

# ANÁLISE ESPECTRAL DE ONDALETAS APLICADAS À SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA PROVENIENTES DE DEFORMAÇÃO\*

Marcos Daniel Gouveia Filho<sup>1</sup>  
Lindberg Lima Gonçalves<sup>2</sup>  
Enio Pontes de Deus<sup>3</sup>

## Resumo

A análise das séries temporais no domínio da frequência é tradicionalmente feita estudando-se o espectro de potência obtido através da transformada de Fourier. O teorema de Fourier diz que se pode expressar uma função periódica como uma soma de uma constante e de uma série de termos de senos e co-senos, onde as frequências associadas com essas funções são múltiplos inteiros (harmônicos) da frequência fundamental. A análise de ondaletas é capaz de revelar aspectos de dados que faltam em outras técnicas de análise de sinal, aspectos como tendências, pontos de degradação, descontinuidades em derivadas mais altas, e de auto-similaridade. Além disso, porque proporciona uma visão diferente de dados do que aqueles apresentados por técnicas tradicionais, a análise de ondaletas muitas vezes pode comprimir ou retirar o ruído de um sinal sem degradação apreciável. Nesse contexto, os sinais de emissão acústica provenientes da deformação por tração uniaxial em amostras de polietileno foram analisados e caracterizados, resultando em clara distinção entre os sinais provenientes dos regimes de deformação elástica e plástica.

**Palavras-chave:** Emissão Acústica; Análise Espectral; Análise de Fourier; Análise de Ondaletas

## SPECTRAL WAVELETS APPLIED ANALYSIS IN THE SIGNS OF ACOUSTIC EMISSIONS FROM STRAIN

### Abstract

In the time series analysis in the frequency domain is traditionally done by studying the power spectrum obtained by Fourier transform. The Fourier theorem states that one can express a periodic function as a sum of a constant and a series of sines and cosines, where the frequencies associated with these functions are integer multiples (harmonics) of the fundamental frequency. The wavelet analysis can reveal aspects of missing data in other signal analysis techniques, aspects such as trends, breakdown points, discontinuities in higher derivatives, and self-similarity. In addition, it provides a different view of data than those presented by traditional techniques, wavelet analysis can often compress or remove the noise of a signal without appreciable degradation. In this context, acoustic emission signals from the uniaxial tensile deformation in polyethylene samples were analyzed and characterized, resulting in a clear distinction between the signals from the elastic and plastic deformation regimes.

**Keywords:** Acoustic emission; Spectral analysis; Fourier analysis; Wavelet analysis.

<sup>1</sup> *Doutorando, Mestre, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Mecânica da Fratura e Fadiga LAMEFF, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.*

<sup>2</sup> *Doutor, Professor, Depto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Laboratório de Mecânica da Fratura e Fadiga - LAMEFF, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.*

<sup>3</sup> *Doutor, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Centro de Ensaios Não Destrutivos - CENDE, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Allevato e Ramos, 1980, emissão acústica são ondas elásticas transientes geradas pela emissão rápida de energia por fontes localizadas no interior do material. Essas fontes podem ser de diversas origens como: reações químicas, fundição, aquecimento, resfriamento, corrosão, cavitação, descarga elétrica, vazamento de líquidos e gases, dentre outras. A aplicação de um carregamento em um componente ou a sua introdução em um meio agressivo podem produzir modificações internas no mesmo, como o crescimento de trincas, deformação plástica local, corrosão e mudanças de fase. Sua maior contribuição é proporcionar uma avaliação global do equipamento sob o enfoque da presença de descontinuidades comprometedoras da integridade estrutural do componente.

O teste de emissão acústica é um método passivo que monitora a redistribuição de tensões dentro de um material ou componente, o fenômeno que ocorre quando uma descontinuidade é submetida a uma solicitação térmica ou mecânica. Uma área portadora de defeitos é uma área de concentração de tensões, que uma vez estimulada, origina a liberação de ondas de tensão, na forma de energia, propagando-se pelo material em forma de ondas mecânicas transientes. A técnica consiste em captar esta perturbação no meio, através de transdutores piezoelétricos instalados de forma estacionária nas regiões de interesse. Estes receptores passivos transformam a energia mecânica em energia elétrica, sendo os sinais arquivados para análise.

Há evidências de que séries de sinais produzidos por vários sistemas físicos, biológicos e econômicos exibem flutuações auto-similares complexas, cobrindo amplos intervalos de escalas temporais e espaciais. Tais sinais podem ser caracterizados por correlações de longo alcance, que satisfazem leis de potência. Em função dos mecanismos não-lineares que controlam as interações subjacentes a esses sistemas complexos, os sinais são tipicamente não-estacionários, apresentando tendências intrínsecas e segmentos heterogêneos (ou seja, porções com diferentes propriedades estatísticas locais). Este é justamente o caso dos sinais (acústicos e magnéticos) produzidos pelos processos de deformação e evolução de defeitos em materiais.

Pretende-se estudar dois tipos de análise, uma no domínio do tempo-frequência, outra no domínio do tempo-escala: Análise de Fourier e Análise de Ondaletas, respectivamente. A primeira é bem conhecida e o conceito físico de frequência é o ponto fundamental. A análise de Fourier pode ser vista como o algoritmo a ser usado quando tratamos de processos estocásticos estacionários, pois essa análise é a ferramenta ideal para analisar dados obtidos de tais processos, aproximando-se a série temporal por uma combinação linear de harmônicos (componentes senoidais). Uma análise por meio de ondaletas é conduzida no domínio do tempo-escala, portanto apropriada para analisar processos não estacionários. Uma vez que há várias bases de ondaletas, não se tem somente uma análise de ondaletas (como no caso da análise de Fourier, em que se tem somente uma base ortogonal), mas várias análises ou algoritmos, uma para cada base escolhida.

O enfoque é o processamento de sinais, potencialmente mais atrativo para aplicação das ondaletas. Do ponto de vista algorítmico, há um só algoritmo – a análise de Fourier – quando tratamos de sinais estacionários, mas muitos algoritmos a considerar quando tratamos de sinais não estacionários, dentre os quais operam com ondaletas em tempo-escala e ondaletas em tempo-frequência (Morettin, 2014).

O fato básico sobre as ondaletas é que elas são localizadas no tempo (ou espaço), contrariamente ao que ocorre com as funções trigonométricas. Esse comportamento as torna ideais para analisar sinais não estacionários, contendo transitoriedades e estruturas tipo fractais. Bases de Fourier são localizadas em frequência, mas não no tempo: pequenas mudanças em algumas observações podem provocar mudanças em todos os componentes de uma expansão de Fourier, o que não acontece numa expansão em série de ondaletas (Morettin, 2014).

A ideia, tanto na análise de Fourier quanto na análise usando ondaletas (ou qualquer outra base), é aproximar a função por uma combinação linear de senos e cossenos ou ondaletas, respectivamente. Funções com descontinuidades e picos necessitarão menos ondaletas do que senos e cossenos para uma aproximação comparável.

Na análise de Fourier, toda função periódica, de período  $2\pi$ , de quadrado integrável, ou seja,  $L^2(\mathbf{0}, 2\pi)$ , é gerada por uma superposição de exponenciais complexas,  $w_n(x) = e^{inx}$ ,  $n = 0, \pm 1, \dots$ , obtidas por dilatações da função  $w(x) = e^{ix}$ :  $w_n(x) = w(nx)$ . O objetivo é estender essa ideia para  $L^2(\mathbb{R})$ , isto é, gerar esse espaço a partir de uma única função,  $\psi$ , digamos. Isso é conseguido por dilatações (ou compressões) e translações de  $\psi$  por

$$\psi_{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad b \in \mathbb{R}, a > 0. \quad (1)$$

A função  $\psi$  é chamada *ondaleta mãe* e usualmente tomamos valores especiais para  $a$  e  $b$ :  $a = 2^{-j}$ ,  $b = k2^{-j}$ ,  $j, k \in \mathbb{Z}$ .

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

Para a aferição das principais propriedades mecânicas foram realizados ensaios de tração em corpos de prova não injetados em molde (prática comum para confecção de corpos de prova de polímeros), mas sim, retirados diretamente de peças fabricadas com o material em questão para que não houvesse mudança de propriedades, pois estes são fabricados por rotomoldagem, processo que gera produtos plásticos com características diferentes daquelas apresentadas por produtos injetados.

O ensaio consiste basicamente no tracionamento até a ruptura, de um corpo de prova específico confeccionado a partir do material de interesse. Este é realizado de acordo com normas, que padronizam tanto a geometria quanto o procedimento de ensaio, no caso foi utilizada a norma ASTM D-638. A partir do ensaio de tração é possível determinar diversas propriedades da amostra como: tensão de escoamento, tensão de ruptura, alongamento, carga de ruptura e módulo de elasticidade. Devido à espessura do PV para retirada da amostra foi utilizada as especificações do corpo de prova tipo III. Os ensaios de tração foram realizados de maneira totalmente computadorizada, os corpos de prova foram ensaiados utilizando a máquina modelo EMIC, com velocidade de deslocamento de 5 mm/min, com célula de carga com capacidade máxima de até 100 kN.

## 2.2 EMISSÃO ACÚSTICA

Foi utilizado o sistema operacional SAMOS multichannel Acoustic Emission system, da Physical Acoustic Corporation, com sensores R15I DN 46, DN 47 e DN 49, respectivamente. Foi utilizada também graxa de vedação de silicone para acoplar a amostra ao sensor que fica em um suporte específico que é paramagnético. O filtro escolhido, capaz de eliminar ruídos, foi de 35dB, comprimento do hit de 1k (1024 pontos), uma taxa de amostragem de 1MSP/s (106 pontos/segundo) e pré-disparo de 256 $\mu$ s.

## 2.3 ANÁLISE DAS SÉRIES TEMPORAIS

Utilizou-se os softwares da Physical Acoustic Corporation (PAC), AEwin™ Wavelet™, para análise inicial dos sinais. Entretanto, para melhor extração das características do sinal foi realizada uma rotina no software Matlab™, versão 14.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Ensaio de Tração

Os resultados dos ensaios de tração são expressos, em valores, na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde “DP” significa desvio padrão. Baseado na norma ASTM D-638, todos ensaios foram considerados válidos. É observado que material não apresentou grande reprodutibilidade no ensaio de tração. Um motivo para o fato é a não uniformidade das amostras que foram confeccionadas a partir de um poço de visita rotomoldado e usinadas em torno CNC, porém sem alteração na espessura das amostras, que variavam em poucos milímetros.

**Tabela 1.** Resultado do ensaio de tração

Corpo de prova	Modulo de elasticidade (kgf/mm <sup>2</sup> )	Limite de escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)
1	3,731862	7,9	7,9
2	3,393445	10,7	10,7
3	4,327722	16,95	16,95
4	4,476753	16,8	16,8
5	3,389473	10,6	10,6
<b>Média</b>	3,863851	12,59	12,59
DP	0,419238	3,323201	3,323201

### 3.2 Emissão Acústica

Para melhor embasamento da discussão, faz-se necessário apresentar um gráfico no qual é plotado o número sinais de emissão acústica (ou hits) juntamente com a tensão, ambos em função do tempo (Figura 1).

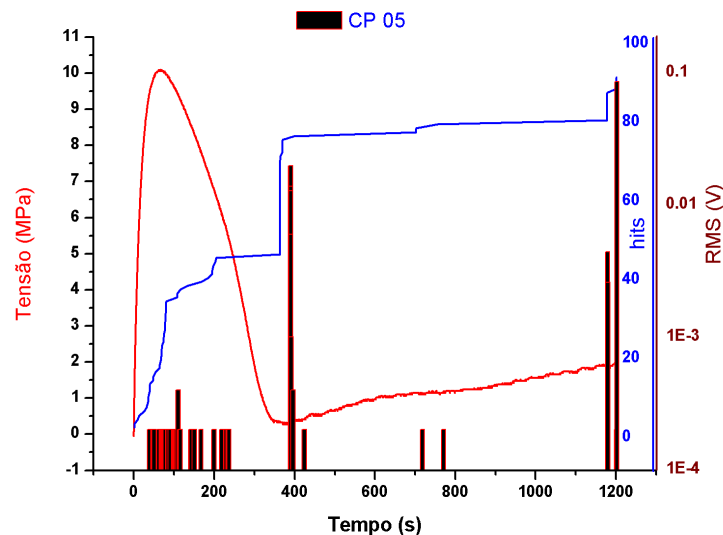


Figura 11 - Hits e Tensão em função do tempo, CP 05.

É observado um baixo número de hits ou baixa atividade acústica durante a fase de deformação elástica, ocorrendo mudança significativa na região de escoamento. A baixa atividade acústica na fase de deformação elástica pode ser explicada por analogia ao próprio regime de deformação em questão, conforme a carga é aplicada o material absorve energia em forma de tensão deformando-se elasticamente para balancear sua energia, como os sinais de emissão acústica são provenientes da liberação de energia, é compreensível a baixa atividade acústica do material durante o regime de deformação elástica, sendo os sinais captados atribuídos ao provável atrito entre as cadeias poliméricas amorfas durante processo de alinhamento, característico do regime de deformação elástica em polímeros semicristalinos. Na região de escoamento ocorre a transição dos regimes de deformação, onde as primeiras cadeias poliméricas amorfas atingem sua saturação de energia acumulada em forma de tensão e buscam uma alternativa para dissipar energia ou adquirir capacidade de absorver mais energia, esta alternativa é a deformação plástica. Esse rearranjo da estrutura libera energia e portanto pode-se constatar a alta da atividade acústica do material na região de escoamento. A atividade acústica decai, juntamente com a tensão, de acordo com o número de cadeias a serem deformadas, até o ponto em que a porção amorfa do material está completamente deformada plasticamente e então tem-se início à deformação da porção cristalina do material, acompanhada por novo pico de atividade acústica devido a deformação dos cristais. Além da atividade acústica os sinais provenientes de cada região, os sinais gerados também sofrem alterações, havendo comportamento similar de aumento da energia, duração, tempo de subida e RMS, por exemplo. A Figura 1 também ilustra a evolução do RMS durante o ensaio.

Primeiramente foi observado pelo software da PAC a melhor representação do sinal de cada região por uma ondaleta particular, no caso ondaletas de Daubechies grau seis e dezesseis (db6 e db16). No Matlab™ foi constatado a energia dos coeficientes e o erro referente a representação de cada nível em função da ondaleta, assim como a variação do erro de acordo com o nível de decomposição associado para sinais da região elástica e plástica. As tabelas a seguir expressam os resultados obtidos e as figuras ilustram graficamente os resultados, onde “Sinal 1” refere-se ao sinal proveniente da região elástica e “Sinal 2” refere-se ao sinal proveniente da região plástica. Observou-se que para sinais provenientes da região elástica os coeficientes de “detalhe” tinham magnitude relevante até o nível três,

enquanto que para os sinais provenientes da região plástica os coeficientes de “detalhe” tinham magnitude relevante até o nível quatro. Observou-se também que o nível de decomposição não interferia de forma significativa na magnitude dos coeficientes.

**Tabela 2.** Energia dos coeficientes de ondaleta do sinal da região elástica.

Sinal 1	Energia		
	J9 – db16	J5 – db16	J5 – db6
<b>Coeficiente</b>			
<b>Aproximação - J</b>	0,31178	0,026729	0,018717
<b>Detalhe - 1</b>	9,6289	9,6577	9,4273
<b>Detalhe - 2</b>	50,016	50,165	45,232
<b>Detalhe - 3</b>	39,622	39,741	44,389
<b>Detalhe - 4</b>	0,39313	0,39431	0,91149

**Tabela 3.** Erro associado ao sinal referente a região elástica.

Sinal 1	Energia		
	J9 – db16	J5 – db16	J5 – db6
<b>Níveis</b>			
<b>1º</b>	3,8236e-14	3,8235e-14	1,575e-13
<b>2º</b>	0,018809	0,018809	0,018578
<b>3º</b>	0,046811	0,046811	0,044735

**Tabela 4.** Energia dos coeficientes de ondaleta do sinal da região plástica.

Sinal 2	Energia		
	J9 – db16	J5 – db16	J5 – db6
<b>Coeficiente</b>			
<b>Aproximação - J</b>	0,0014024	0,0023917	0,0048634
<b>Detalhe - 1</b>	5,628	5,6282	5,1044
<b>Detalhe - 2</b>	13,714	13,714	15,275
<b>Detalhe - 3</b>	54,061	54,063	60,057
<b>Detalhe - 4</b>	26,584	26,585	19,531
<b>Detalhe - 5</b>	0,0074143	0,0074145	0,027344

**Tabela 5.** Erro associado ao sinal referente a região elástica.

Sinal 1	Energia		
	J9 – db16	J5 – db16	J5 – db6
<b>Níveis</b>			
<b>1º</b>	5,1995e-13	5,1996e-13	1,4909e-12
<b>2º</b>	0,11942	0,11942	0,11369
<b>3º</b>	0,22139	0,22139	0,22716
<b>4º</b>	0,43129	0,43129	0,4513

Após observar os resultados constatou-se que os sinais provenientes da região elástica são melhor representado pela ondaleta de Daubechies de grau seis e que os sinais provenientes da região plástica são melhor representado pela ondaleta de Daubechies de grau dezesseis. Como há maior interesse em caracterizar sinais provenientes da região plástica optou-se por utilizar cinco níveis de decomposição e a ondaleta de Daubechies de grau dezesseis (db16). Visto que o nível de decomposição não influenciou significativamente a magnitude dos coeficientes e nem os erros associados.

Dando continuidade aplicou-se a transformada de Fourier nos sinais para observar as frequências relevantes e poder compara-las as pseudo-frequências das ondaletas. Além disso, foi aplicada a transformada de Fourier para cada nível de

detalhamento afim de constatar quais informações e suas respectivas frequências eram extraídas do sinal em cada nível decomposição. Os resultados são apresentados nas figuras a seguir onde a cor azul indica o espectro de frequência do sinal e a cor vermelha o espectro de frequência dos “detalhes”.

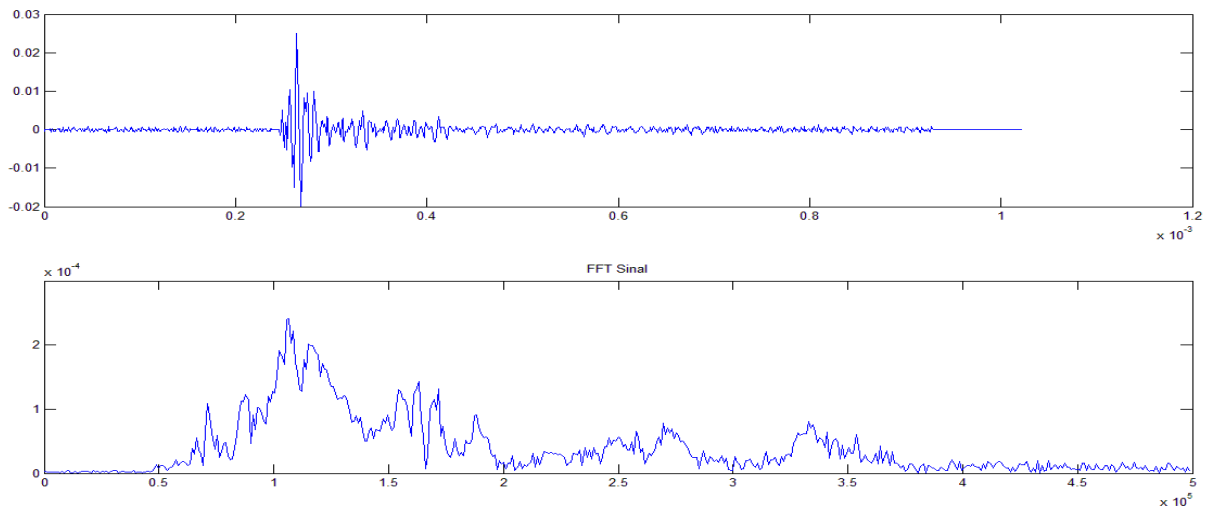


Figura 2 - Transformada de Fourier sinal da região elástica.

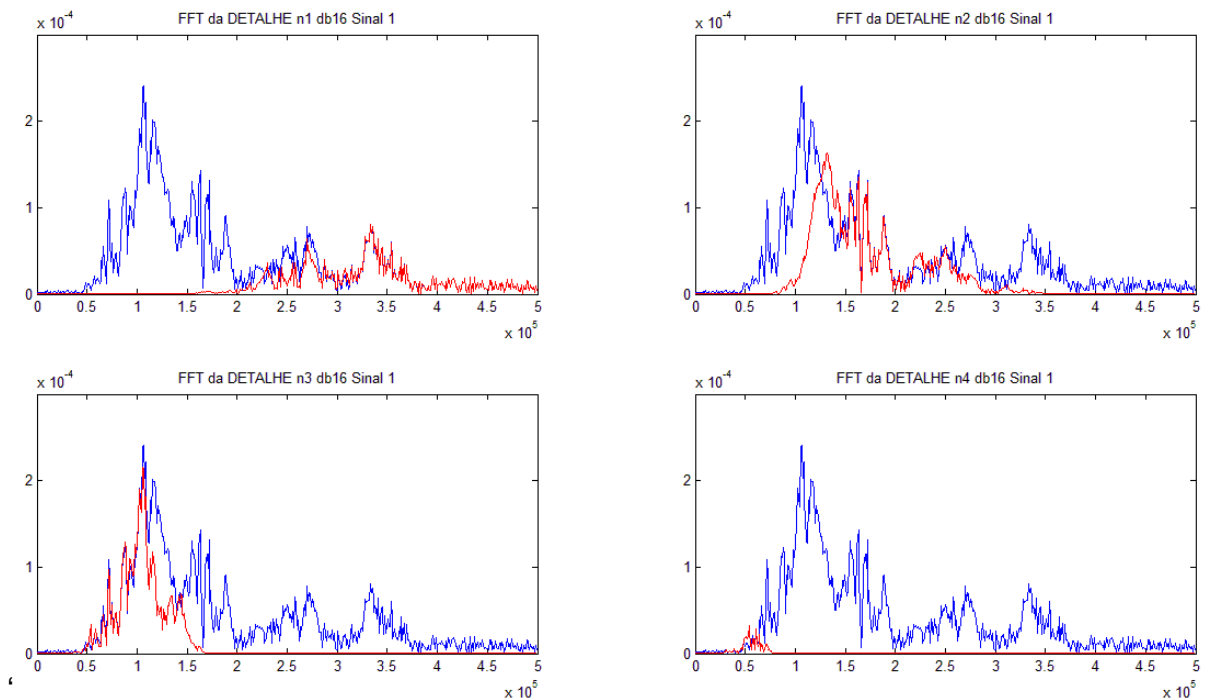
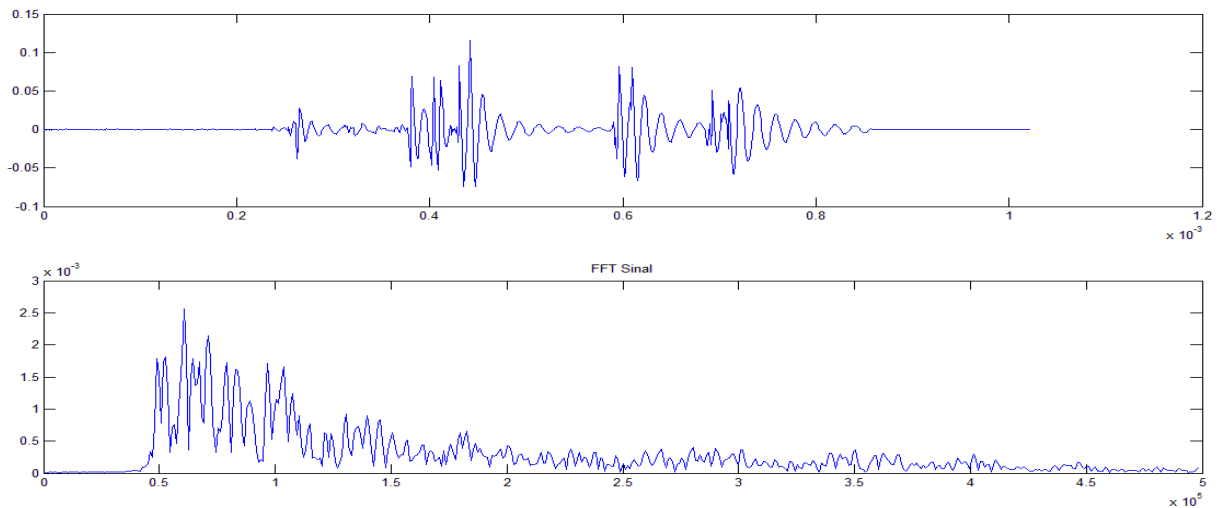
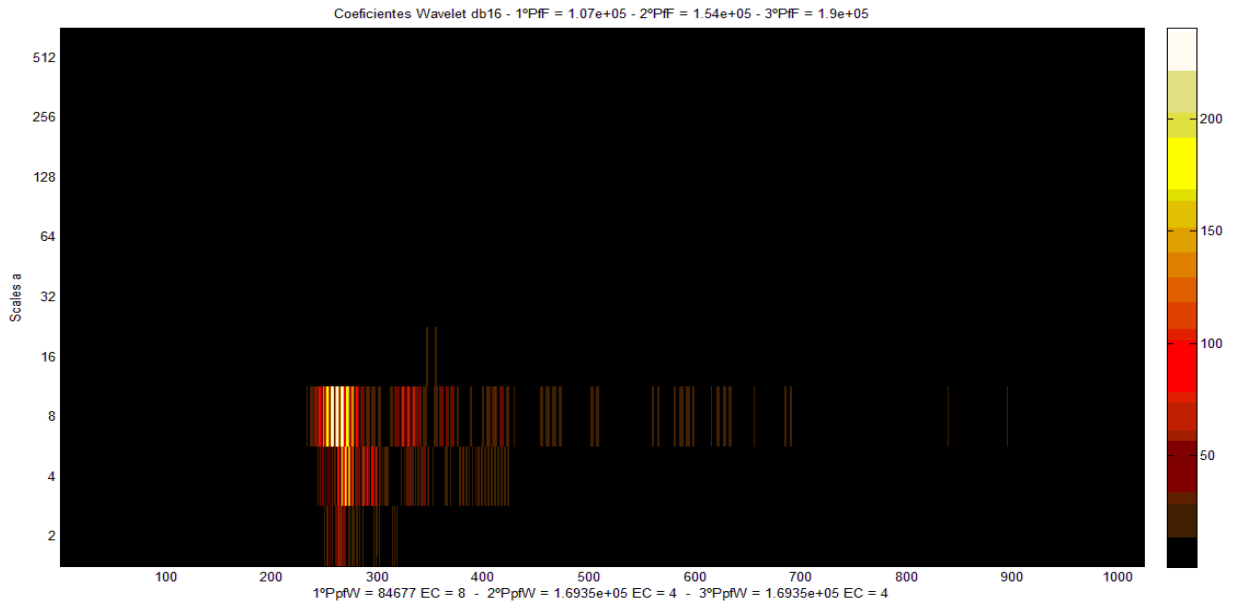
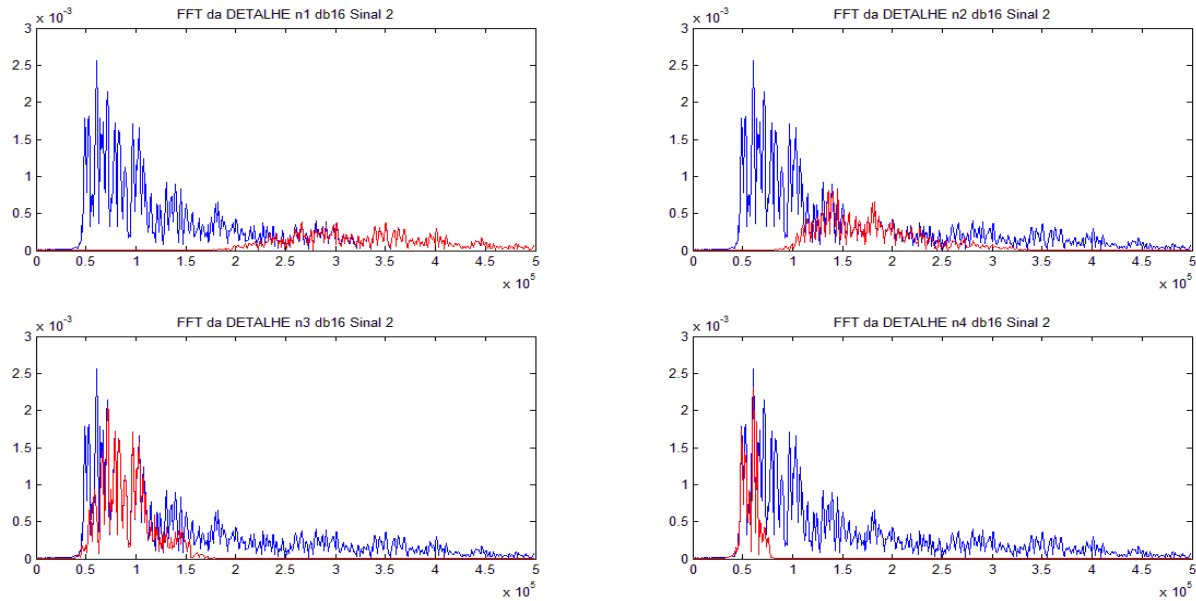


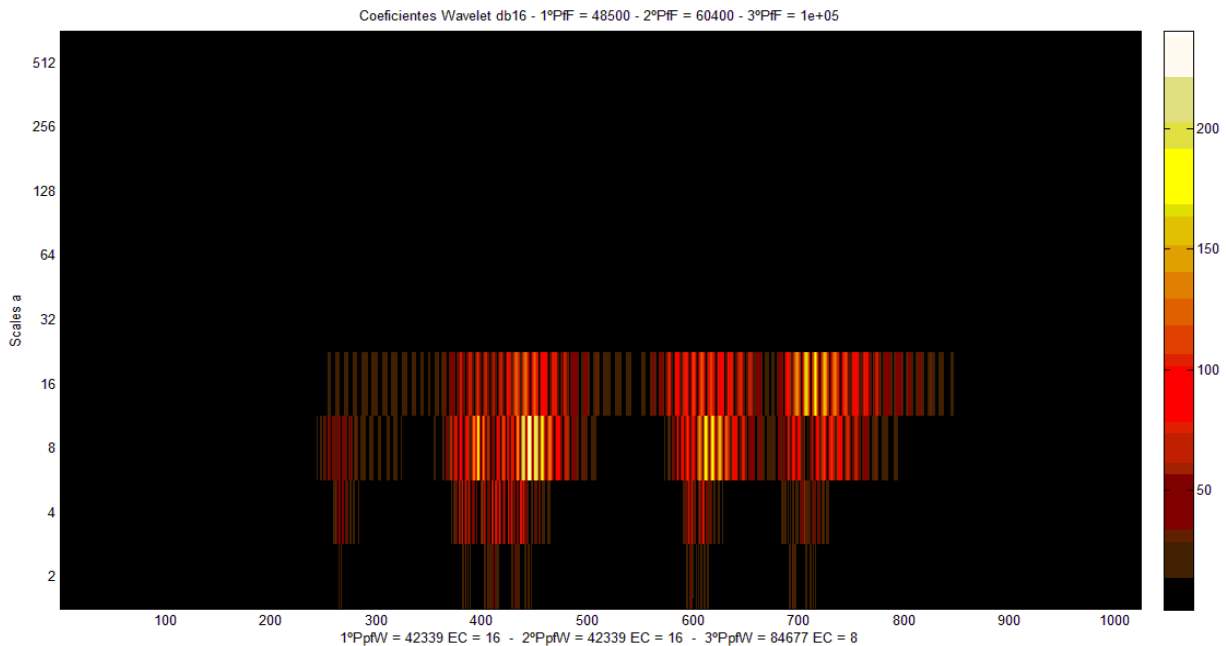
Figura 3 - Transformada de Fourier dos detalhes do sinal da região elástica.







**Figura 6-** Transformada de Fourier dos detalhes do sinal da região plástica.



**Figura 8 -** Espectrograma de ondaletas do sinal da região plástica em Hz..

É observado nos resultados, que para o sinal proveniente da região elástica, os picos de frequência estão localizados na escala corresponde (EC) oito e quatro, ou seja, níveis dois e três da decomposição. Para a região plástica os picos de frequência estão localizados na escala corresponde dezesseis e oito, logo, níveis três e quatro. Analisando as transformadas de Fourier dos “detalhes”, observa-se que as informações de frequência do sinal podem ser representadas de forma bastante concisas, considerando apenas dois níveis em cada situação, sendo: Níveis dois e três para sinais provenientes da região elástica e níveis três e quatro para sinais da região plástica.

## 4 CONCLUSÃO

Ao término deste estudo pode-se concluir que se deve ter muita atenção quanto aos parâmetros no processo de rotomoldagem, pois este ocasionou uma elevada porosidade no material, o que prejudica suas propriedades mecânicas que são de fundamental importância para aplicações estruturais

Quanto à caracterização dos sinais de emissão acústica provenientes da deformação do polietileno, pode-se observar diferenças claras de comportamento quando aplicamos a análise de ondaletas para tratamento do sinal. Caracterizando assim, os sinais provenientes do regime de deformação elástica as frequências dominantes entre 1 e 1,5 KHz, representadas pelos níveis de detalhamento 2 e 3 pela análise de ondaletas com 5 níveis de resolução, sendo ondaleta mãe a ondaleta de Deaubechies de grau 16 (db16). Para os sinais provenientes de deformação elástica as frequências dominantes apresentaram-se entre 0,5 e 1 KHz, representadas pelos níveis 3 e 4 de detalhamento pela análise de ondaletas com 5 níveis de resolução, sendo ondaleta mãe a ondaleta de Deaubechies de grau 16 (db16).

## BIBLIOGRAFIA

- 1 Allevalo, C. R. (1980). Aplicações da Técnica de Emissão Acústica em Ensaios de Corrosão. Rio de Janeiro: Petrobrás.
- 2 Morretin, P. M. (2014). Ondas e Ondaletas: Da análise de Fourier à análise de ondaletas de séries temporais. 2ª edição. Edusp. São Paulo.
- 3 Krautkrämer, J. K. (1977). Ultrasonic Testing of Materials. Estados Unidos da América: Springer-Verlag.
- 4 Miller, R. K. (1987). Nondestructive Testing Handbook - Volume Five, Acoust emission testing. Estados Unidos da América: American Society for Nondestructive Testing – ASNT.
- 5 Soares, S. D. (2011). Apostila - Emissão Acústica. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos - ABENDE.