

## **AVALIAÇÃO DO INOX AISI304 QUANTO AO DESGASTE SINÉRGICO ENTRE CAVITAÇÃO E CORROSÃO.**

**Andre Renan Mayer**

**Anderson G. M. Pukasiewicz**

**Arthur Gabriel Volpi Fauth**

Universidade Tecnológica Federal Do Paraná - UTFPR, Av. Monteiro Lobato, km04, s/n, 84016-210 Ponta Grossa, Paraná, Brazil  
andre.mayer@hotmail.com; anderson.pukasiewicz@gmail.com; arthurfauth@gmail.com

**Resumo.** Este trabalho fez a utilização de métodos aplicados à uma liga de aço inoxidável AISI304 para avaliação de sua resistência combinada à cavitação e corrosão. Bem como avaliou parâmetros que são primordiais para extrair conclusões dos experimentos. Para isso, utilizou-se um sistema onde foram combinados um equipamento para cavitação acústica e um potenciostato para avaliação da corrosão. Experimentos de cavitação tanto em água destilada quanto em solução de NaCl foram realizados e comparados assim como de corrosão após os desgastes gerados pela cavitação. OS resultados mostraram que o meio corrosivo possuiu uma grande influência no desgaste total de maneira prejudicial. Da mesma forma, o desgaste físico possuiu uma influência no desgaste químico até um certo ponto onde passamos a ter uma corrente e potencial de corrosão mais elevados, porém o potencial de circuito aberto diminuiu.

**Palavras chave:** Corrosão. Cavitação. Sinergia. Desgaste.

### **1. INTRODUÇÃO**

Esforços cada vez maiores estão sendo empregados com a finalidade de evitar processos de desgaste nos materiais. Processos de revestimentos, recuperação e melhoria de materiais tem sido aplicado para tentar minimizar esses desgastes. Sendo assim, diversos artigos são produzidos avaliando esses processos de desgaste. Esse interesse todo é baseado principalmente por custos econômicos e ambientais. Processos de desgaste, seja ele químico ou físico, são responsáveis por um grande impacto no consumo de energia global, como descrito por Holmberg; Erdemir (2017). Dessa forma, torna-se algo natural observar uma busca por melhores formas de evitar o desgaste. Porém, apesar de toda atenção dada à seleção de materiais, parâmetros e de uma forma geral aumento da resistência dos materiais, a forma de avaliar esses materiais ainda não está bem esclarecida. Quando temos processos de desgaste, de maneira geral, temos a combinação de diversos processos que interagem entre si e podem alterar as taxas de degradação do material. Sendo assim, ensaios combinando os mecanismos de desgaste tem começado a ser estudado. Alguns exemplos de trabalhos nessa linha são Basumatary; Wood (2017) e Hong et al. (2015).

Ainda não há um consenso sobre as metodologias a serem aplicadas nessas avaliações. Sabe-se que o comportamento depende muito para cada tipo de material. Em casos onde combinados desgaste físico e químico aumentamos bastante a complexibilidade de avaliar quais ligas possuem melhor resistência para aquele cenário. Em materiais onde temos passivação do material, sua cinética de formação de filme influencia diretamente as taxas de desgaste. Sendo assim, este trabalho selecionou uma liga de aço inox AISI 304 para entender como esses mecanismos funcionam e o impacto gerado na combinação de cavitação e corrosão nesse material. Este artigo tem como foco fazer uma análise mais aprofundada do comportamento sinérgico em uma liga de inox AISI 304 com a finalidade de encontrar ferramentas de avaliação desses mecanismos e dessa forma poder aplica-los em diversos materiais.

### **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

Para todos os ensaios a superfície foi padronizada utilizando-se lixamento até 1200 mesh e polimento até solução de diamante policristalino de 0,25µm. Em seguida, embutiu-se a amostra em resina epóxi, para padronizar a área exposta. Anteriormente ao processo de embutimento soldou-se um contato elétrico para adicionar a amostra no circuito elétrico nos ensaios de corrosão utilizando potenciostato. Podemos observar como ficou a amostra na imagem 1.

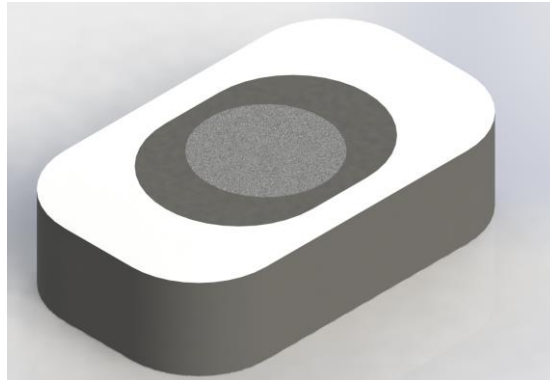


Figura 2. Sistema de preparação da amostra para os ensaios de cavitação e corrosão.

O ensaio de cavitação foi realizado tanto em água destilada e em solução de 3,5% em massa de NaCl, utilizando cavitação acústica ultrasônica de acordo com a ASTM G32-03. Utilizou-se um sonotrodo com ponta de 2.8cm<sup>2</sup> e amplitude pico a pico de 50µm com frequência de 20kHz. Ambas os ambientes de água destilada e solução de NaCl foram mantidos a 25 ± 1°C.

Os ensaios eletroquímicos foram realizados utilizando o potenciostato PGSTAT M204, FRA32M AutoLab (Utrecht, Holanda), seguindo as normas da ASTM G59-97 e G102-89, para determinar as curvas de polarização em uma solução de 3.5% em massa de NaCl a 25°C. Para os ensaios de corrosão, uma amostra com uma área exposta de 5,6cm<sup>2</sup> foi utilizada. Como contra eletrodo utilizou-se um eletrodo de platina e para referência um eletrodo de calomelano em solução de 3.0M de KCl. Para a polarização linear, utilizou-se uma variação de -150 até 500mV do E<sub>corr</sub>. Podemos observar abaixo o sistema utilizado com a finalidade de permitir tanto o ensaio de cavitação quanto corrosão.

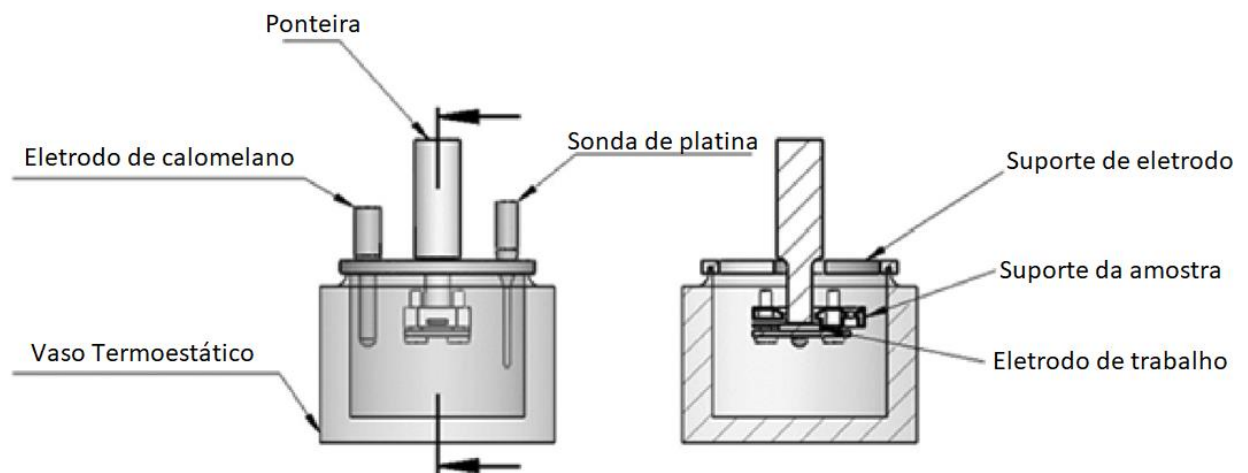


Figura 2. Esquemático de eletrodos e sonotrodo para ensaio e cavitação e corrosão. Adaptado de Mayer et al. (2020).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Podemos observar abaixo os resultados do desgaste total tanto em água destilada quanto em solução de NaCl. Fica claro que há uma variação grande quanto ao desgaste. Podemos definir esses resultados como o desgaste total da amostra. Para o caso da água destilada, possuímos apenas o desgaste gerado pelo processo físico. Já no caso da solução salina, a interpretação torna-se um pouco mais complexa, pois envolve o desgaste químico da corrosão.

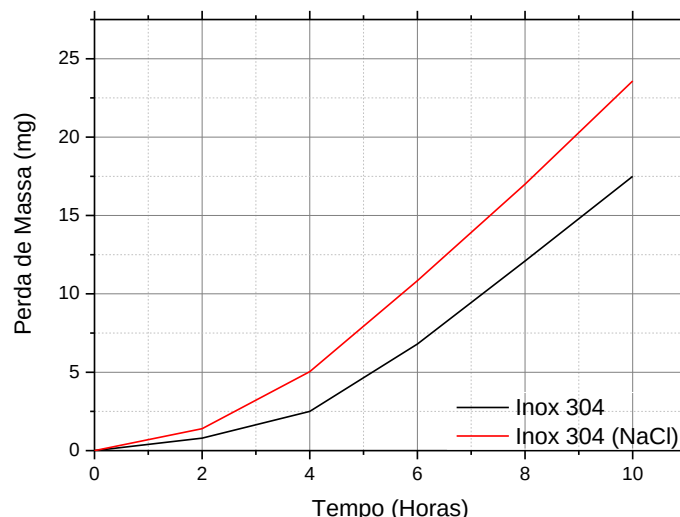


Figura 3. Ensaio de cavitação em meio de água destilada e solução de 3.5% em massa de NaCl

Podemos observar na Eq. 1 como a norma da ASTM G 119 – 04 trata a divisão das parcelas de desgaste.

$$T = W_o + C_o + S \quad (1)$$

Sabemos que as taxas de corrosão do inox 304 é baixíssima para um período de apenas 10 horas de submersão. Dessa forma podemos dizer que  $C_o \approx 0$  e assim avaliar a parcela sinérgica  $S$ . A tabela 1 mostra esses valores.

Tabela 1 – Parcelas de desgaste.

| Tempo (Horas) | Desgaste Total T(mg) | Desgaste físico $W_o$ (mg) | Parcela sinérgica $S$ (mg) |
|---------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| 2             | 1,4                  | 0,8                        | 0,6                        |
| 4             | 5,04                 | 2,5                        | 2,54                       |
| 6             | 10,84                | 6,8                        | 4,04                       |
| 8             | 17                   | 12,1                       | 4,9                        |
| 10            | 23,58                | 17,5                       | 6,08                       |

Podemos ver que a parcela sinérgica não apenas é relevante quanto também possui uma taxa de crescimento ao longo do tempo. Isso se deve à grande correlação dos processos de corrosão com a qualidade da superfície, como descrito por Jalali Azizpour; Tolouei-Rad (2019). Sendo assim, estudos mais focados em entender como o processo corrosivo se modificou ao longo do desgaste foram realizados. Abaixo podemos ver como o potencial de circuito aberto foi alterado com a indução da cavitação. Este mesmo comportamento já foi observado em alguns trabalhos para ligas que possuem características de passivação, como observado por Kwok et al. (2000). Ao induzir o processo de cavitação ultrassônica podemos ter basicamente dois comportamentos distintos. O primeiro é o observado abaixo, e mais comumente encontrado em ligas passivantes. Quando iniciamos o processo de desgaste existem dois fenômenos que alteram o OCP da amostra, que seriam a exposição do material pela destruição da camada passiva e a aeração da superfície. Como a reação de redução do oxigênio possui um potencial mais elevado, temos um aumento no potencial devido à essa reação química e ao analisarmos o OCP temos um potencial misto entre a reação da amostra e a do oxigênio. Quando expomos a amostra sem a proteção da camada passiva temos uma queda no potencial devido à reação de oxidação do metal. O resultado visto em prática será dado pelo balanço entre esses dois fenômenos. Quando Kwok et al. (2000) fez a mesma análise para uma liga de aço com baixo carbono que não possuía nenhum mecanismo de passivação, foi possível observar um comportamento contrário no OCP.

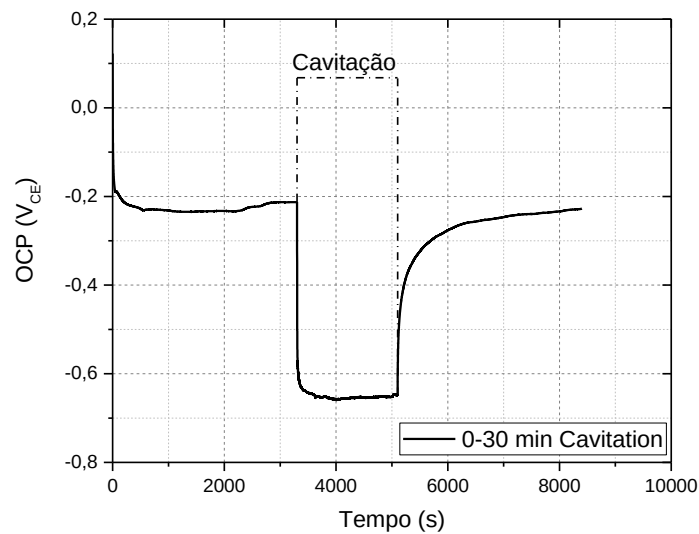


Figura 4. Potencial de circuito aberto em meio quiescente e com cavitação.

Abaixo temos as curvas Tafel e os potenciais de circuito aberto extraídos após cavitação. Podemos observar uma constante variação do potencial de corrosão. Além disso, podemos ver que quanto maior o desgaste da amostra maior foi o potencial de ativação da reação de oxidação. A tabela 2 mostra esses valores de potenciais.

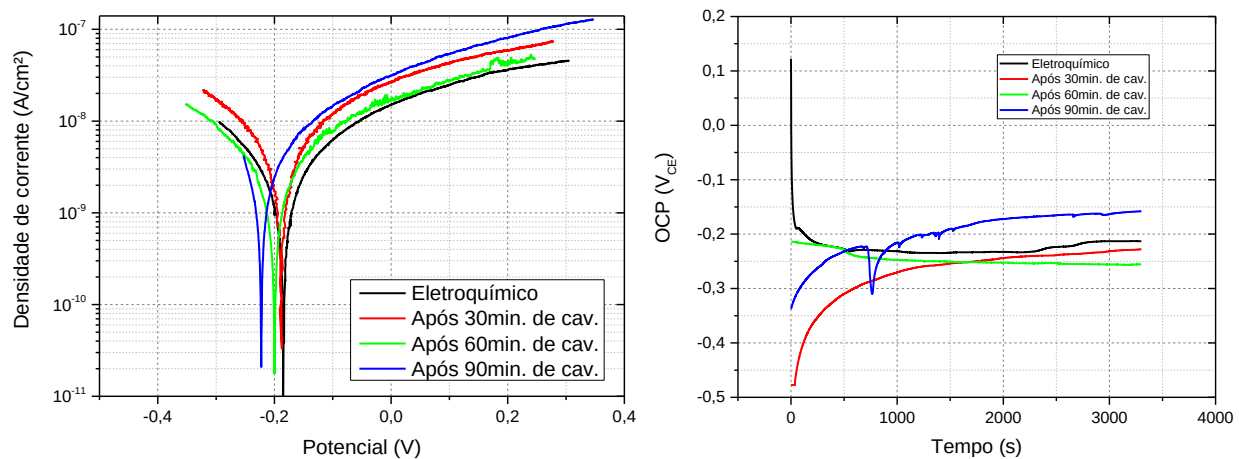


Figura 5. Curvas Tafel e potenciais de circuito aberto em relação ao tempo de desgaste.

Temos que no início do desgaste o OCP começa a cair, tornando assim o metal mais suscetível à corrosão de uma maneira termodinâmica. Isso acaba sendo revertido após 90 minutos de desgaste, onde este potencial tem um aumento, tornando a amostra mais protegida. Quanto às curvas Tafel, temos de maneira consistente essa diminuição no potencial. Isso poderia ser explicado pela alteração na cinética de formação de filme. Como o desgaste induziu o material à corrosão, temos uma cinética de formação do filme passivo diferente. Essa mudança pode ser em alguns casos benéfica, como é observado nos processos de anodização dos metais. Essa explicação corrobora com a diferença entre os potenciais de corrosão e ativação. Apesar de o potencial de corrosão estar aumentando com o tempo de cavitação, o potencial de ativação possui uma variação também expressiva. Com isso a amostra possui uma demanda maior de energia para iniciar o processo de corrosão, tornando-a a princípio mais resistente.

Tabela 2 – Diferentes potenciais eletroquímicos.

| Tempo (Min.) | OCP (V) | Potencial de corrosão | Potencial de ativação |
|--------------|---------|-----------------------|-----------------------|
| 0            | -0,199  | -0,1853               | 0,0137                |
| 30           | -0,228  | -0,18729              | 0,04071               |
| 60           | -0,256  | -0,20004              | 0,05596               |
| 90           | -0,158  | -0,22263              | 0,06463               |

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como finalidade avaliar de maneira mais aprofundada a forma como o desgaste combinado de cavitação e corrosão ocorreu em uma liga de aço inoxidável AISI 304. Com isso pode-se concluir que:

1. O processo de corrosão possui um impacto forte no processo de desgaste por cavitação, como pode ser observado no ensaio de cavitação que ocorreu nos meios de água destilada e de solução de NaCl. Não apenas o impacto é relevante, mas também ele cresce junto com a taxa do desgaste total.
2. O processo de corrosão teve uma variação expressiva com o desgaste. O desgaste gerado pela cavitação induzida por ultrassom aumentou significativamente o potencial de ativação da reação química, o que pode ser benéfico. Estudos mais aprofundados utilizando técnicas de impedância podem ser aplicadas para entender esse mecanismo.

#### 5. REFERÊNCIAS

- BASUMATARY, J.; WOOD, R. J. K. Different methods of measuring synergy between cavitation erosion and corrosion for nickel aluminium bronze in 3.5% NaCl solution. **Tribology International**, n. August, p. 1–12, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X17303833>>. .
- HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. **Friction**, v. 5, n. 3, p. 263–284, 2017.
- HONG, S.; WU, Y.; ZHANG, J.; et al. Effect of ultrasonic cavitation erosion on corrosion behavior of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) sprayed near-nanostructured WC-10Co-4Cr coating. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 27, p. 374–378, 2015. Elsevier B.V.
- JALALI AZIZPOUR, M.; TOLOUEI-RAD, M. The effect of spraying temperature on the corrosion and wear behavior of HVOF thermal sprayed WC-Co coatings. **Ceramics International**, v. 45, n. 11, p. 13934–13941, 2019. Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.091>>. .
- KWOK, C. T.; CHENG, F. T.; MAN, H. C. Synergistic effect of cavitation erosion and corrosion of various engineering alloys in 3 . 5 % NaCl solution. **Materials Science and Engineering A**, v. 290, p. 145–154, 2000.
- MAYER, A. R.; BERTUOL, K.; SIQUEIRA, I. B. A. F.; et al. Evaluation of cavitation/corrosion synergy of the Cr3C2-25NiCr coating deposited by HVOF process. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 69, n. July, p. 105271, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105271>>. .