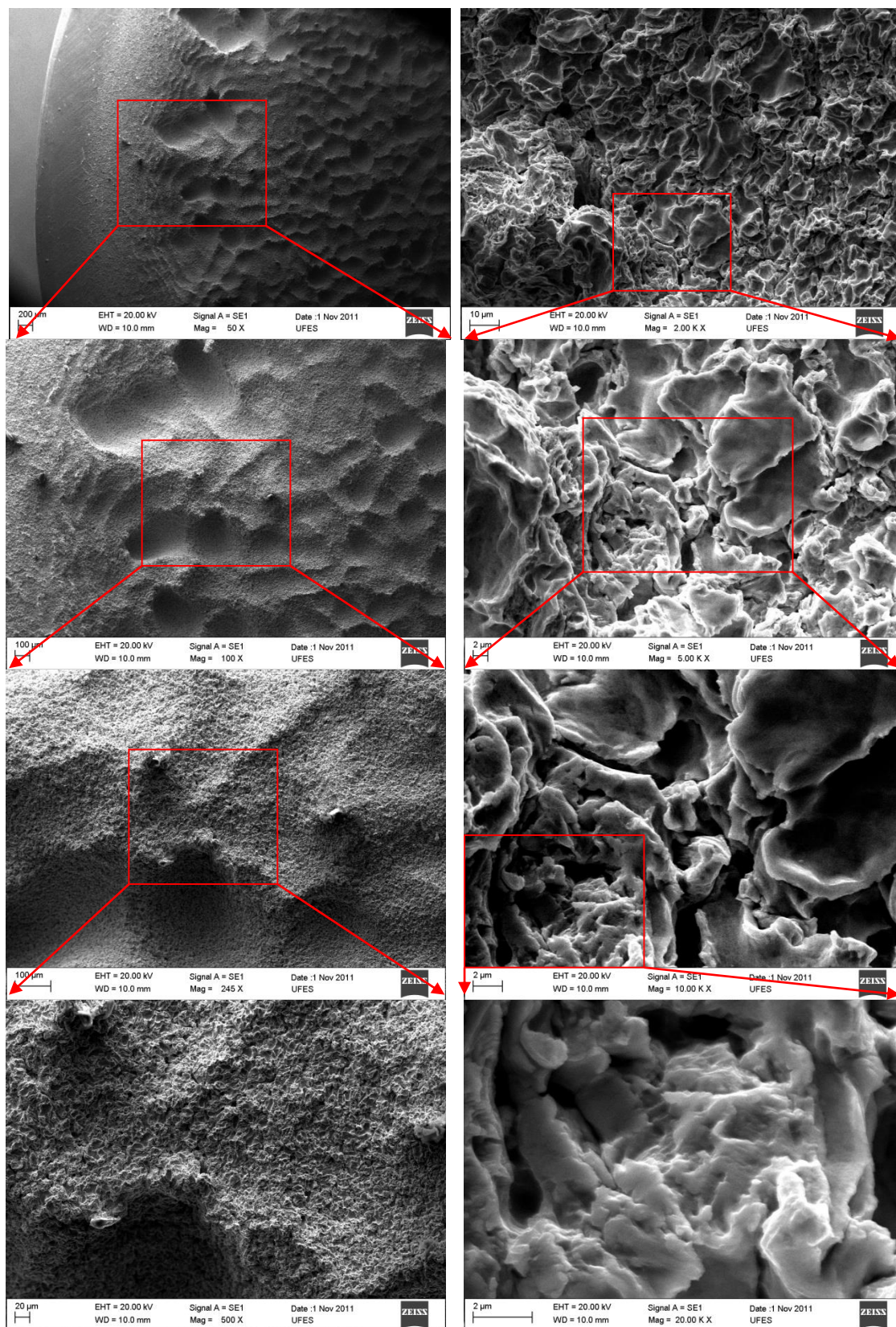


Utilizando o microscópio eletrônico de varredura, foram feitas imagens da amostra após 6 horas de erosão cavitacional. A Figura 4.8 mostra essas imagens em sequência de ampliação.

Segundo Grajales (2010), o mecanismo de desgaste prevalecente no início da EC é o de deformação plástica, trazendo como consequência uma mudança da rugosidade superficial, favorecendo o aparecimento de defeitos como pites, protuberâncias e degraus de escorregamento.

Em etapas posteriores, verifica-se uma competição entre os mecanismos de desgaste, em que a deformação plástica deixa de ser o mecanismo principal para dar lugar à fratura frágil, depois que a superfície acumulou danos por fadiga de baixo ciclo. Nesse ponto observa-se o destacamento do material na forma de partículas de desgaste conhecidos como *debris*, devido à propagação de trincas (Figura 4.8).

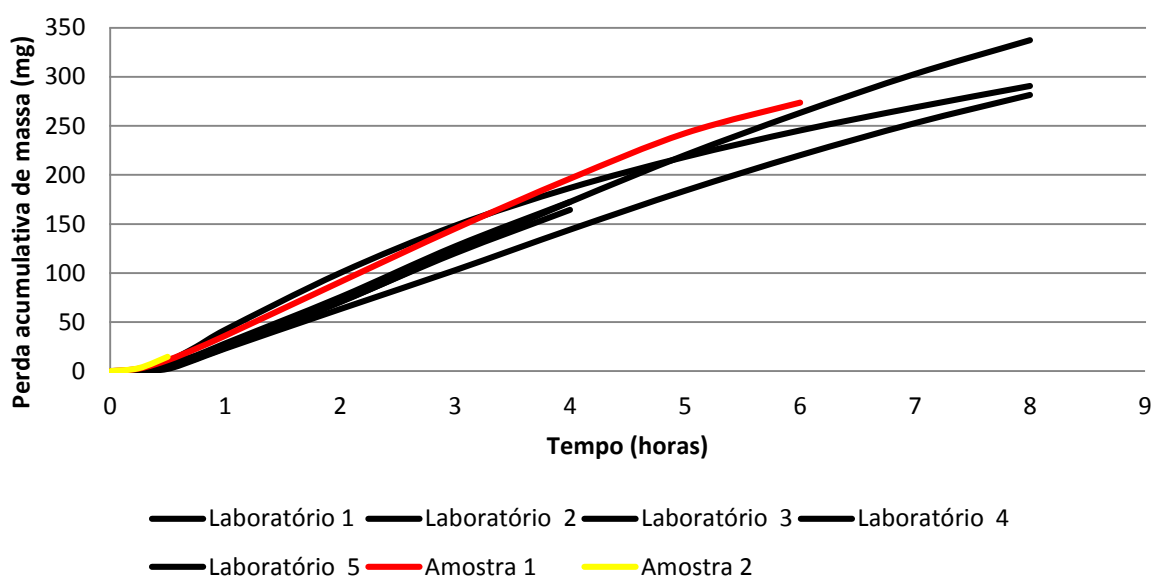
Figura 4.8– Imagens feitas em MEV mostrando aproximação de 50 vezes até 20.000 vezes de um ponto na superfície de uma das amostras expostas à EC por 6 horas.



Na Figura 4.9 cada uma das curvas de 1 a 5 representa a média de dois ou três ensaios realizados sob as mesmas condições de teste. Como cada uma das curvas representa resultados de ensaios realizados em diferentes laboratórios, a norma ASTM G32 (1998) sugere que os resultados obtidos estejam entre estas curvas que formam então um intervalo de resultados esperados.

Analisando a Figura 4.9 observa-se que os resultados obtidos nos testes de calibração realizados no laboratório TRICORMAT da Ufes localizam-se dentro do intervalo de perda de massa esperada pela norma ASTM G32-98. Portanto, foi comprovado que a Bancada de Cavitação Vibratória do laboratório TRICORMAT da UFES está calibrado pra os ensaios de análise de resistência à EC.

Figura 4.9 – Perda de massa acumulada para ensaios de Níquel 200 realizados em cinco laboratórios e perda de massa acumulada para os ensaios realizados com as amostras 1 e 2 no laboratório TRICORMA-UFES.



#### 4.2. RESULTADOS DE CAVITAÇÃO

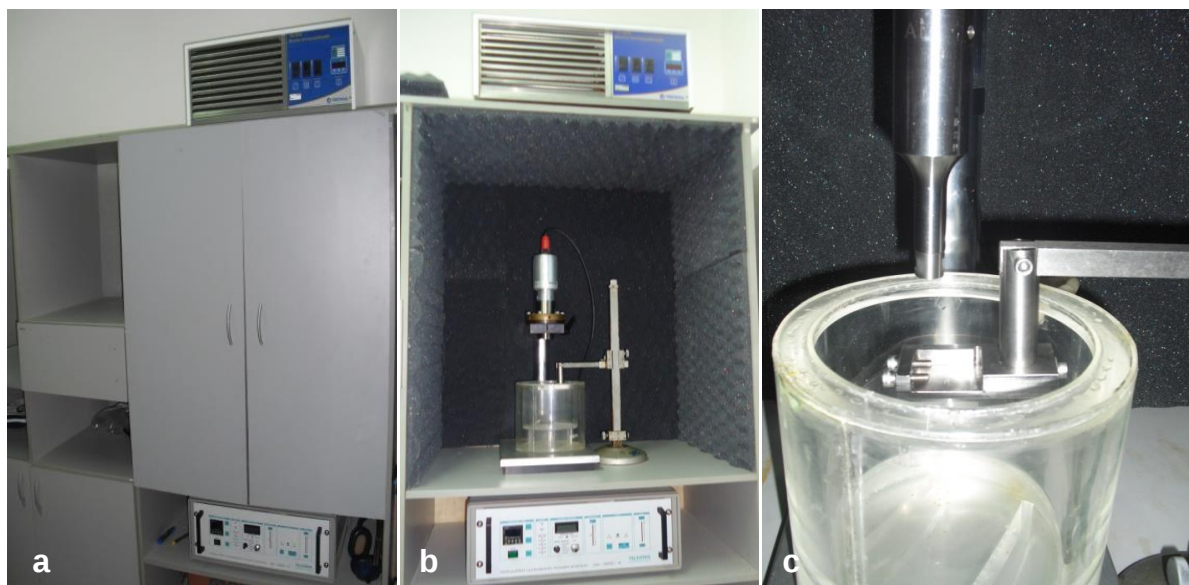
Foram realizados testes conforme as recomendações da norma ASTM- G32-98- “ASTM Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus” afim de se comparar os resultados obtidos em relação as diferentes ligas comerciais.

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. No entanto a amostra revestida com Inconel 686 foi analisada durante 22 horas. Isto se deve a falha por fadiga do sonotrodo de titânio conforme a Figura 4.10. Este imprevisto não prejudicou a análise comparativa dos resultados.

Figura 4.10 – Ensaio de líquido penetrante que comprovou a falha no sonotrodo.



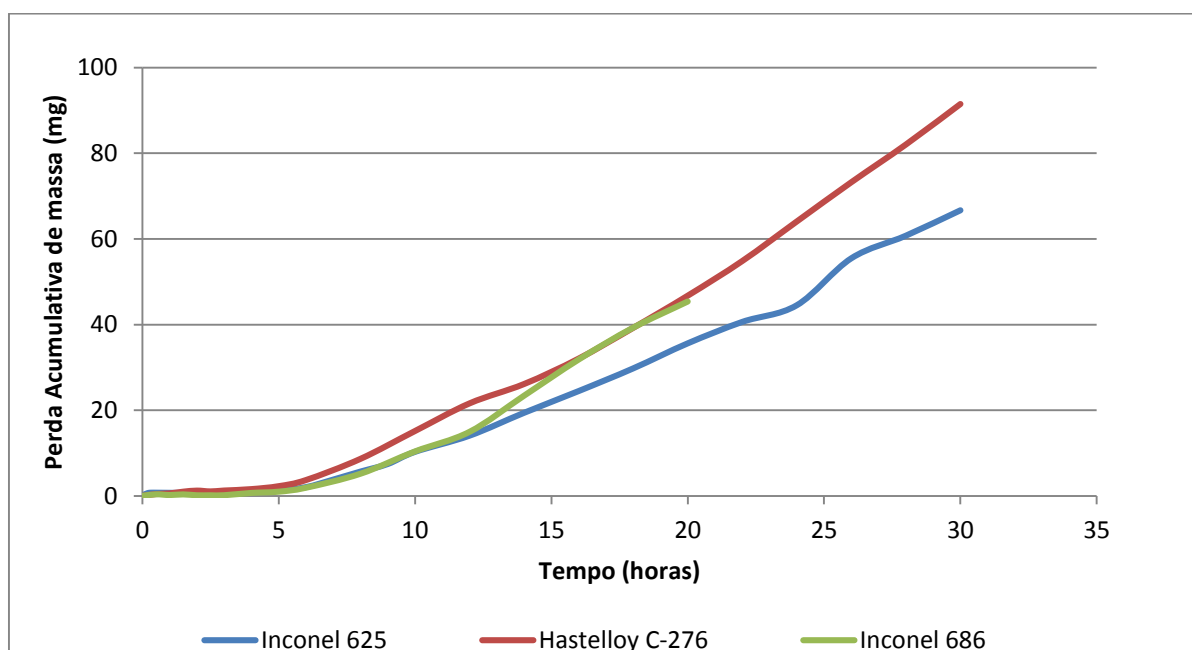
Figura 4.11 – a) Vista externa da bancada de ensaios, b) Vista interna do enclausuramento da bancada de ensaios, c) Detalhe do suporte de amostras projetado para ensaios de cavitação ultrassônica pelo método indireto.



Desta forma, considera-se possível avaliar a perda de massa através dos valores médios obtidos para cada situação. A Figura 4.13 mostra os resultados obtidos para as perdas de massa médias acumuladas ao longo do tempo.

Observando-se o gráfico de perda de massa acumulada com o tempo na Figura 4.13, nota-se que a amostra revestida com Hastelloy C-276 apresenta as maiores perdas de massa. As menores perdas de massa foram medidas na amostra revestida com Inconel 625. A amostra revestida com Inconel 686 apresentou desgaste moderado até 12h de ensaio, porém a tendência de desgaste apresentada pela curva revela aumento significativo na perda de massa a partir desse instante.

Figura 4.13 – Perda média de massa acumulada ao longo do tempo dos corpos de prova ensaiados.



É possível observar na Figura 4.14 a taxa de perda de massa ao longo do tempo de ensaio calculada através da perda de massa acumulada em cada instante. Nota-se que todas as amostras apresentaram taxa de perda de massa elevada nos primeiros instantes de ensaio provavelmente devido a deformação plástica existente na superfície, causado pelo processo de lixamento da preparação das amostras.

Figura 4.12 – Imagem feita em MEV mostrando aproximação de 1000 vezes de um ponto na borda da superfície de uma das amostras expostas à EC por 3 horas que evidencia os pontos de erosão nas marcas de lixamento.

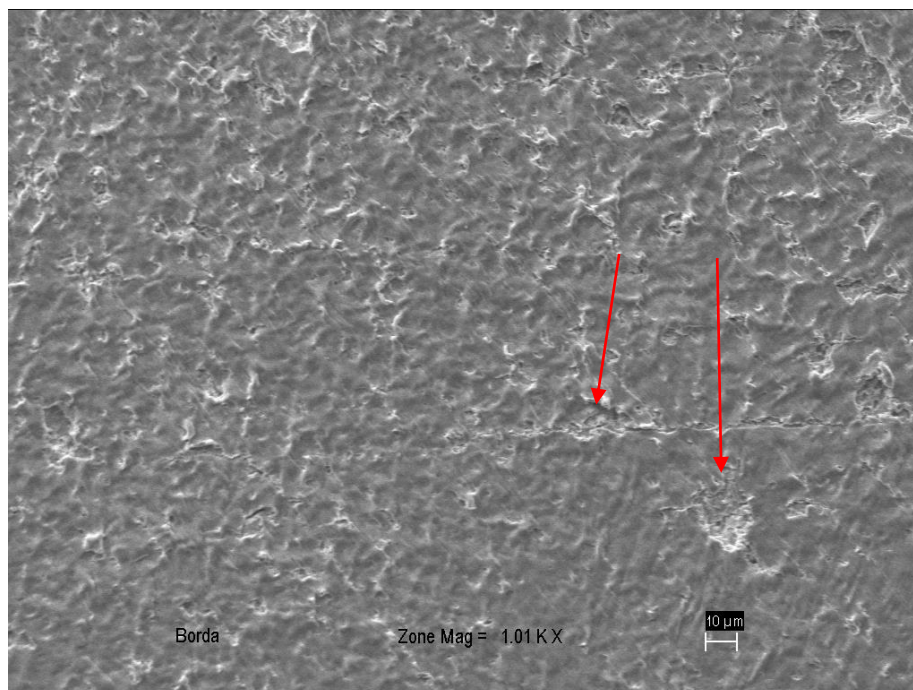
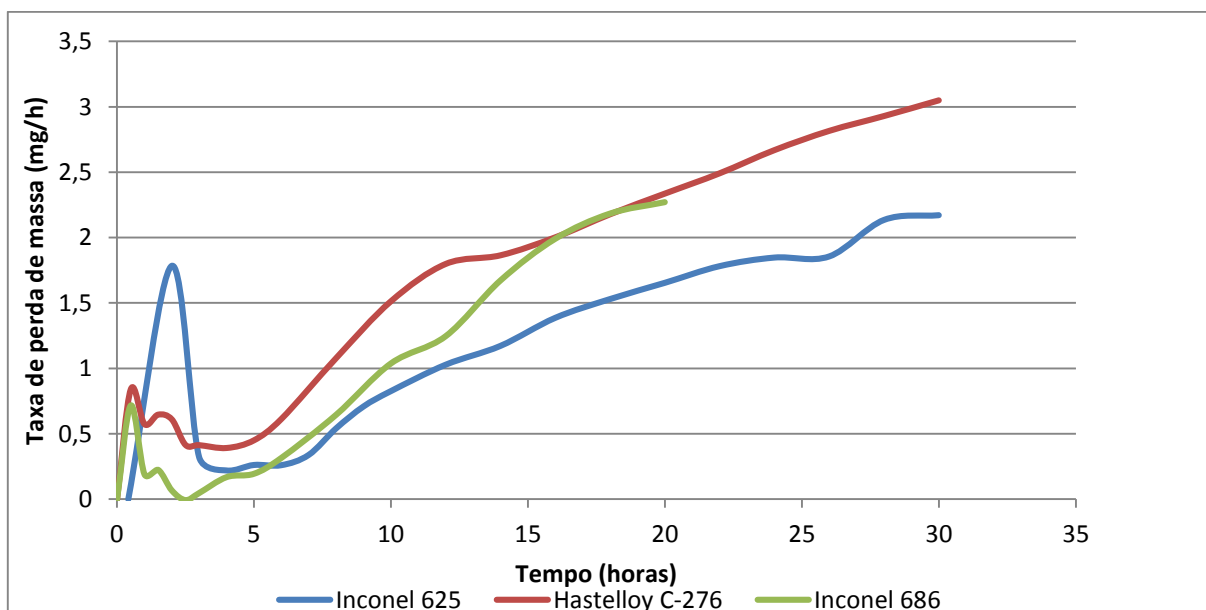
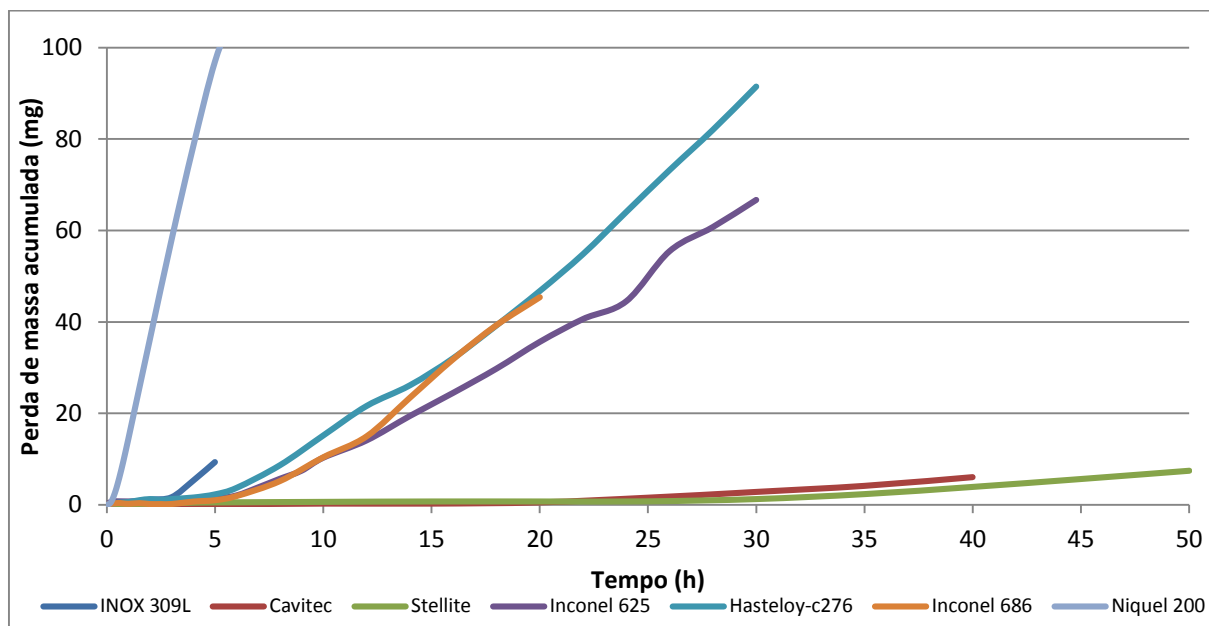


Figura 4.14 – Taxas de perda de massa ao longo dos ensaios de erosão por cavitação induzida por vibração ultrassônica.



Os resultados dos ensaios de cavitação do presente trabalho foram comparados com outros materiais encontrados na literatura (*apud* HELIO, 2010), dentre eles o Stellite e o Cavitec (Tabela 4.3 e Figura 4.15).

Figura 4.15 – Comparativo de perda de massa acumulada das ligas comerciais já conhecidas na literatura.



É apresentado na Tabela 4.3 os resultados em ordem crescente de resistência a EC, através da avaliação simultânea do período de incubação e a taxa de erosão. Dentre os depósitos efetuados para o presente trabalho, o revestimento que obteve o melhor resultado em termos de EC foi o obtido com Inconel 625 com um período de incubação de 6 horas e uma taxa de erosão de 2,9 mg/h.

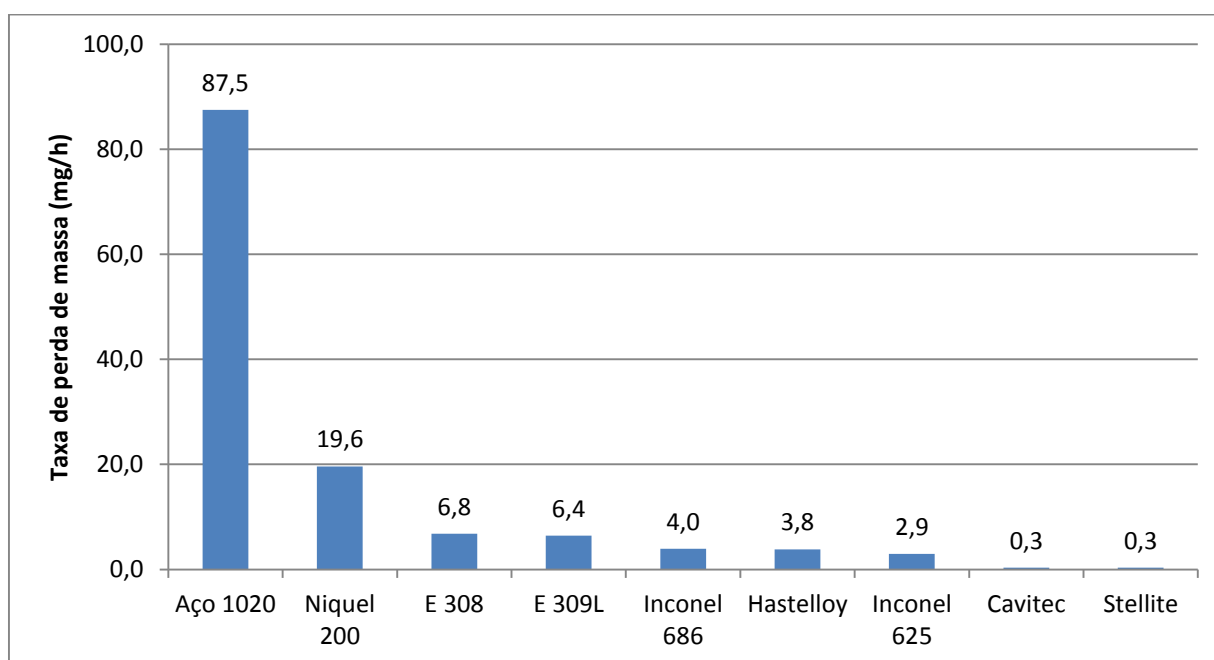
Tabela 4.3 – Tempo de ensaio, período de incubação e taxa de erosão das ligas ensaiadas e materiais de referência.

| Ligas       | Tempo de ensaio (h) | Período de incubação (h) | Taxa de erosão (mg/h) |               |
|-------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|---------------|
|             |                     |                          | Método indireto       | Método direto |
| Aço 1020    | 6                   | -                        | 87,5                  | 218,8         |
| Níquel 200  | 6                   | 0,5                      | 19,6                  | 49,1          |
| E 308       | 5,6                 | 3                        | 6,8                   | 17            |
| E 309L      | 5,6                 | 3                        | 6,4                   | 16,1          |
| Inconel 686 | 20                  | 6                        | 4                     | 9,9           |
| Hastelloy   | 30                  | 5                        | 3,8                   | 9,6           |
| Inconel 625 | 30                  | 6                        | 2,9                   | 7,3           |
| Cavitec     | 40,0                | 28,3                     | 0,3                   | 0,8           |
| Stellite    | 49,0                | 21,4                     | 0,3                   | 0,8           |

Fonte: Hélio, 2010

A Figura 4.16 e a Tabela 4.3 permitem que se compare a resistência à cavitação das ligas avaliadas com materiais comerciais. Verifica-se o bom desempenho da liga Inconel 625 em relação as outras ligas testadas, pois sua resposta em termos de resistência a esse fenômeno é a que mais aproxima-se daquele das melhores ligas comerciais destinadas a essa função como o Cavitec e o Stellite.

Figura 4.16 – Comparação da resistência a cavitação das ligas Inconel 625, Inconel 686 e Hastelloy C-276 e ligas comerciais já conhecidas na literatura.



## 5. DIFICULDADES ENCONTRADAS

As principais dificuldades encontradas durante a realização desse ensaio experimental foram:

- ✓ Dificuldade do conjunto do contra corpo com o sonotrodo entrar em ressonância, bem como a baixa resistência do contra corpo, provavelmente devido à dificuldade de usinagem e acabamento da rosca ou controle do torque na rosca do contra corpo-sonotrodo e na rosca do sonotrodo-transdutor, porém foi comprado um torquímetro para auxiliar nesse controle.
- ✓ Alto custo e baixa durabilidade do sonotrodo, por se tratar de um componente importado e suscetível à fadiga.
- ✓ Posicionamento da amostra em relação ao contra corpo, principalmente com relação ao paralelismo requerido para o ensaio.
- ✓ Controle da temperatura do fluido durante o ensaio, onde o béquer se mostrou ineficaz para grandes intervalos de tempo de ensaio, principalmente com duração de 2 horas, devido ao material da parede dupla não ser apropriado para trocas térmicas.

## 6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados dos testes realizados, foi possível obter as seguintes conclusões:

- ✓ Os valores da perda de massa das amostras de níquel 200 indicam que o ensaio de erosão por cavitação vibratória proposto pela norma ASTM G32-98 para calibração do equipamento mostrou-se adequado. Portanto o equipamento está calibrado.
- ✓ Através das curvas da taxa de perda de massa do níquel 200 ao longo do tempo obtidas neste trabalho, foi possível confirmar a ocorrência, conforme citado na literatura, dos estágios de acumulação, transição e estacionário durante o ensaio de erosão por cavitação vibratória.
- ✓ A amostra revestida com Inconel 625 apresentou os melhores resultados no ensaio de cavitação ultrassônica em comparação com as outras superligas de níquel ensaiadas.
- ✓ Os resultados podem ser utilizados como referência na escolha de materiais mais viáveis economicamente através de testes comparativos para a definição de processos de fabricação e recuperação a serem executados em componentes de turbinas hidráulicas ou rotores de bombas, ou qualquer componente sujeito à erosão por cavitação.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Sugere-se a realização de ensaios em ligas similares variando os parâmetros de soldagem, utilizando como fluido água destilada, solução de NaCl e em diferentes meios corrosivos, como, por exemplo, o petróleo, a fim de se avaliar a sinergia Cavitação-Corrosão.
- ✓ Sugere-se também a reformulação no projeto do dispositivo porta amostra, com fixação na própria coluna do transdutor, com um braço articulado em 5 eixos, facilitando a regulagem da distância e o paralelismo da amostra com o contra corpo, bem como aumentando a rigidez do sistema
- ✓ Numa outra frente de pesquisa, mas diretamente ligada ao presente estudo, sugere-se uma modelagem, por meio do método de elementos finitos do componente avariado, do sonotrodo de titânio, para descobrir as dimensões necessárias para se conseguir ressonância com a fonte de vibração, a fim de se projetar e fabricar esse componente nos próprios laboratórios da Ufes, reduzindo o custo do componente. Essa proposta já está em estudo juntamente com o professor Marcio Coelho de Mattos, especialista no estudo de vibrações mecânicas.

É necessário realizar a compra de um novo sonotrodo para viabilizar os novos estudos sugeridos.

## 8. REFERÊNCIAS

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**. 1998. ASTM-G32/1998.

COELHO, Welington Ricardo. **ANÁLISE DO FENÔMENO DA CAVITAÇÃO EM BOMBA CENTRÍFUGA**. Ilha Solteira, 2006

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

FIGUEROA, C.A., Alvarez, F., Mitchell, D. R. G., Collins, G. A., Short, K. T. **Previous heat treatment inducing different plasma nitriding behaviors in martensitic stainless steels**. JOURNAL OF VACUUM SCIENCE & TECHNOLOGY A 24 (5): 1795-1801 SEP-OCT 2006.

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

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

RIBEIRO, Helio Ormeu. **Resistencia à erosão por cavitação de aços inoxidáveis austeníticos CrMnSiN depositados por pta**, São Paulo, 2010.

RICHMAN, 1990.

SILVA, Cleiton Carvalho. **Revestimentos de ligas de níquel depositados pelo processo tig com alimentação de arame frio –aspectos operacionais e metalurgicos**, Fortaleza, 2010

SILVA , Cleiton Carvalho. **Comportamento abrasivo de revestimentos de superligas a base de níquel resistentes à corrosão**, Caxias do Sul, 2011.

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