

Artigo

Análise não Estacionária Aplicada a Sinais de Tribocorrosão**Kappel, M. A. A.; Silva, D. P.; Sánchez-Amaya, J. M.; Domingos, R. P.; Bastos, I. N.****Rev. Virtual Quim.*, 2015, 7 (5), 1651-1662. Data de publicação na Web: 25 de maio de 2015<http://www.uff.br/rvq>**Non-stationary Analysis Applied to Tribocorrosion Signals**

Abstract: Significant part of electrochemical and mechanical tribocorrosion signals can be non-stationary. These signals include electrochemical potential and current, and friction force. Thus, in this case, traditional analysis techniques in the frequency domain, such as the Fourier transform technique, are not suitable for the efficient signal interpretation. Techniques such as the Short-Time Fourier Transform (STFT) are typically applied in time-frequency domain to make a detailed signal analysis. However, since the method is based on choosing a fixed length window, it is not possible to simultaneously obtain the highest resolution in both time and frequency. The current paper adopted a technique to find a dynamically variable size for the window in order to efficiently analyze non-stationary signals. This procedure was applied to tribocorrosion signals of commercially pure titanium rubbed against an alumina sphere of 4.0 mm in 0.9% m/v NaCl medium. The method directly analyzes the signal in the time domain by computing the kurtosis of small centered intervals of the signal. In practice, kurtosis can detect abrupt changes in data distribution by adapting the time-frequency resolution when it is necessary. The variable STFT results are adequate for the investigation of tribocorrosion friction force and electrochemical potential/current because they present a plot in time-frequency domain without the need of a preconditioning stage, i.e., the data were analyzed as they were generated in the experiments.

Keywords: Tribocorrosion; potential; current; time-frequency analysis.

Resumo

Parte significativa dos sinais eletroquímicos e mecânicos em tribocorrosão pode ser não estacionária. Estes sinais incluem o potencial, a corrente eletroquímica, e a força de atrito. Assim, nesse caso, técnicas tradicionais de análise no domínio da frequência, como a transformada de Fourier, não são adequadas para uma interpretação eficiente do sinal. Normalmente, para fazer uma análise detalhada do sinal, são aplicadas técnicas no domínio tempo-frequência, como a *Short-Time Fourier Transform* (STFT). Entretanto, uma vez que o método é baseado na escolha de uma janela de tamanho fixo, não é possível obter simultaneamente máxima resolução tanto no tempo quanto na frequência. Neste trabalho, uma técnica foi adotada para encontrar um tamanho dinamicamente variável para a janela, com o objetivo de aperfeiçoar a identificação de alterações na frequência do sinal, características de sinais não estacionários. Este procedimento foi aplicado em sinais de tribocorrosão do titânio comercialmente puro atritado contra uma esfera de 4,0 mm de alumina em solução de NaCl 0,9% m/v. Com esse método, pode-se analisar diretamente o sinal no domínio do tempo, calculando a curtose de pequenos intervalos centrados do sinal. Na prática, a curtose pode detectar alterações abruptas na distribuição dos dados, adaptando a resolução tempo-frequência quando necessária. Os resultados da *Variable Short-Time Fourier Transform* (VSTFT) se mostraram adequados para a investigação da força de atrito e do potencial/corrente de sinais de tribocorrosão, pois apresentam os sinais no domínio tempo-frequência sem a necessidade de um estágio de pré-condicionamento, ou seja, os dados foram analisados como gerados nos experimentos.

Palavras-chave: Tribocorrosão; potencial; corrente; análise tempo-frequência.

* Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Rua Bonfim, 25, CEP 28625-570, Nova Friburgo-RJ, Brasil.

✉ inbastos@ipri.uerj.br

DOI: [10.5935/1984-6835.20150093](https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150093)

Análise não Estacionária Aplicada a Sinais de Tribocorrosão

Marco André A. Kappel,^a Danilo Pedro Silva,^a José María Sánchez-Amaya,^b Roberto P. Domingos,^a Ivan Napoleão Bastos^{a,*}

^a Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, R. Bonfim, 25, CEP 28625-570 Nova Friburgo- RJ, Brasil.

^bUniversidad de Cádiz, Laboratorio de Ensayos, Corrosión y Protección, Departamento de Ciencia de los Materiales, Ingeniería Metalúrgica y Química Inorgánica, República Saharhui, s/n, Edificio CASEM 11510, Puerto Real, Cádiz, España.

* inbastos@iprj.uerj.br

Recebido em 1 de novembro de 2014. Aceito para publicação em 22 de maio de 2015

1. Introdução
2. Método Experimental
 - 2.1. Análise Tempo-Frequência
3. Resultados e Discussão
4. Conclusão

1. Introdução

A tribocorrosão é um processo químico, mecânico e eletroquímico, que leva à degradação da superfície de materiais. A exposição a esses processos simultaneamente pode ou não resultar em desgastes amplificados. Em geral, há uma sinergia entre os processos corrosivos e mecânicos que provocam desgastes acelerados na superfície da amostra do material estudado.

Os materiais mais comumente utilizados em investigações tribocorrosivas são os que possuem a capacidade de formar camada passiva,¹ ou seja, um filme de óxido aderente e protetor, que reduz ou impede as reações de oxidação na superfície do material.

Além disso, as características intermitentes da transição passivo/ativo na área desgastada podem gerar mecanismos de desgaste diferentes de acordo com as interações mecânicas locais entre a superfície metálica e o contracorpo. Muitos termos são utilizados para caracterizar mecanismos semelhantes.² Entretanto, os mecanismos de desgaste são geralmente referidos como abrasivos, adesivos, por delaminação e oxidativos.³

Tais mecanismos não são sempre independentes nem excludentes, e não podem ser facilmente identificados. Os processos concomitantes, como a distância percorrida durante o desgaste e a concentração de tensão na superfície do substrato metálico, podem ser relevantes na determinação do tipo de desgaste nas regiões danificadas, aumentando a

complexidade do fenômeno de tribocorrosão.⁴

Para a análise de sinais de tribocorrosão, diversas técnicas eletroquímicas são utilizadas, como o monitoramento em circuito aberto, espectroscopia de impedância eletroquímica, curvas de polarização e amperimetria de resistência nula.⁵ O ensaio de amperimetria de resistência nula objetiva captar as flutuações de potencial e corrente entre dois eletrodos

(contraeletrodo e eletrodo de trabalho) do mesmo material. Nesse ensaio, ambos os eletrodos possuem áreas anódicas e catódicas e apenas parte da corrente pode ser captada.⁶ Ao desgastar a superfície, há uma região da amostra que se torna bastante anódica e é possível constatar que a maior parte da corrente medida provém dessa região.⁷ As Figuras 1 e 2 mostram uma representação do tribômetro utilizado nos ensaios do presente trabalho.

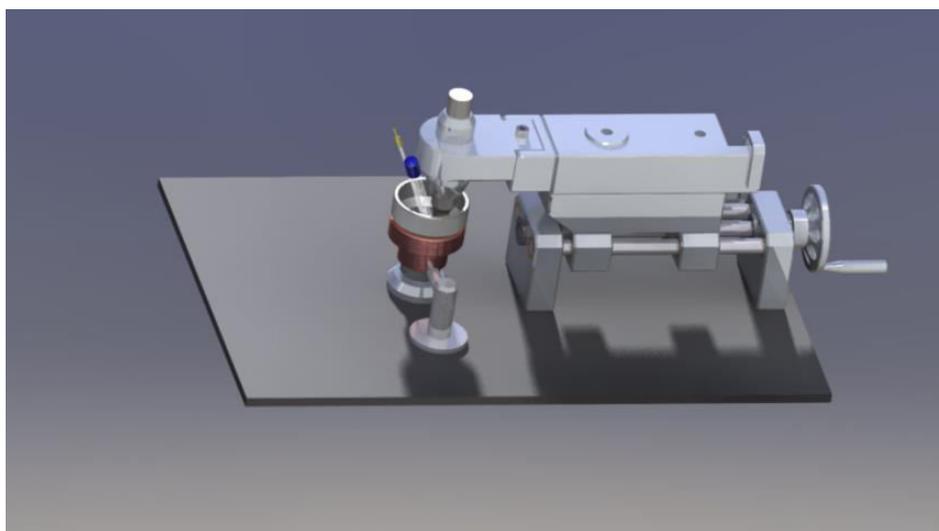


Figura 1. Tribômetro utilizado nos ensaios de tribocorrosão

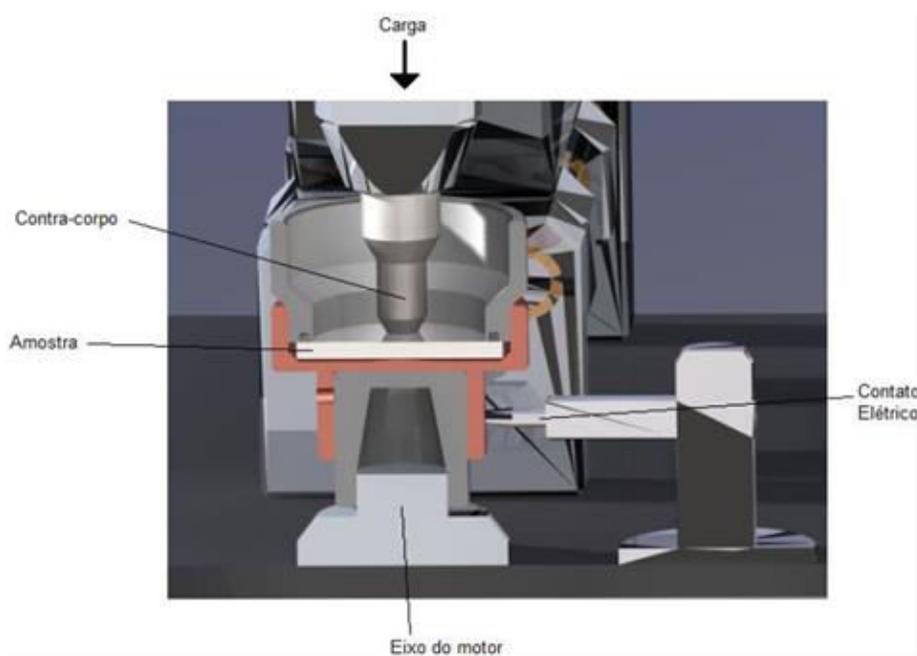


Figura 2. Corte transversal do tribômetro utilizado

O tratamento clássico de sinais temporais utiliza a transformada de Fourier. Este procedimento assume que o sinal é estacionário. No entanto, a grande maioria dos sinais reais é não estacionário.⁸ Desse modo, o uso da análise tempo-frequência é necessário.

Os sinais brutos de processos de tribocorrosão são frequentemente não estacionários. Portanto, o uso de novas técnicas de processamento de sinais é aconselhável. Neste sentido, foi implementada uma versão da *Variable Short-Time Fourier Transform* (VSTFT), de modo que a resolução de tempo e frequência variam, dependendo do próprio sinal, com base na curtose.⁹ Assim, a curtose se altera de acordo com as características do sinal no tempo. Após a implementação do programa VSTFT, os sinais de força de atrito e potencial de tribocorrosão foram avaliados utilizando este procedimento.

2. Método Experimental

Foram utilizadas amostras de titânio comercialmente puro em forma de discos de 24 mm de diâmetro. Antes dos ensaios, todas as amostras foram polidas com lixas d'água até a granulometria 600, lavadas com água destilada, limpas com álcool etílico de pureza analítica e secas com fluxo de ar quente. Como contracorpo do tribômetro, foram usadas esferas de alumina de 4,0 mm de

diâmetro. Além disso, o carregamento aplicado foi de 5,0 N e a frequência de rotação foi de 1,25 Hz. Foi empregada a solução fisiológica (NaCl 0,90% m/v), à temperatura ambiente de aproximadamente 25 °C. Foi utilizada a técnica de pino-sobre-disco com a carga aplicada pela força peso de uma massa fixa. As medidas eletroquímicas de corrente e potencial foram obtidas na configuração de ZRA (*Zero Resistance Ammeter*). Uma referência de calomelano saturado para acompanhar o potencial eletroquímico. O eletrodo de trabalho foi o disco de titânio sujeito ao atrito e o contraeletrodo uma barra de mesmo material. Um potenciostato Princeton Applied Research VersaStat 3 foi usado nestes experimentos.

2.1. Análise Tempo-Frequência

A função principal da *Short Time Fourier Transform* (STFT) é avaliar a variação do espectro de frequência de um sinal com o tempo. Usando a transformada de Fourier tradicional não é possível detectar o instante específico em que um sinal produz um determinado espectro de frequência com o qual está relacionado, sendo por isto inadequada para a análise de sinais não estacionários. A Figura 3 mostra um exemplo da aplicação da transformada de Fourier tradicional no sinal de tribocorrosão estudado neste artigo.

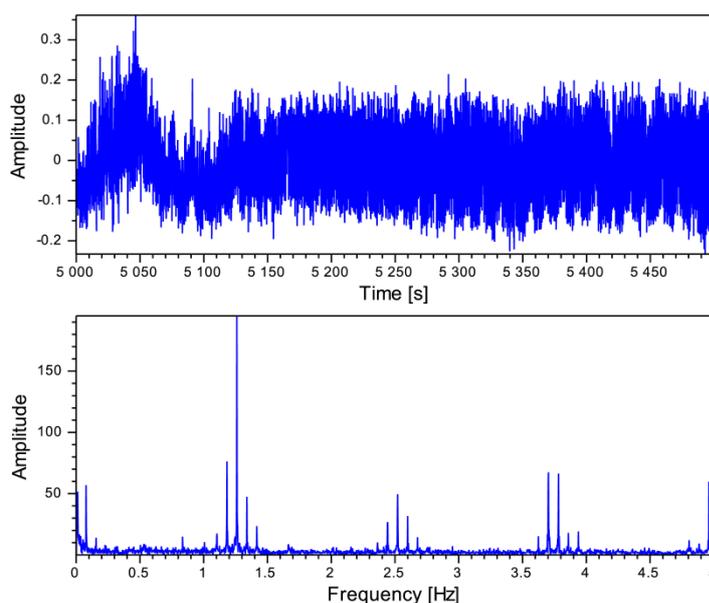


Figura 3. Sinal não estacionário e sua transformada de Fourier

Analisando a Figura 3, percebe-se claramente que o sinal possui uma forte componente de frequência em 1,25 Hz, além de outras, mais fracas, em frequências harmônicas. Porém, como a transformada de Fourier é uma ferramenta de análise frequencial global, não é possível saber se as componentes de frequência estão presentes permanentemente no sinal, ou se sofrem alterações de acordo com o tempo.

Uma análise frequencial-temporal como a STFT possibilita a avaliação desta variação da frequência com o tempo. Além disso, para o caso de tribocorrosão podem ocorrer

fenômenos localizados, por exemplo, rupturas do filme passivo que não podem ser tratadas como tipicamente estacionários.

A STFT calcula as componentes de frequência do sinal pela passagem de uma janela relativamente curta por todo o sinal, calculando a transformada de Fourier somente nos pontos pertencentes a esse domínio. O tamanho escolhido para o comprimento da janela é determinante para a resolução obtida no domínio do tempo-frequência. A STFT de um determinado sinal $s(t)$ é dada por:

$$STFT[s(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau)w(\tau - t_{fix})e^{-j2ft}d\tau \quad (1)$$

onde w pode ser qualquer função janela, como a retangular, Hann ou Gaussiana, centrada em $(\tau - t_{fix})$, em que t_{fix} é um tempo fixo de atraso, definido pelo intervalo de tempo correspondente a um tamanho de janela previamente estabelecido. $s(\tau)$ é a função que descreve o sinal no tempo, j é o número complexo $\sqrt{-1}$, f é a variável que descreve a frequência após a integração e τ é a variável de integração, que corresponde ao

tempo decorrido na medição do sinal. O resultado da aplicação da equação será o espectro de frequências do sinal para cada instante. Neste trabalho, uma janela Gaussiana foi utilizada, por ser a mais conhecida e utilizada em análise estatística de sinais.¹⁶

O principal aspecto da aplicação da STFT é definir um tamanho ideal de janela. Porém, não é possível definir um único valor para

todo o sinal e assim otimizar a resolução, seja no tempo ou na frequência. A ideia de se definir um valor para o tamanho da janela que varie de forma adaptativa para cada instante de tempo na aplicação da STFT originou a VSTFT, que surgiu com o objetivo de superar este problema.

A STFT utiliza uma janela fixa para todos os pontos do sinal. Assim, se a alteração de frequência for muito rápida e a janela escolhida for muito grande, a oscilação pode passar despercebida. Por outro lado, se a janela for muito pequena, a componente de frequência presente no sinal não tem boa definição, dificultando sua determinação com precisão. Já a VSTFT, que usa uma janela adaptativa, é capaz de alterar a resolução nos trechos em que ocorre mudança de frequência, diminuindo e aumentando o tamanho da janela. Determinar um tamanho correto para a janela em sinais de tribocorrosão não é uma tarefa trivial, pois as alterações de frequência ocorrem em intensidades diferentes de acordo com o tempo. Assim, o principal ganho da VSTFT em relação à STFT é a escolha automática do tamanho da janela.

A VSTFT também é definida pela Eq. (1), mas substituindo o valor de tamanho de janela de tempo fixo t_{fix} por um tamanho de janela de tempo local t_{local} . Há estudos que

$$K = \frac{m_4 - 3m_2^2 + 12m_2m_1^2 - 4m_1m_3 - 6m_1^4}{m_2^2} \quad (2)$$

em que m_1 , m_2 , m_3 e m_4 são o primeiro, segundo, terceiro e quarto momentos estatísticos dos dados, respectivamente. Esta expressão calcula o excesso de curtose, que é a curtose “menos 3”, tornando a curtose em excesso da distribuição normal igual a zero. Esta formulação utiliza a normalização do quarto cumulante.¹⁶

O método analisa diretamente o sinal no domínio do tempo, calculando a curtose de pequenos intervalos do sinal. A curtose de dados é utilizada para determinar o tamanho

permitem a análise tempo-frequência adaptativa dependente do sinal, usando técnicas de otimização para definir o melhor tamanho de janela para cada instante.^{10,11,12} Entretanto, estes métodos geralmente requerem alto custo computacional, tornando o processo inviável para aplicações on-line.

A fim de se utilizar um método de alto desempenho para o cálculo de comprimento da janela em cada instante de tempo, um esquema que faz uso da curtose foi aplicado. A curtose é uma medida estatística que descreve a forma da distribuição dos dados. Na prática, a análise de curtose pode detectar mudanças abruptas de distribuição de dados, revelando partes não estacionárias do sinal.¹⁶ Se os dados contidos no sinal seguem uma distribuição normal, por exemplo, a curtose seria igual a 3. Isso caracterizaria, por exemplo, a presença apenas de sinal com natureza gaussiana. Porém, se houver trechos do sinal que causam uma variação da curtose, isso indica que a distribuição dos dados do sinal está se afastando da distribuição normal.

A ideia é adaptar o tamanho da janela de acordo com a curtose calculada por trechos do sinal. Há algumas maneiras de se definir a curtose de dados. O método utilizado neste trabalho é dado pela Eq. (2),

da janela mais adequada para cada instante. Este método possui a vantagem de não exigir uma pré-aplicação da STFT, reduzindo o custo computacional.

A curtose local identifica elevadas oscilações do sinal no próprio domínio do tempo, e não no da frequência. Em seguida, a curtose calculada foi normalizada pela Eq. (3), antes de ser usada para determinar o comprimento da janela local.

$$K_{local}^{aux} = K_{max} - K_{local} \quad (3)$$

A curtose auxiliar, obtida pela Eq. (2), pode ser usada diretamente na Eq. (3) para definir o tamanho da janela local. Basicamente, a Eq. (2) reflete a curtose no eixo horizontal e faz uma translação de K_{max} , para tornar todos os valores positivos. Desta maneira, a curtose fica proporcional ao tamanho ideal da janela local.

$$N_{local} = N_{max} \frac{K_{local}^{aux}}{K_{max}^{aux}} \quad (4)$$

Este processo de definição dinâmica do tamanho de janela e aplicação da VSTFT é descrito pelo seguinte algoritmo:

Algoritmo: VSTFT usando a curtose no tempo

- 1: **procedimento** VSTFT
- 2: Definir o tamanho máximo da janela N_{max}
- 3: **Para** $i = 1 < \text{comprimento (sinal)}$ **faça**
- 4: Calcular K_{local} usando pequenos intervalos do sinal no domínio do tempo
- 5: $K_{max} = \max(K_{local})$
- 6: Calcular K_{local}^{aux}
- 7: $K_{max}^{aux} = \max(K_{local}^{aux})$
- 8: **Para** $i = 1 < \text{comprimento (sinal)}$ **faça**
- 9: Calcular N_{local}
- 10: VSTFT(i) = FFT do sinal “enjanelado”

Neste trabalho, a VSTFT foi aplicada em sinais de tribocorrosão para analisá-los em detalhe no domínio tempo-frequência. Após a obtenção experimental de sinal, as séries temporais foram modificadas por um ajuste de polinômio de ordem 5, que remove o desvio causado pela componente contínua.

A eliminação do desvio pode ser realizada por vários procedimentos, como a remoção por polinômio,¹³ média móvel,¹⁴ filtros digitais e wavelets.¹⁴ No presente trabalho, foi utilizado o método polinomial, especialmente devido à sua simplicidade e

eficiência em ruído eletroquímico.¹³ Este método remove as componentes de baixa frequência relacionadas ao deslocamento vertical do sinal (*drift*), centralizando-o no eixo horizontal, conforme apresentado na Figura 4. Como pode ser observado nos resultados, o método remove as componentes de baixa frequência e mantém as flutuações localizadas ao longo do tempo, possibilitando seu estudo. Finalmente, o esquema de VSTFT proposto foi aplicado em dois intervalos do sinal modificado: antes e após a aplicação da carga.

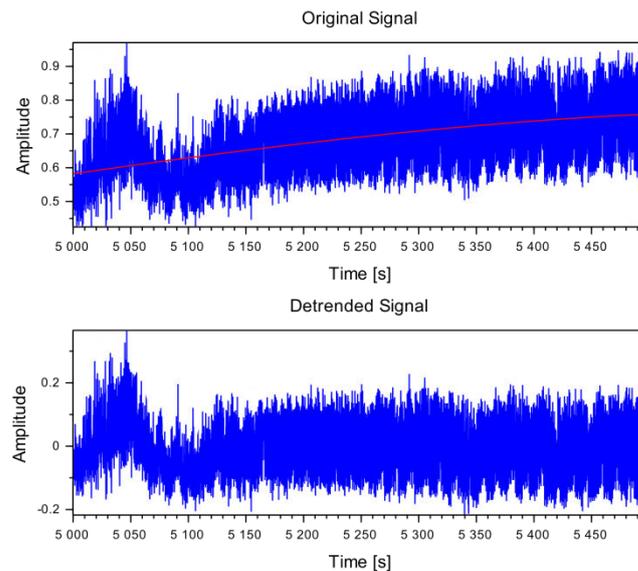


Figura 4. Exemplo do ajuste polinomial para remoção da componente contínua do sinal

3. Resultados e Discussão

A Figura 5 mostra os sinais do coeficiente de atrito, da corrente e do potencial. Antes da aplicação da carga, a força de atrito é nula e o potencial eletroquímico é elevado. Durante a fricção, o potencial eletroquímico cai cerca de 0,5 V. Isso ocorre devido ao desgaste do filme passivo, expondo o metal base. Simultaneamente, o coeficiente de atrito aumenta para valores em torno de 0,8.

Na Figura 5 são exibidos os sinais original e filtrado do coeficiente de atrito por causa do grande ruído proveniente do inversor de frequência do motor elétrico utilizado no tribômetro. O emprego do filtro objetiva visualizar de forma mais clara os valores do coeficiente de atrito, sendo empregado o filtro de mediana em conjuntos de 30 pontos sem sobreposição de dados.

É possível observar que os sinais possuem a frequência original de rotação, além de outros componentes de frequência que não são detectados por observação visual. Para investigar este fato, a VSTFT foi aplicada aos sinais nos intervalos entre os colchetes da Figura 5. Cada par corresponde a um intervalo de 5000 pontos medidos. A frequência de amostragem foi de 2,0 Hz.

Com os sinais experimentais devidamente tratados com a remoção de *drift*, a análise de tempo-frequência foi feita. A transformada de Fourier, por si só, não é capaz de definir os instantes específicos em que o sinal assume uma frequência específica. A fim de obter os dados de domínio de tempo-frequência, o esquema de VSTFT foi aplicado. A curtose foi calculada em pequenos intervalos de 50 pontos centrados. Para cada instante, a curtose foi calculada nos intervalos correspondentes. Como exemplo, a curtose no tempo em ambos os intervalos do sinal de força de atrito pode ser vista na Figura 6.

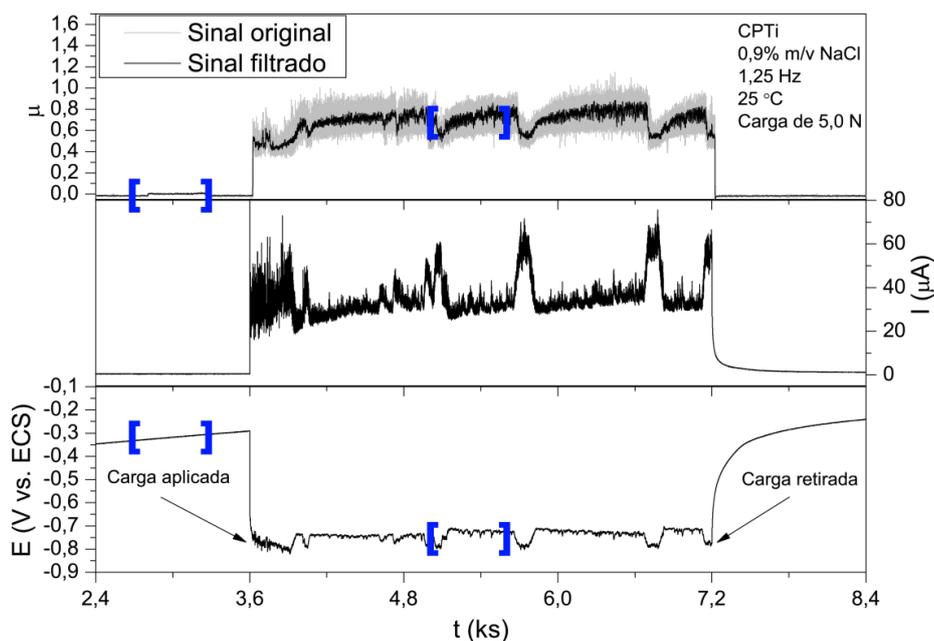


Figura 5. Coeficiente de atrito, corrente e potencial antes e depois do carregamento mecânico

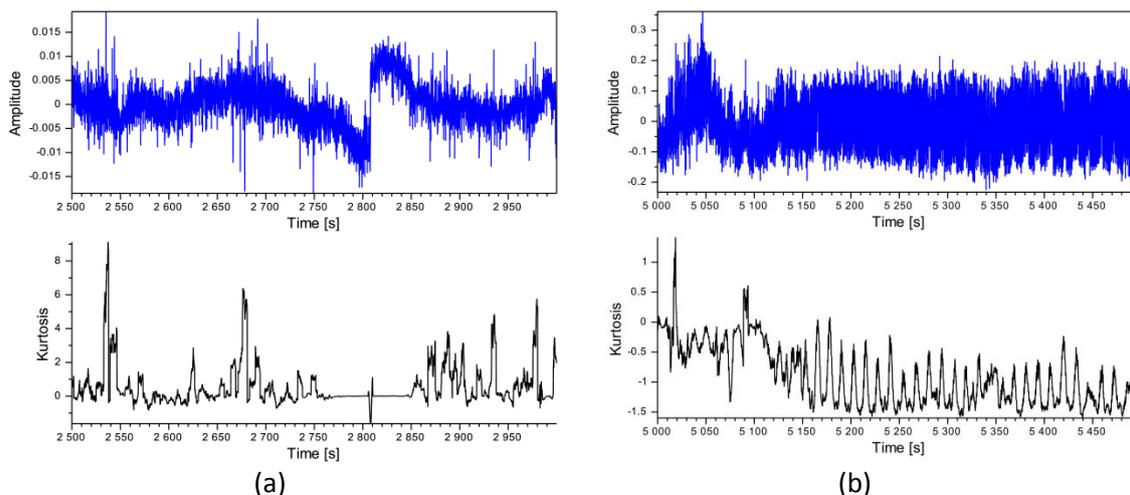


Figura 6. Dependência da curtose com o tempo. (a) antes e (b) depois da aplicação da carga

Utilizando uma janela de comprimento máximo de 256 pontos, o comprimento da janela local foi calculado usando a Eq. (4). É possível notar que a variação do comprimento da janela local é muito sensível às mudanças bruscas no sinal.

Os resultados da VSTFT podem ser encontrados nas Figuras 7 e 8. Percebe-se claramente a alta resolução obtida para as características do espectro. Antes da aplicação da carga, todos os sinais de força de atrito, de potencial do par de eletrodos, e

a corrente não parecem ter quaisquer componentes principais de frequência. No caso da força de atrito, é possível perceber a ocorrência de um transiente por volta do instante 2800 s, o que causou uma perturbação na frequência, como mostra a Figura 7a. Este transiente poderia ser causado por uma grande depassivação da superfície.

Depois da aplicação da carga, a frequência de 1,25 Hz prevalece durante todo o tempo de medição, tanto para a força de atrito

quanto para o potencial. Esta frequência coincide com a frequência de rotação do tribômetro. Além disso, a intensidade das componentes varia com o tempo, como esperado, para sinais não estacionários. Esse

fato indica que neste caso, a transformada de Fourier regular não seria adequada o suficiente para identificar as frequências do presente sinal.

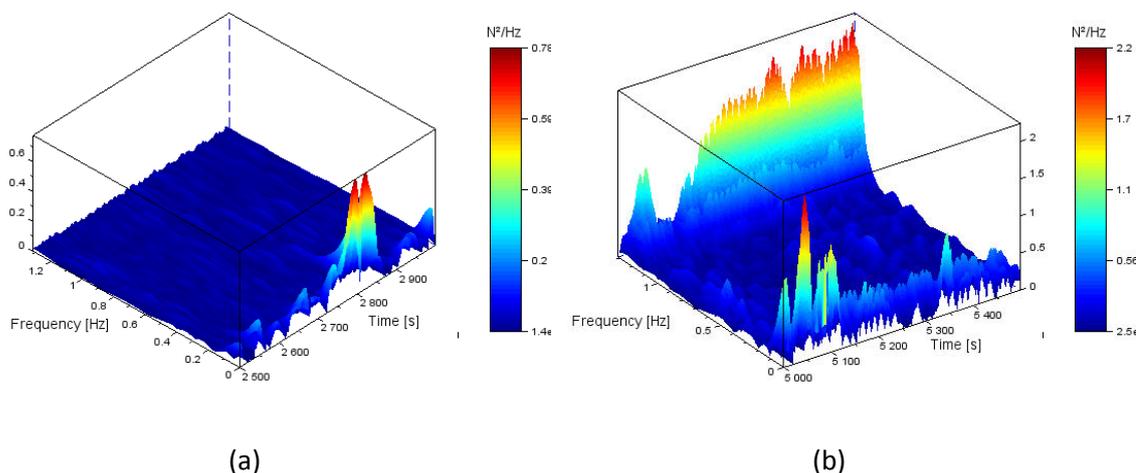


Figura 7. Espectrogramas 3D da VSTFT da força de atrito. (a) antes e (b) depois da aplicação da carga

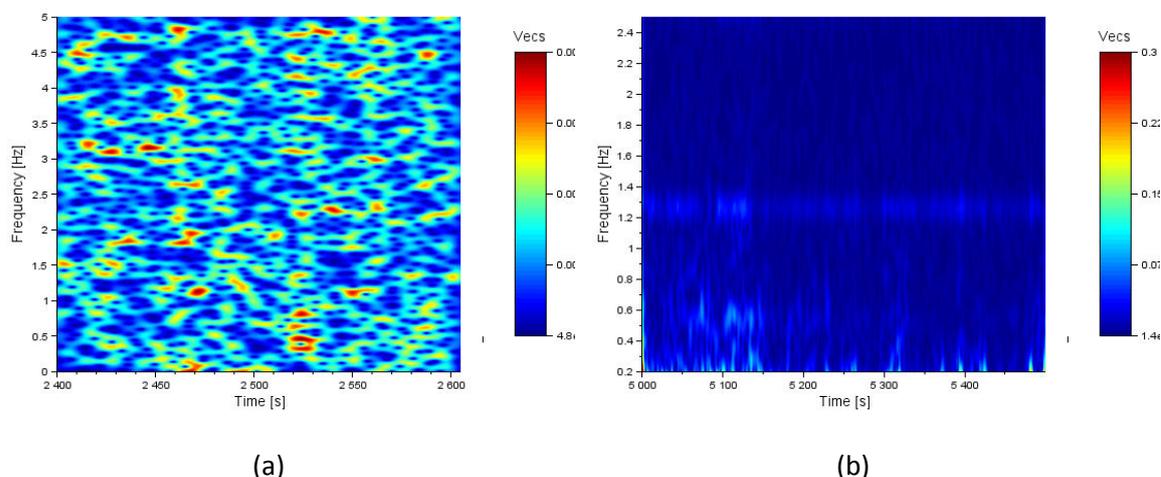


Figura 8. Resultados da VSTFT do potencial de circuito aberto. (a) antes e (b) depois da aplicação da carga de 5,0 N

A curtose é invariante para distribuições de probabilidade, sendo assim, muito útil para detectar discontinuidades.¹⁶ Dada uma parte de um sinal com elevada curtose, a variação ocorre em um tempo curto. Consequentemente, uma pequena janela de tempo é necessária para se ter uma boa resolução no domínio do tempo. A Figura 7(b), por exemplo, mostra um trecho do sinal

da força de atrito, após a aplicação da carga. Neste intervalo do sinal, a curtose aumenta pouco antes do instante 5100 s. Isto causa, conseqüentemente, uma diminuição no tamanho da janela utilizada, e, portanto, um aumento na resolução do tempo.

Este aumento de resolução permite uma percepção mais exata de quando a alteração

de frequência começa e termina, como pode ser visto na Figura 7(b). Assim, a resolução em frequência tornou-se mais pobre. No entanto, para encontrar uma melhor resolução no tempo para este resultado, o comprimento da janela teria que ser menor, causando perda de informações de frequência.

Na Figura 8(a) não é possível perceber nenhum componente principal de frequência, o que é coerente, visto que o sistema se encontra sem a presença da carga. Para este fim, a técnica de VSTFT foi aplicada pois permite otimizar, para cada instante do ensaio de tribocorrosão, a melhor combinação de resolução temporal ou em frequência do sinal eletroquímico ou mecânico.

4. Conclusão

Resultados experimentais da força de atrito (ou o coeficiente de atrito relacionado) e potencial eletroquímico, obtidos a partir de testes de tribocorrosão, foram estudados com e sem carga mecânica. O sistema utilizado consistiu em amostras de titânio comercialmente puro imersas em solução fisiológica de NaCl 0,90% m/v, e desgastados por contracorpos de alumina carregados com 5,0 N à frequência de 1,25 Hz. A amostra de titânio e um contraeletrodo também de titânio foram conectados na configuração de ZRA (*Zero Resistance Ammeter*); e uma referência de calomelano saturado foi usada para monitorar o potencial. Para estudar os registros temporais, foi utilizada uma técnica de STFT variável.

Uma vez que a curtose ajusta o tamanho da janela, foram obtidas melhores resoluções em ambos os domínios de tempo e frequência, possibilitando bons resultados para a análise do sinal de tribocorrosão. A janela variou de acordo com a curtose avaliada diretamente no domínio do tempo. A limitação de resolução sempre existe, porém, com a transformada variável, pode-se ajustá-la, resultando numa melhor resolução

onde for necessário, no domínio do tempo ou da frequência, mas não simultaneamente.

O cálculo da curtose no tempo representa um custo computacional menor do que na frequência, pois não é necessário fazer uma avaliação prévia dos espectros de frequência. Finalizando, pode-se concluir que o método de análise aqui empregado é interessante para estudar os sinais eletroquímicos de potencial e corrente associados ao fenômeno de tribocorrosão do titânio em meio fisiológico.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPq, da CAPES e da FAPERJ.

Referências Bibliográficas

- ¹ Mischler, S.; Muñoz, A. I. Wear of CoCrMo alloys used in metal-on-metal hip joints: A tribocorrosion appraisal. *Wear* **2013**, *297*, 1081. [[CrossRef](#)]
- ² Lim, S. C.; Ashby, M. F.; Brunton, J. H. Wear-rate transitions and their relationship to wear mechanisms. *Acta Metallurgica* **1987**, *35*, 1343 [[CrossRef](#)]
- ³ Landolt, D.; *Corrosion and Surface Chemistry of Metals*, 1a. ed., EPFL Press: Lausanne, 2007. [[CrossRef](#)]
- ⁴ Achanta, S.; Liskiewicz, T.; Drees, D.; Celis, J. P. Friction mechanisms at the micro-scale. *Tribology International* **2009**, *42*, 1792. [[CrossRef](#)]
- ⁵ Silva, R. C. C.; Nogueira, R. P.; Bastos, I. N. Tribocorrosion of UNS S32750 in chloride medium: Effect of the load level. *Electrochimica Acta* **2011**, *56*, 8839. [[CrossRef](#)]
- ⁶ Bertocci, U.; Gabrielli, C.; Huet, F.; Keddad, M. Noise resistance applied to corrosion measurements I: Theoretical analysis. *Journal of the Electrochemical Society* **1997**, *144*, 31. [[CrossRef](#)]
- ⁷ Silva, D. P. Comportamento tribocorrosivo do aço inoxidável e de ligas de titânio em

meio salino. *Dissertação de Mestrado*, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2014. [[Link](#)]

⁸ Vio, R.; Wamsteker, W. Joint time-frequency analysis: A tool for exploratory analysis and filtering of non-stationary time series. *Astronomy & Astrophysics* **2002**, *388*, 1124. [[CrossRef](#)]

⁹ Lee, J.-Y. Variable short-time Fourier transform for vibration signals with transients. *Journal of Vibration and Control* **2013**, *31*, 1. [[CrossRef](#)]

¹⁰ Baraniuk, R. G.; Jones, D. L. A signal-dependent time-frequency representation: Optimal kernel design. *IEEE Transactions on Signal Processing* **1993**, *41*, 1589. [[CrossRef](#)]

¹¹ Jones, D. L.; Baraniuk, R. G. An adaptive optimal-kernel time-frequency representation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, **1995**, *43*, 2361. [[CrossRef](#)]

¹² Gonçalves, P.; Baraniuk, R. G. Pseudo affine Wigner distributions: Definition and kernel formulation. *IEEE Transactions on Signal Processing* **1998**, *46*, 1505. [[CrossRef](#)]

¹³ Bertocci, U.; Huet, F.; Nogueira, R. P.; Rousseau, P. Drift removal procedures in the analysis of electrochemical noise corrosion. *Corrosion*, **2002**, *58*, 337. [[CrossRef](#)]

¹⁴ Tan, Y. J.; Bailey, S.; Kinsella, B. The monitoring of the formation and destruction of corrosion inhibitor films using electrochemical noise analysis (ENA). *Corrosion Science* **1996**, *38*, 1681. [[CrossRef](#)]

¹⁵ Homborg, A. M.; Tinga, T.; Zhang, X.; van Westing, E. P. M.; Oonincx, P. J.; de Wit, J. H. W.; Mol, J. M. C. Time-frequency methods for trend removal in electrochemical noise data. *Electrochimica Acta* **2012**, *70*, 199. [[CrossRef](#)]

¹⁶ Mumford, D.; Desolneux, A. *Pattern theory: The stochastic analysis of real-world signals*. A. K. Peters Ltd.: Natick, 2010.