

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS**

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE COMPÓSITOS ATRAVÉS
DA CARACTERIZAÇÃO FRACTAL DE SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA**

Eng. Francisco Estênio da Silva

ORIENTADOR: Professor Dr. Lindberg Lima Gonçalves

CO-ORIENTADOR: Professor Dr. José Maurício Oliveira Matos



Fortaleza-Ce
Novembro de 2002
UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE COMPÓSITOS ATRAVÉS
DA CARACTERIZAÇÃO FRACTAL DE SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais

Eng. Francisco Estênio da Silva

ORIENTADOR: Professor Dr. Lindberg Lima Gonçalves

CO-ORIENTADOR: Professor Dr. José Maurício Oliveira Matos

Fortaleza-Ce
Novembro de 2002

A meu pai, pelo incentivo e
apoio aos meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Lindberg Lima Gonçalves pela credibilidade e orientação reservados a mim no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor João Marcos Alcoforado Rebello pela sua disponibilidade e condições de trabalho oferecidos no início da pesquisa.

Ao Professor José Maurício Oliveira Matos pela indispensável co-orientação nos assuntos pertinentes à pesquisa.

Aos colegas do Curso de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará pela amizade e ajuda.

Aos colegas do CENPES/LABOEND/ABEND-RJ pela amizade e apoio no início deste trabalho.

À Débora Braga Barros Ferreira pelos dados de emissão acústica cedidos.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

RESUMO

Neste trabalho analisou-se a integridade mecânica do material compósito constituído por uma matriz polimérica, resina epoxi DER 331, e por fibra de vidro tipo 'E' como agente de reforço. Esta análise foi realizada utilizando-se o ensaio de emissão acústica, com o objetivo de correlacionar as formas de onda dos sinais com os mecanismos de falhas associados aos esforços de tração e flexão aplicados a espécimes fabricados com tal material. Na análise dos sinais como função do tempo foram utilizados os métodos de contagem de caixas, que fornece a dimensão fractal, e o do intervalo re-escalado de Hurst, sendo também utilizado o método espectral de Fourier para a análise no domínio da frequência. Mostrou-se que os expoentes calculados pelos métodos espectral de Fourier e re-escalado de Hurst estão correlacionados com a dimensão fractal obtida pelo método de contagem de caixa, e satisfazem as relações previstas pelas leis de escala. Os resultados mostraram também a existência de duas regiões de escala distintas, sendo uma caracterizada pela persistência do sinal e outra por um comportamento aleatório característica do ruído presente. As dimensões fractais obtidas apresentaram-se independentes da taxa de aquisição da forma da onda emitida indicando a propriedade de auto-similaridade dos sinais estudados, o que confirma a sua característica fractal. Finalmente, é conjecturado uma correlação entre o coeficiente de Hurst/dimensão fractal e as falhas mecânicas observadas.

ABSTRACT

In this work it is analysed the mechanical integrity of the composite material constituted of a polymeric matrix, epoxy resin DER 331, reinforced by glass fiber type E. This analysis has been done by using the acoustic emission testing with the aim to correlating the wave-form of the pulse with the flaw mechanisms associated to the tensile and bending loads applied to the samples. The analysis of the pulses as a function of time has been made by using box counting method, which provides the fractal dimension, and the rescaled Hurst analysis. The analysis in the frequency domain has been made by using the spectral Fourier method. It has been shown that the exponents obtained from the spectral Fourier method and the rescaled Hurst analysis are correlated to the box counting fractal dimension, and satisfy the known relations obtained from the scaling laws. The results have also shown the existence of two scaling regions, characterized by the persistence of the pulse and by a random behaviour, respectively. The fractal dimensions have also been shown to be independent of time acquisition of the emitted pulse, and this indication of self-similarity confirms its fractal characteristics. Finally, it is conjectured a correlation between the Hurst coefficient/fractal dimension and the mechanical flaws observed.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| INTRODUÇÃO | 1 |
| 1. TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA | 3 |
| 1.1 O FENÔMENO DA EMISSÃO ACÚSTICA | 3 |
| 1.2 SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA | 4 |
| 1.2.1 Sinais Abruptos | 4 |
| 1.2.2 Sinais Contínuos | 4 |
| 1.3 MECANISMOS DE FONTE DE EMISSÃO ACÚSTICA | 5 |
| 1.4 PROPAGAÇÃO DA ONDA DE EMISSÃO ACÚSTICA | 5 |
| 1.4.1 Velocidade e Modos de Onda | 6 |
| 1.4.2 Atenuação | 6 |
| 1.4.3 Caminhos Múltiplos e Reflexões | 7 |
| 1.4.4 Reverberação | 7 |
| 1.5 RELAÇÃO COM OUTRAS TÉCNICAS | 8 |
| 1.6 FAIXA DE APLICABILIDADE | 8 |
| 1.7 INSTRUMENTAÇÃO DE EMISSÃO ACÚSTICA | 9 |
| 1.8 CARACTERÍSTICA DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA | 11 |
| 1.9 CONFIGURAÇÃO DO TESTE DE EMISSÃO ACÚSTICA | 13 |
| 1.10 LOCALIZAÇÃO DOS EVENTOS DE EMISSÃO ACÚSTICA | 13 |
| 1.11 CARACTERIZAÇÃO DO SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA | 14 |
| 1.11.1 Parâmetros de Medida do Sinal | 14 |
| 1.11.2 Avaliação e Interpretação dos Sinais | 15 |
| 2. GEOMETRIA FRACTAL | 16 |
| 2.1 Fundamentos Teóricos | 16 |
| 2.1.1 Dimensão Fractal | 17 |
| 2.1.2 Método da Contagem de Caixas | 18 |
| 2.1.3 Curva de Fractalidade | 22 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.2 | SÉRIES TEMPORAIS E MÉTODOS DE ANÁLISES | 23 |
| 2.2.1 | Método do Intervalo Re-escalado de Hurst – Análise <i>R/S</i> | 24 |
| 2.2.2 | Método Espectral de Fourier | 28 |
| 3. | METODOLOGIA | 31 |
| 3.1 | MATERIAIS COMPÓSITOS E SUA INSPEÇÃO POR EMISSÃO ACÚSTICA | 31 |
| 3.2 | MATERIAL INSPECIONADO | 34 |
| 3.3 | CORPOS DE PROVA E ESPECIFICAÇÕES | 36 |
| 3.4 | ENSAIOS E EQUIPAMENTOS MECÂNICOS E DE EMISSÃO ACÚSTICA | 37 |
| 3.5 | EXECUÇÃO DO ENSAIO E AQUISIÇÃO DO SINAL | 38 |
| 3.6 | PROGRAMAS E SOFTWARES UTILIZADOS NAS ANÁLISES DOS SINAIS | 38 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 39 |
| 4.1 | RESULTADOS EXPERIMENTAIS | 39 |
| 4.2 | SINAIS ESTUDADOS | 41 |
| 4.3 | ANÁLISES DE CONTAGEM DE CAIXAS, <i>R/S</i> E ESPECTRAL DOS SINAIS ORIGINAIS | 50 |
| 4.4 | ANÁLISES DE CONTAGEM DE CAIXAS, <i>R/S</i> E ESPECTRAL DOS SINAIS PROCESSADOS | 65 |
| 4.5 | ANÁLISE DOS RESULTADOS | 79 |
| | CONCLUSÕES | 91 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 93 |
| | APÊNDICE | 96 |

INTRODUÇÃO

Emissão acústica (EA) é o termo técnico usado para o ruído emitido por materiais ou estruturas quando submetidos à tensão [Wood, 2000]. A técnica de EA é usualmente aplicada em *monitoramento de condição*, através do teste contínuo de uma estrutura ou componente enquanto em serviço, ao invés da prática mais comum de ensaio utilizada somente em intervalos regulares.

A verificação da degradação de equipamentos industriais requer altos custos de inspeção nos mesmos. Alguns ensaios não destrutivos apresentam-se confiáveis na análise dos defeitos, porém são lentos, de forma que interferem na disponibilidade dos equipamentos. Já outras técnicas são rápidas, mas de baixa confiabilidade. Essa inconsistência entre rapidez e sensibilidade do método de inspeção compromete a competitividade da empresa devido ao custo indireto elevado.

A EA é uma técnica poderosíssima que apresenta essas características supracitadas e, por conseguinte, possibilita uma avaliação global de todo o ente industrial, sem indisponibilizá-lo de serviço e principalmente avalia o comprometimento estrutural que eventuais discontinuidades impõem à condição de integridade.

Este trabalho faz parte de uma cooperação entre CENPES/UFRJ/UFC onde o objetivo principal é o de ampliar o domínio tecnológico em áreas ligadas à confiabilidade, otimização de processos e redução de custo. Dentro deste âmbito o presente estudo propõe-se a determinar parâmetros que avaliem a integridade mecânica de alguns compósitos através dos resultados de emissão acústica. Especificamente, apresenta-se um estudo que objetiva comprovar o comportamento fractal dos sinais de EA de forma que se possa relacioná-lo com os defeitos correspondentes a tais sinais.

A revisão bibliográfica do trabalho é apresentada nos dois primeiros capítulos. No primeiro; discute-se o estudo da técnica de emissão acústica assim como a sua aplicabilidade e no segundo, apresentam-se os conceitos da geometria fractal, dos registros fractais no tempo e das técnicas de obtenção da dimensão fractal utilizadas nos sinais.

O terceiro capítulo (metodologia) trata do estudo dos compósitos e especificamente do tipo utilizado nos ensaios. Descrevem-se os corpos de prova e suas

especificações, os ensaios e equipamentos utilizados e os programas computacionais usados nas análises dos sinais de EA. É importante ressaltar que os dados mencionados sobre o material compósito foram obtidos por Ferreira (2000) em sua tese de doutorado desenvolvida na COPPE/UFRJ.

No quarto capítulo (resultados e discussões), mostram-se os resultados dos ensaios mecânico e de emissão acústica, os gráficos da forma de onda dos sinais de EA estudados, as curvas referentes aos cálculos do expoente de Hurst – H [FEDER, 1988], da dimensão fractal de contagem de caixas – D [ADDISON, 1997] e do expoente de escala de potência – ϕ [DUTTA, 1995] e a discussão sobre a validade dos mesmos.

Finalmente, apresentam-se as conclusões pertinentes aos resultados e discussões apresentados ao longo do trabalho.

1. TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA

1.1. O FENÔMENO DA EMISSÃO ACÚSTICA

No início da década de sessenta, uma nova tecnologia de ensaio não destrutivo (END) foi criada quando se reconheceu que trincas em progresso e descontinuidades em vasos de pressão poderiam ser detectadas inspecionando seus sinais de emissão acústica (EA). Embora este termo seja mais largamente usado para aquele fenômeno, tem também sido chamado de *emissão de onda de tensão*, *ondas de tensão*, *microssismo*, *atividade microssísmica e barulho de rocha* [MILLER & MCINTIRE, 1987].

Emissão acústica é o fenômeno que ocorre quando uma descontinuidade é submetida à solitação térmica ou mecânica. Uma área portadora de defeitos é uma área de concentração de tensões que, uma vez estimulada, origina uma redistribuição de tensões localizadas. Este mecanismo ocorre com a liberação de ondas de tensões na forma de ondas mecânicas transientes. A técnica consiste em captar esta perturbação no meio, através de transdutores piezelétricos instalados de forma estacionária sobre a estrutura. Estes receptores passivos, estimulados pelas ondas transientes, transformam a energia mecânica em elétrica, sendo os sinais digitalizados e arquivados para análise através de parâmetros representativos – ver **figura 1.1**. O ensaio é global, e pode ser realizado nas condições de serviço através de um incremento entre 5% a 10% acima da máxima condição de operação, ou durante provas de carga, como, por exemplo, testes hidrostáticos. O objetivo é o de avaliar a condição de integridade, localizando e classificando as áreas ativas quanto ao grau de comprometimento que eventuais descontinuidades impõem à integridade estrutural. Áreas ativas classificadas como severas deverão ser examinadas localmente por técnicas de ensaios não destrutivos, como por exemplo, ultra-som e partículas magnéticas, para caracterização da morfologia e dimensionamento dos defeitos presentes. A maior contribuição da técnica é a de analisar o comportamento dinâmico das descontinuidades, recurso este único dentro do elenco dos métodos de END [PHYSICAL ACOUSTICS SOUTH AMERICA, 2001].

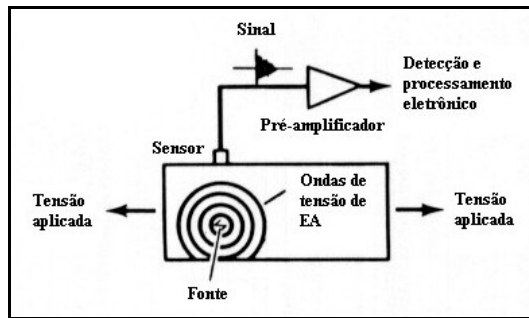


Figura 1.1. Princípio básico do método de EA.

[Fonte: POLLOCK, 1992]

1.2. SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA

Os sinais de EA são geralmente classificados em sinais abruptos e sinais contínuos – ver **figura 1.2**:

1.2.1 Sinais Abruptos

Os sinais abruptos possuem uma natureza transiente: rápida ascensão da amplitude seguida de um decaimento mais lento da mesma. Estes sinais têm um tempo de ocorrência bem definido e apresentam maiores amplitudes do que os sinais contínuos. Esses sinais associam-se aos grandes deslocamentos de grupos de discordâncias, microfissuras, quebra de inclusões e outros mecanismos que envolvem taxas de deformações [CAMERINI, 1990], e são comumente separados dos contínuos com o uso de um limiar de referência.

Estes sinais variam largamente em forma, dimensão e taxa de ocorrência, dependendo da estrutura e das condições de teste. Se existir uma alta taxa de ocorrência, os sinais abruptos individuais combinam-se para formarem uma emissão contínua.

1.2.2. Sinais Contínuos

Os sinais contínuos são originados nos deslocamentos de discordâncias e deslizamentos que ocorrem no material e caracterizam-se por apresentarem um longo tempo de atividade, características que, muitas vezes, leva a considerá-los como ruídos mecânicos externos à peça [VAHAVIOLOS apud CAMERINI, 1990].

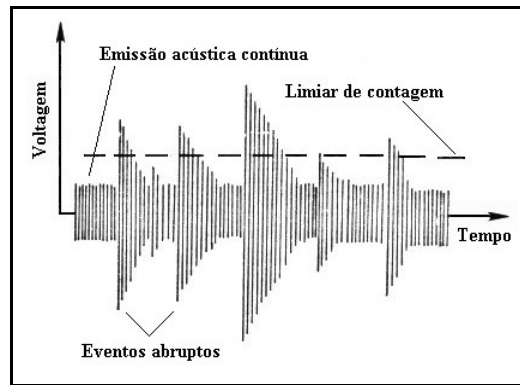


Figura 1.2. Nomenclatura do sinal de EA.

[Fonte: MILLER & MCINTIRE, 1987]

1.3. MECANISMOS DE FONTE DE EMISSÃO ACÚSTICA

As fontes de EA incluem muitos mecanismos de deformação e fratura. Terremotos e extrusão em minas são as maiores fontes de EA de ocorrência natural. Fontes que são identificadas em metais incluem crescimento de trinca, discordâncias, maclação, deslizamento de contorno de grão e fratura e desaderência de inclusões.

Os mecanismos específicos que produzem eventos de EA nos materiais compósitos são: trincas e ruptura em fibras; saca-fibras; descolamento interfacial (fibra-matriz); deformação plástica da fibra; deformação plástica da matriz; trincas e ruptura na matriz e delaminação. Estes mecanismos são a resposta clássica destes materiais quando submetidos a esforços [FERREIRA, 2000].

Outros mecanismos caem dentro da definição e são detectáveis com equipamento de EA. Estes incluem vazamentos e cavitação; fricção; o realinhamento ou crescimento de domínios magnéticos; liquefação e solidificação; e transformações de fase sólido-sólido. Algumas vezes estas fontes são chamadas de *fontes secundárias* ou *pseudofontes*, para distingui-las daquelas de EA clássica, devido à deformação mecânica e a materiais tencionados [MILLER & MCINTIRE, 1987].

1.4. PROPAGAÇÃO DA ONDA DE EMISSÃO ACÚSTICA

A forma de onda da EA na fonte é geralmente um pulso simples ou passo de banda larga. Mas o sinal detectado é muito mais complexo em forma, sendo largamente formado pelos efeitos de propagação da onda entre a fonte e o sensor (ver **figura 1.3**).

Os aspectos importantes de propagação de onda para propósitos de EA são modos de onda, velocidade de onda, atenuação, reflexões e caminhos múltiplos e reverberação.

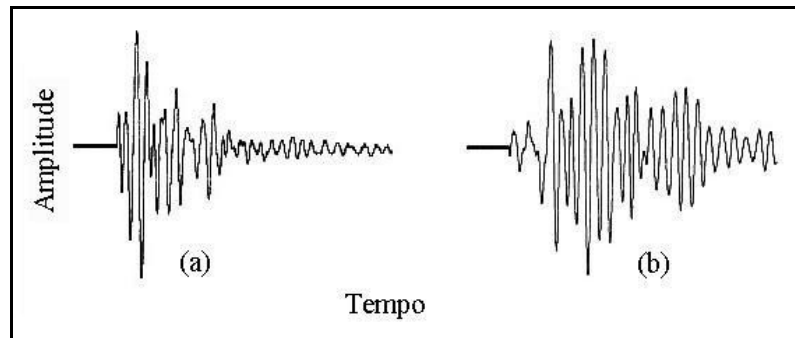


Figura 1.3. (a) forma de EA simples. (b) forma de EA modificada.

[Fonte: WOOD & HARRIS, 2000]

1.4.1. Velocidade e Modos de Onda

A velocidade de onda é particularmente importante para a localização de fonte, porque os algoritmos utilizados para tal usam-na em seus cálculos. Existem diferentes modos de onda (ondas longitudinais ou de compressão, transversais, superficiais ou de Rayleigh e ondas de Lamb) que viajam em diferentes velocidades. Estas velocidades de onda dependem do material e algumas delas da espessura também.

1.4.2. Atenuação

Quando uma onda viaja, sua amplitude de pico diminui. Isto significa que será mais difícil detectar fontes mais afastadas do sensor. As causas mais importantes de atenuação são (a) difusão geométrica da frente de onda, (b) absorção e amortecimento no meio de propagação e (c) fuga de energia da onda dentro de meios adjacentes tal como fluidos armazenados.

No tocante à difusão da frente de onda, a amplitude cai inversamente com a distância em meios tridimensionais tais como blocos de concreto ou minas de ouro, ou inversamente com a raiz quadrada da distância em meios bidimensionais tais como placas/chapas de aço ou cascos de vasos de pressão. Este efeito é dominante perto da fonte.

Com respeito à absorção ou ao amortecimento no meio de propagação, a amplitude cai exponencialmente com a distância. Este efeito é dominante longe da

fonte. A taxa de declínio (decibéis por metro) é uma propriedade do material e também depende da frequência.

A atenuação, devido à combinação de fatores geométricos e de material, governa a habilidade para detectar uma fonte de EA à distância. Materiais compósitos têm amortecimento muito maior do que metais, assim a faixa de detecção de um sensor é muito menor. As medidas de atenuação são rotineiramente feitas como um exame preliminar ao teste de EA, para avaliar ou validar o plano de acoplamento do sensor ou frequência de operação.

A atenuação aplica-se não somente ao sinal de EA que se pretende detectar, mas também ao ruído de fundo acústico que se tenta evitar.

1.4.3. Caminhos Múltiplos e Reflexões

Ondas são refletidas em discontinuidades estruturais e contornos. A quantidade de energia refletida depende da geometria e da má combinação do material nas fronteiras refletoras. Se os materiais são bem combinados e a discontinuidade geométrica é pequena, não existirá muita reflexão.

Existem usualmente muitos caminhos de onda conectando fonte e sensor, como ilustrado na **figura 1.4**. Uma boa maneira de entender a natureza complexa do sinal de EA recebido no sensor é considerar a onda composta de sucessivas chegadas via estes caminhos. Assim a forma final do sinal é composta pela ressonância do sensor ao longo dos múltiplos caminhos e reflexões dentro da estrutura.

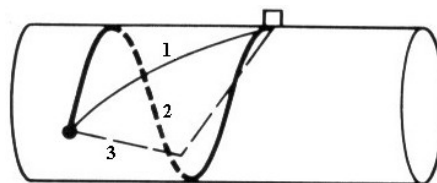


Figura 1.4. Caminhos possíveis que conectam fonte e sensor.

[Fonte: PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, 1992]

1.4.4. Reverberação

Um pequeno corpo de prova levemente amortecido age semelhante a uma campainha: a onda espalha-se, reflete longe da superfície e percorre dentro da peça de teste até que toda a estrutura esteja ressoando ou reverberando com energia acústica.

Então, a energia vagarosamente escapa através das redes do espécime ou é absorvido no mesmo e a reverberação cessa. Esta é a razão para a rápida ascensão e aparência vagarosa de decaimento do sinal de EA do tipo abrupto no osciloscópio. Os parâmetros de EA medidos são fortemente afetados pela natureza reverberante do processo e do amortecimento no material. Em metais, os sinais freqüentemente têm durações de vários milisegundos enquanto que em compósitos, eles usualmente têm durações de somente uma fração de um milisegundo.

1.5. RELAÇÃO COM OUTRAS TÉCNICAS

A EA difere da maioria dos outros métodos de END em dois aspectos principais. Primeiro, o sinal tem sua origem no próprio material e não em uma fonte externa. Segundo, a técnica detecta movimento, enquanto a maioria dos outros métodos detecta descontinuidades geométricas existentes [POLLOCK, 1992].

| EA versus técnicas de END | |
|---|---|
| Emissão Acústica | Outros Métodos |
| Detecta movimento de defeitos | Detecta forma geométrica de defeitos |
| Requer tensão | Não requer tensão |
| Mais sensível ao material | Menos sensível ao material |
| Menos sensível à geometria | Mais sensível à geometria |
| Menos intrusivo em planta/processo | Mais intrusivo em planta/processo |
| Requer acesso somente em sensores | Requer acesso a toda área de inspeção |
| Testa a estrutura toda de uma vez | Varre regiões locais em seqüência |
| Repetitividade não imediata | Repetitividade imediata |
| Principal problema: barulho relacionado | Principal problema: geometria relacionada |

1.6. FAIXA DE APLICABILIDADE

Algumas aplicações típicas do princípio de EA em materiais de teste sem exercer tensão adicional (teste não destrutivo) são como seguem [PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, 1992]:

• **Comportamento de materiais metálicos, cerâmicas, compósitos etc:**

- propagação de trinca,
- escoamento,
- Fadiga,

- Corrosão,
- Corrosão sob tensão,
- Fluência e
- Fratura de fibra e delaminação.

• **Testes Não-destrutivos durante Processos de Fabricação:**

- Processamento de material,
- Transformação de fase em metais e ligas,
- Detecção de defeitos tais como poros, inclusões, trincas de têmpera,
- Processos de deformação – laminação, forjamento, extrusão e
- Soldagem e brazagem – defeitos (inclusões, trincas, falta de penetração) sob gradientes térmicos fortemente emitidos durante períodos de resfriamento de soldagem.

• **Estruturas de Inspeção:**

- Inspeção contínua (estruturas metálicas, minas, etc.),
- Ensaio periódico (vasos de pressão, dutos, pontes, cabos),
- Detecção de parte solta e
- Detecção de vazamento.

• **Aplicações Especiais:**

- Químico e petroquímico: tanques de armazenamento, vasos de reatores, plataformas costeiras, dutos de perfuração, dutos, válvulas, hidrotratadores.
- Utilidades elétricas: vasos de reatores nucleares, tubulações, geradores de vapor, isolantes cerâmicos, transformadores, instrumentos aéreos.
- Aviões e naves espaciais: trincas de fadiga, corrosão, estruturas de compósito etc.
- Eletrônica: partículas soltas em componentes eletrônicos, ligação elétrica e trincas de substrato.

1.7. INSTRUMENTAÇÃO DE EMISSÃO ACÚSTICA

A instrumentação de uma inspeção de EA provê a necessária detecção de emissões contínuas ou abruptas detectáveis. Tipicamente, a instrumentação de EA deve preencher vários outros requerimentos:

1. Prover alguma medida da quantidade total de emissão detectada para correlação com tempo e/ou carga e para avaliação da condição do corpo de prova.

2. Abastecer alguma informação estatística sobre os sinais de EA para diagnósticos mais detalhados do mecanismo de fonte ou para avaliar o significado dos sinais detectados.
3. Localizar a fonte das emissões abruptas detectáveis comparando os tempos de chegada das ondas em sensores diferentes.
4. Diferenciar os sinais de interesse daqueles das fontes de ruídos de fundo.

O equipamento de EA é composto pelos componentes básicos como sensores, pré-amplificador, filtro, amplificador e acessórios tais como osciloscópios, registradores transientes, discos de armazenagem etc.

Os sensores captam o sinal de EA, fazem a conversão eletro-mecânica e pré-amplificação e o transmite para o instrumento principal onde é mais ampliado e filtrado. Em seguida o sinal é detectado por um circuito comparador (discriminador) que gera por sua vez um pulso digital sempre que o mesmo excede uma voltagem fixada. A atividade de EA é quantificada no contador através dos **hit's** (sinais que ultrapassam o limiar de referência) e registrados. Os parâmetros envolvidos, como, por exemplo, taxas de contagem, podem ainda ser desenhados em gravador. Na análise e processamento dos sinais armazenados são necessários um microcomputador com software específico para tais funções – ver **figura 1.5**.

Os sinais estudados neste trabalho foram obtidos por um equipamento conforme explicado. Nas pesquisas subseqüentes, será usado um equipamento ultramoderno do laboratório de END da Universidade Federal do Ceará. Este moderno aparelho é simplesmente um microcomputador com uma placa de aquisição de sinais (PCI – DSP4) com quatro canais e conexões para os sensores e um software para a análise dos sinais (DiSP). A placa e o software foram adquiridos da PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION (PAC).

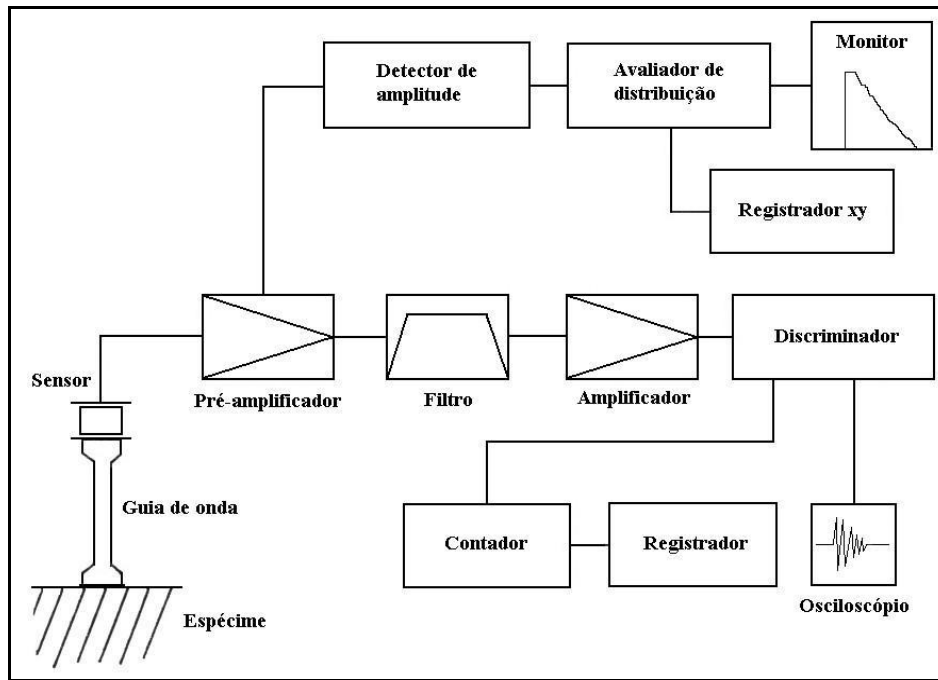


Figura 1.5. Sistema de medição de EA.

[Fonte: MILLER & MCINTIRE, 1987]

1.8. CARACTERÍSTICA DA TÉCNICA DE EMISSÃO ACÚSTICA

O teste de EA é um método passivo que monitora a redistribuição de tensões dentro de um material ou componente. Entretanto, a inspeção de EA é somente efetiva enquanto o material ou estrutura é submetido a uma tensão introduzida. Exemplos destas tensões inclui ensaios de pressão de vasos ou dutos e carregamento de tensão ou de dobramento de componentes estruturais.

Uma característica importante que afeta as aplicações de EA é geralmente a resposta irreversível da maioria dos metais. Na prática, nota-se, freqüentemente, que uma vez aplicada uma dada carga, a EA não ocorrerá até que o nível dessa tensão seja excedido, mesmo se a carga seja completamente removida e então reaplicada. Este comportamento é chamado de Efeito Kaiser em honra ao pesquisador que primeiro o reportou.

O grau para o qual o Efeito Kaiser está presente varia entre metais e pode mesmo assim desaparecer completamente depois de várias horas (ou dias) para ligas que exibem características apreciáveis de recozimento (recuperação) em temperatura ambiente.

Algumas ligas e materiais podem não exibir qualquer efeito Kaiser mensurável de nenhuma maneira [MILLER & MCINTIRE, 1987].

Pelo fato da EA ser produzida por deformação do material induzida por tensão, é altamente dependente da história da estrutura. Alguns materiais respondem quase instantaneamente à tensão aplicada, emitindo e rapidamente se estabilizando. Outros materiais levam algum tempo para se acomodar depois que uma carga é aplicada. Em outros casos, uma carga constante pode produzir dano progressivo, e a estrutura nunca se estabilizará.

Na **figura 1.6** a emissão é observado sobre o carregamento inicial de A a B, mas não sobre o descarregamento de B a C. Repetindo-se a carga, não existirá emissão até que B seja alcançado novamente; isto é o efeito Kaiser. A carga é aumentada para D, com mais emissão, e um outro ciclo de descarregamento é aplicado. Desta vez, devido a níveis de tensões maiores, defeitos significantes começam a emitir no ponto F, abaixo da carga máxima prévia. Este comportamento é conhecido como o efeito Felicity. A figura também mostra o aspecto da emissão continuando durante um período de carga mantida (G a H) [POLLOCK, 1992].

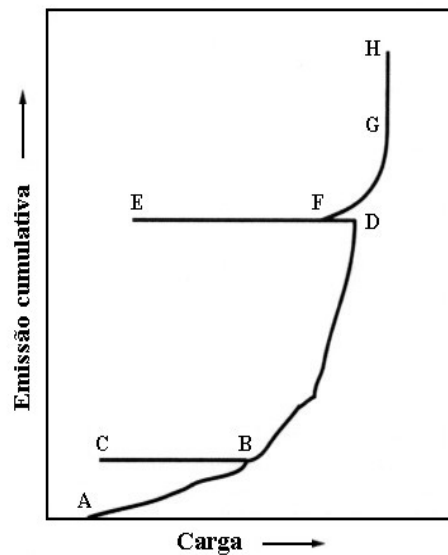


Figura 1.6. Efeitos Kaiser e Felicity.

1.9. CONFIGURAÇÃO DO TESTE DE EMISSÃO ACÚSTICA

Um típico sistema moderno e computadorizado que tem um número de canais, mede os sinais de EA em cada canal e registra os dados no disco enquanto gera curvas correspondentes para o operador. Os dados podem ser reproduzidos do disco depois do teste, gerando mais imagens para uma análise mais detalhada. Mas o primeiro passo é assegurar que bons dados sejam obtidos. Pelo fato do ensaio não ser repetível, o arranjo do equipamento para a aquisição de dados é muito importante. O operador deve escolher o número e a configuração de montagem dos sensores; verificar a cobertura adequada da estrutura; seleccionar e conectar sinais externos para a medição de carga e “gating” (portão monitor de evento) e decidir qual o ajuste de sensibilidade do teste, bem como o arranjo para algumas constantes de tempo do equipamento que afetam o processo de medição.

1.10. LOCALIZAÇÃO DOS EVENTOS DE EMISSÃO ACÚSTICA

Muitos testes são realizados com apenas um sensor, mas apenas quando espécimes pequenos são usados. As razões para se usar vários sensores são:

- Se uma estrutura é muito grande, um simples sensor não terá sensibilidade adequada para detectar fontes remotas, devido à atenuação.
- A localização de defeito é um objetivo em muitos testes estruturais e isto requer vários sensores.
- Se várias fontes são ativas sobre a mesma estrutura, um sensor simples pode causar resultados confusos. A localização da fonte é uma principal ferramenta para separar os dados.
- As técnicas de guarda que usam vários sensores podem ser valiosas para eliminar ruído.

Duas formas de localização de fonte de EA contínua são comumente praticadas:

- Método da localização por zona: o sistema considera somente a seqüência de chegada, atribuindo o evento a uma região espacial (zona) dependendo de quais sensores foram acionados seqüencialmente. A vantagem da localização por zona é que se um evento é detectado por um sensor somente, alguma informação é obtida.

- Método da medida de amplitude do sinal: determina-se a diferença entre o rendimento dos dois sensores que enquadram a fonte de EA e compara-se com as características de atenuação do componente.

Já as formas de localização de fontes de EA discretas são:

- Método linear: É usado principalmente em tubulações, oleodutos e em espécimes longas e delgadas de laboratório. Neste caso a fonte encontra-se ao longo de uma linha reta entre dois sensores e a distância entre o sensor mais próximo e a fonte é dada pela fórmula $y = (x - \Delta T \cdot v) / 2$, onde 'x' é a distância entre os sensores, ΔT a diferença no tempo de chegada do sinal nos sensores e 'v' a velocidade do som no material.
- Método planar e espacial: necessita-se, no mínimo, de três e de quatro sensores para localizar fontes no plano e no espaço, respectivamente. O princípio é o mesmo daquele utilizado na localização linear: medida de tempos de chegada em diversos sensores.

1.11. CARACTERIZAÇÃO DO SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA

O propósito da caracterização é usar a forma de onda final do sensor para identificar as fontes e avaliar seus significados. Existe assim um aspecto qualitativo (identificação da fonte) e um quantitativo (severidade ou intensidade da fonte) para caracterização.

1.11.1. Parâmetros de Medida do Sinal

Os cinco parâmetros mais usados para descrever a EA do tipo abrupta são contagem, amplitude, duração, tempo de subida e contagem de energia – ver **figura 1.7**.

- Contagem: é o número de vezes que o sinal de EA atravessa o limiar de referência.
- Amplitude: é a voltagem mais alta atingida por uma forma de onda de EA.
- Duração: é tempo do primeiro ao último “hit”.
- Tempo de subida: é o tempo do primeiro “hit” ao pico do sinal.
- Contagem de energia: é a área medida sob o envelope de sinal retificado.
- Forma de onda (ver item 1.4).

Este último parâmetro, forma de onda, é uma das mais importantes características do sinal e será objeto de estudo do presente trabalho.

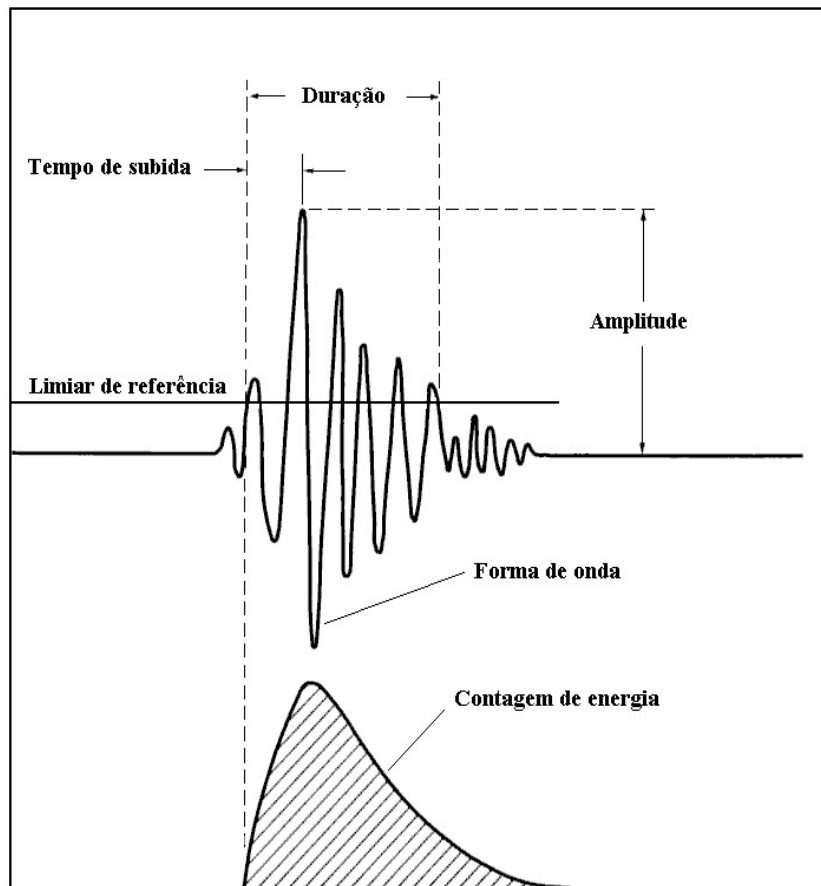


Figura 1.7. Parâmetros de sinal de EA abrupto.

[Fonte: POLLOCK, 1992]

1.11.2. Avaliação e Interpretação dos Sinais

Um sinal detectado é uma resposta ao estímulo de carga. A interpretação do mesmo refere-se à separação da EA relevante do ruído e avaliação diz respeito à determinação do significado dessa EA.

Num simples teste, a interpretação e a avaliação são em tempo real e o resultado é avaliado imediatamente no final do carregamento. Outras vezes, a análise pós-teste pode ser necessária. Eis alguns procedimentos de análise desse tipo: (a) reproduzir os dados para gerar imagens adicionais, (b) filtrar os dados para eliminar ruído ou isolar dados de uma fonte particular baseado no tempo, carga, localização ou características do sinal. (c) exame completo da listagem de dados.

2. GEOMETRIA FRACTAL

2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Em anos recentes, verificou-se um notável crescimento da aplicação da geometria fractal em várias áreas do conhecimento da ciência e engenharia. A geometria fractal está interessada com as propriedades de rugosidade dos objetos, comumente chamados de fractais. A palavra “fractal” foi inventada por Benoit Mandelbrot [ADDISON, 1997], que percebeu a impossibilidade de descrever a natureza usando a geometria Euclidiana; isto é, em termos de linhas retas, círculos, cubos etc. Ele propôs que fractais e geometria fractal poderiam ser usados para descrever objetos reais, tais como árvores, raios, sinuosidades de rios, litorais, contornos de nuvens, encostas, trincas etc.

Um fractal pode ser definido simplesmente como um objeto que se mostra auto-similar sob graus diversificados de ampliação e possuindo, de fato, simetria através da escala utilizada, com cada parte pequena do objeto replicando a estrutura total; e com sua própria *dimensão fractal*. Esta dimensão é usualmente (mas não sempre) um valor não inteiro, maior do que sua dimensão topológica e menor do que sua dimensão Euclidiana.

Os fractais com estruturas que compreendem cópias exatas deles mesmos em todas as ampliações, ou seja, que possuem uma auto-similaridade exata são chamados de fractais regulares, por exemplo, Curva de Koch – **figura 2.1a**. Já aqueles que contêm um elemento estatístico ou randômico, ou seja, cada parte pequena tendo as mesmas propriedades estatísticas como o todo, são chamados de fractais randômicos – **figura 2.1b**. Estes, portanto, não são exatamente auto-similares e sim estatisticamente auto-similares. Um conjunto específico de fractais randômicos conhecidos como *movimentos Brownianos fracionários*, têm sido úteis na descrição e modelagem de muitos fenômenos naturais, incluindo difusão não Fickiana, topografias panorâmicas, seqüências de DNA, colônias de bactérias, deposição eletroquímica e indicadores de mercados de ações.

O movimento Browniano regular ou simplesmente movimento Browniano também conhecido como ruído de Brown (manifestação macroscópica do movimento

molecular de um líquido através de partículas suspensas no mesmo) é de fato um membro especial de uma família maior conhecida como movimentos Brownianos fracionários (fBms), uma generalização do movimento Browniano sugerido por Mandelbrot [ADDISON, 1997].

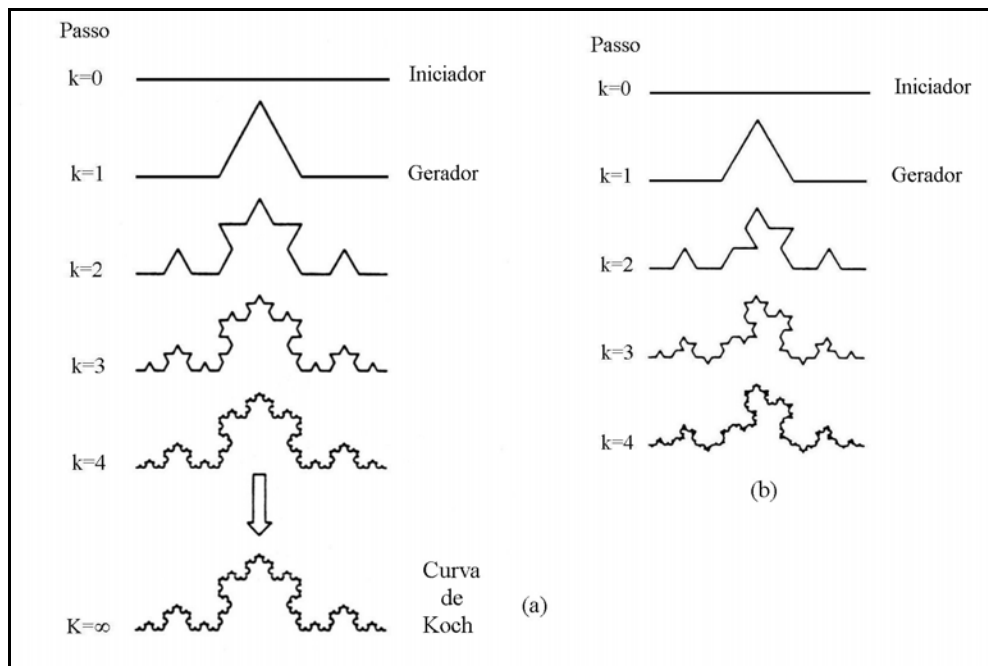


Figura 2.1. Curvas triáticas de Koch: (a) construção regular. (b) construção randômica.

[Fonte: ADDISON, 1997]

2.1.1. Dimensão Fractal

A partir do estudo de curvas e objetos irregulares e com descontinuidades, levantou-se uma questão relevante: a do conceito de dimensão. Por exemplo, como definir a dimensão do “objeto” obtido ao se amassar uma folha de papel qualquer? Será este um objeto ainda bidimensional, como a folha de papel original, ou tridimensional como parece ser visualmente? O conceito cartesiano, dado como “o número mínimo de coordenadas necessárias à descrição analítica de um conjunto”, não é suficiente para a caracterização do grau de aspereza, da fragmentação, da porosidade ou das irregularidades de um objeto.

Geralmente, todos os objetos estudados em matemática ou física são contínuos, lineares e homogêneos, mas a natureza nos mostra que isso não ocorre sempre. Os objetos naturais são geralmente rugosos e descontínuos. Como mostrado na figura 2.1, a

curva triática de Von Koch é um típico objeto fractal que não pode ser descrito com geometria Euclidiana. Primeiramente, quando o número de iterações tende a ser infinito, o comprimento total aumenta indefinidamente, enquanto a superfície é finita. Em segundo, a curva de Koch é auto-similar e neste caso, pode-se determinar simplesmente a dimensão fractal, $D = 1,2618\dots$, a qual caracteriza de fato a irregularidade do objeto.

Para resolver esse problema, adotou-se, então, o conceito de dimensão fractal, que pode assumir valores fracionários em vez de apenas números inteiros. Uma interpretação conceitual poderosa da dimensão fractal é como sendo uma *medida de complexidade* do objeto em estudo. A dimensão fractal pode ser usada para caracterizar a reatividade química de superfícies, bem como as trocas entre os órgãos do corpo humano e o meio – os brônquios, por exemplo, têm estrutura bem complexa, o que ajuda a maximizar a troca de gases com o ar [Ciência Hoje, 2002].

Das dimensões usadas na classificação de fractais a mais importante é a dimensão de Hausdorff [STROGATZ, 1994]. Ela é mais sutil do que a dimensão de contagem de caixas. A principal diferença conceitual é que a dimensão de Hausdorff usa elementos de medidas (coverings) através de pequenos conjuntos de tamanhos variados, não apenas caixas de dimensão fixa. Ela tem propriedades matemáticas mais refinadas do que a dimensão de contagem de caixas, mas infelizmente é mais trabalhoso computá-la numericamente.

2.1.2. Método da Contagem de Caixas

A dimensão de contagem de caixas é largamente usada na prática para estimar a dimensão de uma variedade de objetos fractais. A técnica não é limitada a estimar as dimensões de objetos no plano, tal como uma curva litorânea. Este método pode ser estendido para investigar objetos fractais de alta dimensão em espaços multidimensionais, usando hiper-cubos de cobertura correspondentes a tais escalas.

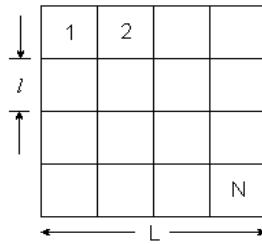
Para obter o valor D da dimensão de caixa discretiza-se a região considerada dentro de quadrados com a dimensão l . Então, conta-se o número $N(l)$ de quadrados de comprimento l que tem intersecções com o padrão considerado. Se o objeto tem propriedades fractais, então, repetindo-se esse procedimento para diferentes valores de l a seguinte relação é obtida:

$$N(l) \sim l^{-D}$$

e estima-se D da inclinação do crescimento linear de $\log(N(l))$ contra $-\log(l)$ [BORODICH, 1997]. A seguir tem-se o procedimento matemático para o cálculo da dimensão fractal.

Considerando-se um quadrado de lado L coberto por N quadrados menores de lado l . L , N , e l satisfazem a seguinte relação:

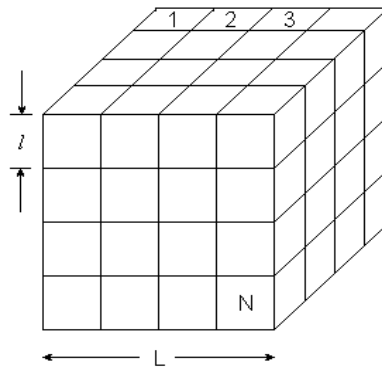
$$Nl^2 = L^2 \quad (2.1)$$



Logo, $N = N(l, L) \sim l^{-2}$ para L fixo ou $N \sim L^2$ para l fixo.

Considerando-se agora um cubo de aresta L dividido em N cubos menores de aresta l , tem-se:

$$Nl^3 = L^3 \quad (2.2)$$



Logo, $N \sim l^{-3}$ para L fixo ou $N \sim L^3$ para l fixo.

Pode-se generalizar estes resultados para um hiper-cubo de dimensão d e de aresta L “coberto” por N hiper-cubos de aresta l ($l \ll L$) dizendo-se que:

$$Nl^d = L^d \quad (2.3)$$

Logo, $N \sim l^{-d}$ para L fixo ou $N \sim L^d$ para l fixo.

Diz-se que o quadrado é bidimensional, o cubo é tridimensional ou o hiper-cubo é d -dimensional devido aos expoentes 2, 3, e d que aparecem nas equações (2.1), (2.2) e (2.3), respectivamente.

Esta definição de dimensão pode ainda ser aplicada a outros objetos de formas diferentes como elipses, esferas, cones – objetos Euclidianos – ,etc. Supondo, por

exemplo, uma esfera maciça de diâmetro L . Diz-se que esta é tridimensional pois a relação entre o número de cubos N de aresta l ($l \ll L$) necessários para cobrir toda a esfera satisfaz $N(l, L).l^3 \sim L^3$, ou seja:

$$N \sim l^{-3} \text{ para } L \text{ fixo ou } N \sim L^3 \text{ para } l \text{ fixo.}$$

Tem-se observado em muitas estruturas naturais a seguinte relação de escala do tipo com D não inteiro:

$$N(l, L).l^D \sim L^D \quad (2.4)$$

Como anteriormente, N é o número de cubos de aresta l necessários para cobrir a estrutura de tamanho global L . A novidade em relação aos exemplos anteriores é que o expoente D passa a ser fracionário. Fala-se, por conseqüência, em dimensão fracionária ou fractal. D é uma espécie de índice crítico que caracteriza o sistema. Na verdade, podem existir muitos desses índices críticos. A aresta l é considerada a escala ou resolução com que o sistema está sendo estudado. Obviamente não é necessário prender-se ao espaço físico tridimensional. É possível considerar um espaço de dimensão arbitrária d e postular a existência de conjuntos fractais “mergulhados” neste espaço satisfazendo relações de escala do tipo:

$$N(l, L) \sim l^{-D}, \text{ } L \text{ fixo e } D \text{ fracionário} \quad (2.5)$$

$$N(l, L) \sim L^D, \text{ } l \text{ fixo e } D \text{ fracionário} \quad (2.6)$$

onde $N(l, L)$ é o número de cubos de dimensões d necessários para cobrir todo o conjunto. Assim, fazendo-se um gráfico de $\log N$ versus $\log l$, obtêm-se, de acordo com a equação (2.5), uma inclinação $-D$. Tem-se, portanto, uma forma prática de medir a dimensão do conjunto em questão. Por outro lado, fixando-se l , também se obtém D a partir de um gráfico $\log N$ versus $\log L$.

Trabalhando-se com a forma completa da equação (2.4), tem-se:

$$N(l, L).l^D = k.L^D, \quad \varepsilon = l / L$$

$$N(\varepsilon).\varepsilon^D = k \quad (2.7)$$

onde k é um número puro. Tomando o logaritmo da equação (2.7), tem-se:

$$\log N(\varepsilon) = D.\log(1/\varepsilon) + \log k$$

$$D = \frac{d[\log N]}{d[\log(1/\varepsilon)]} \quad (2.8)$$

i.e., D é a derivada de $\log N$ em relação a $\log(1/\varepsilon)$.

Uma estimativa bem refinada pode ser obtida traçando-se uma linha (regressão linear) através dos pontos da curva $\log(N)$ versus $\log(1/\epsilon)$ que apresentam uma lei de escala e calculando-se a inclinação da mesma, que representa a dimensão fractal – ver **figura 2.2**.

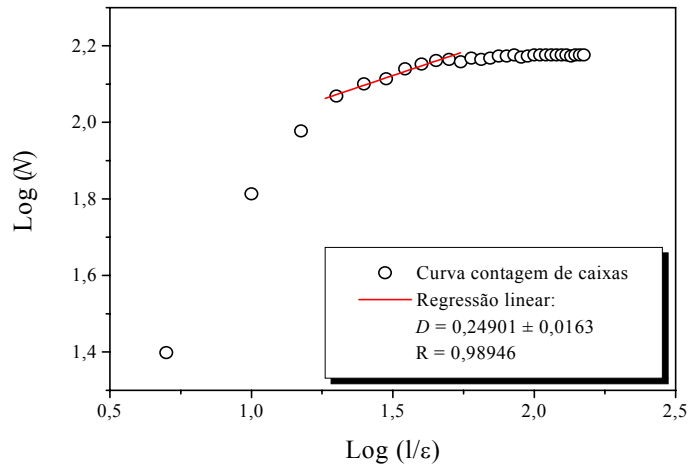


Figura 2.2. Contagem de caixas dos dados pluviométricos da cidade de Fortaleza entre os anos de 1850 e 2001.

[Fonte: FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos]

Para se evitar ambigüidades, deve ficar claro que $N(l,L)$ é sempre o menor dos N 's associados a uma resolução l e a um tamanho global L . Se o menor dos N 's não for considerado, obtêm-se um valor de D maior que o exato.

Lembre-se que como $N(\epsilon)$ na equação (2.7) não pode ser maior que o número de cubos para encher todo o espaço (de dimensão d), então $D \leq d$. Numa primeira tentativa pode-se considerar um fractal como um conjunto satisfazendo $D < d$, onde D é fracionário. Assim, um fractal está ligado à idéia de conjuntos que não conseguem preencher todo o espaço.

2.1.3. Curva de Fractalidade

É importante distinguir entre fractais que são auto-similares em toda parte e aqueles que são auto-similares somente se examinados na parte correta – ver **figura 2.3**.

O maior problema com o uso da dimensão fractal para caracterizar formas da natureza é que estas não são perfeitamente fractais (ou auto-similares). De fato, qualquer objeto tem tamanho finito, implicando que sua dimensão fractal tenda a zero à medida que se observa em escalas cada vez maiores. Em formas naturais, raramente se encontra mais que duas a três hierarquias de repetição dos padrões geradores. As imagens digitais, por exemplo, têm resolução espacial necessariamente limitada. Isso impõe restrições adicionais à extensão do comportamento fractal (ou seja, a ‘fractalidade’) dos objetos naturais representados nessas imagens.

Assim, o máximo que se pode esperar é que essas formas apresentem dimensão fractal elevada ao longo de um intervalo limitado de escalas espaciais. Isso sugere que, para cada escala espacial empregada, pode existir um valor específico para a dimensão fractal.

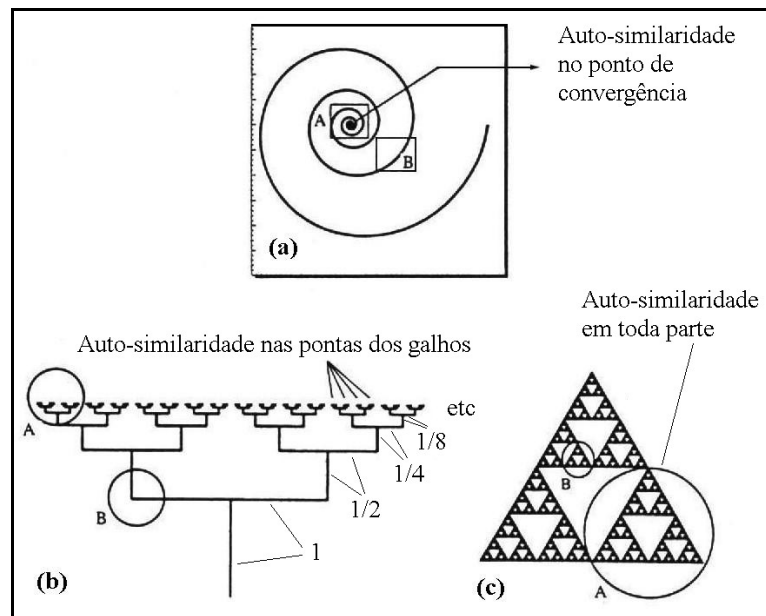


Figura 2.3. A natureza da auto-similaridade. (a) o espiral logarítmico é auto-similar somente no seu ponto de convergência. (b) a árvore binária é auto-similar somente nas pontas dos galhos. (c) o gasket de Sierpinski é auto-similar em qualquer parte.

[Fonte: ADDISON, 1997]

2.2. SÉRIES TEMPORAIS E MÉTODOS DE ANÁLISES

Uma série temporal é uma coleção de observações feitas sequencialmente no tempo. Os exemplos ocorrem numa variedade de campos, variando de economia à engenharia, e métodos de análise de séries temporais constituem uma importante área da estatística.

Uma serie temporal é dita contínua quando observações são feitas continuamente no tempo. Uma série é dita discreta quando as observações são tomadas somente em tempos específicos, usualmente espaçados igualmente. O termo discreto é usado para séries deste tipo mesmo quando a variável medida é contínua.

Se uma série pode ser predita exatamente, ela é chamada determinística. Mas a maioria das séries é aleatória (evolui no tempo de acordo com as leis probabilísticas) em que o futuro é determinado parcialmente pelos valores do passado. Assim predições exatas são impossíveis e devem ser substituídas pela idéia de que os valores do futuro têm uma distribuição de probabilidade que é condicionada por um conhecimento dos valores do passado.

Existem vários objetivos possíveis na análise de uma série temporal. Estes podem ser classificados como descrição, explanação, predição e controle.

A principal ferramenta de diagnóstico dos modelos de probabilidade para séries temporais é uma função chamada de autocorrelação. Esta ajuda a descrever a evolução de um processo através do tempo. A inferência baseada nesta função é freqüentemente chamada de análise no domínio do tempo.

Uma função chamada de densidade espectral descreve como a variação numa série temporal pode ser explicada por componentes cíclicos em diferentes freqüências. O procedimento para estimar essa função é chamado de análise espectral e a inferência baseada na função de densidade espectral é freqüentemente chamada de análise no domínio da freqüência. [CHATFIELD, 1992].

Os registros no tempo de fenômenos tais como temperatura, descarga de rios, precipitação e assuntos em engenharia e ciência de materiais podem ser analisados em termos da análise de intervalos re-escalados de Hurst. Os registros são caracterizados por um expoente H – o expoente de Hurst o qual relaciona-se com a sua dimensão fractal através da seguinte relação [FEDER, 1988]:

$$D = 2 - H. \quad (2.9)$$

A **figura 2.4** mostra um exemplo típico de uma série temporal:

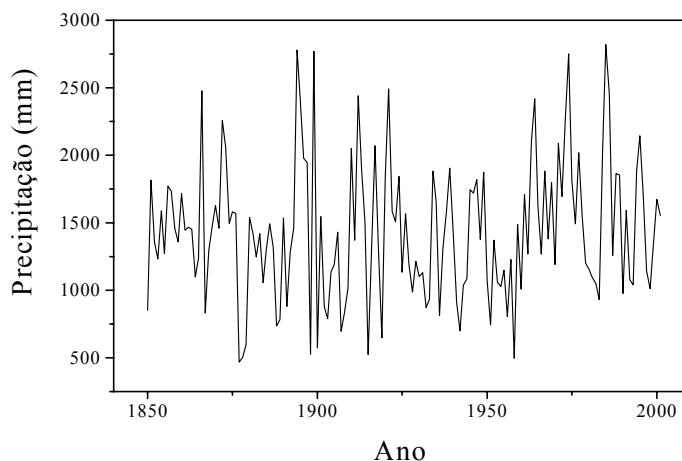


Figura 2.4. Pluviometria da cidade de Fortaleza entre os anos de 1850 e 2001.
[Fonte: FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos]

2.2.1. Método do Intervalo Re-escalado de Hurst – Análise R/S

Hurst desenvolveu um método estatístico para analisar longos registros de fenômenos naturais. Tal análise baseia-se na proporção adimensional R/S , onde R é um intervalo definido como a diferença entre os valores máximos e mínimos acumulados, ou seja, a soma cumulativa de $X(t, \tau)$ do fenômeno natural no tempo inteiro discreto estimado t sobre um intervalo temporal considerado τ . A expressão explícita para R é:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (2.10)$$

onde:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t \{ \xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau} \} \quad (2.11)$$

Já S , o desvio padrão estimado dos valores observados $\xi(t)$, é definido como:

$$S = \left(\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \{ \xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau} \}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

onde:

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad (2.13)$$

Hurst encontrou que o intervalo re-escalado observado, R/S , para muitos registros no tempo é muito bem descrito pela seguinte relação empírica:

$$R/S = (\tau/2)^H \quad (2.14)$$

onde H é o expoente de Hurst.

A observação de Hurst [FEDER, 1988] é notável considerando o fato de que na ausência de longo período, R/S deve tornar-se assintoticamente proporcional a $\tau^{1/2}$ para registros gerados por processos estatisticamente independentes com variâncias finitas. A relação matemática é dada por:

$$R/S = (\pi\tau/2)^{1/2} \quad (2.15)$$

O método de Hurst analisa séries temporais sendo, portanto, adequado para o estudo da forma de onda de sinais ultra-sônicos.

Para procurar as tendências dentro de um conjunto de dados, este é dividido em partes e a análise R/S é realizada em cada parte. O procedimento é calcular R/S_1 para τ . Então o conjunto de dados é dividido ao meio e o R/S é calculado para cada parte e então somado em média para dar R/S_2 . Isto é repetido para $\tau/4$, $\tau/8, \dots$, e assim por diante. Assim, as séries de R/S são calculadas do conjunto de dados para as respectivas faixas de divisões e são então traçados numa curva log-log. O coeficiente de Hurst, H , dos dados é obtido da inclinação da linha reta referente à regressão linear dos R/S discretos – ver **figura 2.5**.

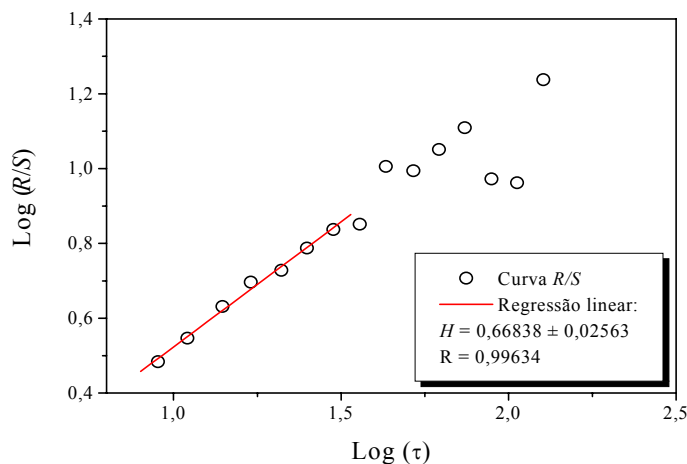


Figura 2.5. Análise de Hurst dos dados pluviométricos da cidade de Fortaleza entre os anos de 1850 e 2001.

[Fonte: FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos]

Mandelbrot introduziu o conceito de *movimento Browniano fracionário* (fBm) como uma generalização de uma função randômica com o expoente de Hurst variando entre 0 e 1 ($0 < H < 1$).

No caso de um processo randômico independente (movimento browniano ordinário – $H = 1/2$), a correlação dos incrementos do futuro e passado desaparecem para qualquer t . Entretanto, para $H \neq 1/2$, tem-se uma correlação diferente de zero, independente de t . Isto é uma notável característica do movimento Browniano fracionário que leva à persistência ($H > 1/2$), ou seja, uma tendência de crescimento no passado implica em média numa tendência de crescimento no futuro e vice-versa ou antipersistência ($H < 1/2$), ou seja, uma tendência de acréscimo no passado implica em média numa tendência de decréscimo no futuro e vice-versa.

A equação (2.9) pode ser obtida através de uma simples análise de escala do traço (projeção de movimento em um eixo como função do tempo) da curva fBm. Para preservar a auto-similaridade estatística de uma parte de uma curva fBm, será necessário utilizar fatores de escala independentes para os eixos do tempo t e do traço temporal do movimento Browniano $B_H(t)$ (onde H é o expoente de Hurst) [ADDISON, 1997]. Escalando t por um fator de A requer-se que $B_H(t)$ deva ser escalado por A^H , assim t torna-se At e $B_H(t)$, $A^H B_H(t)$. Como discutido anteriormente, a dimensão fractal de contagem de caixas, D , de um traço fBm pode ser obtida considerando-se um intervalo de um traço fBm re-escalado, por simplicidade, para se enquadrar numa caixa unitária, isto é, $0 \leq t \leq 1$ e $0 \leq B_H \leq 1$ – ver **figura 2.6**. Então, divide-se o intervalo temporal em n segmentos cada um com comprimento de $1/n$. A altura da caixa requerida para conter o traço temporal sobre o subintervalo temporal $1/n$ vai representar-se diferentemente da sua base devido a natureza de auto-afinidade (a propriedade de escala não uniforme ou anisotrópica) do traço. Assim, essa altura deve escalar-se da faixa original de $B_H(t) = 1$ para $(1/n)^H \times 1 = (1/n)^H$, onde H é o expoente de Hurst. A área de cada uma dessas caixas retangulares, requeridas para cobrir o traço em cada subintervalo de tempo, é simplesmente o comprimento multiplicado pela largura da caixa:

$$\left(\frac{1}{n}\right)\left(\frac{1}{n^H}\right) = \left(\frac{1}{n^{H+1}}\right). \quad (2.16)$$

Assim, o número típico de quadrados menores de área igual a $(1/n)^2$, requerido para cobrir o traço em cada subintervalo de tempo é:

$$\left[\left(\frac{1}{n^{H+1}} \right) / \left(\frac{1}{n^2} \right) \right] = \frac{1}{n^{H-1}} \quad (2.17)$$

Existem n subintervalos temporais cada um com comprimento de $(1/n)$. Portanto, o número de caixas, N , com tal comprimento requerido para cobrir a porção original do fBm na caixa unitária é:

$$N = n \cdot \left(\frac{1}{n^{H-1}} \right) = \frac{1}{n^{H-2}}. \quad (2.18)$$

Relacionando as equações (2.8) e (2.18) e considerando o caso de uma caixa unitária onde $L = 1$ ($1/\varepsilon = L/l = 1/l = n$) tem-se:

$$D = \frac{\log(N)}{\log(1/\varepsilon)} = \frac{\log\left(\frac{1}{n^{H-2}}\right)}{\log(n)} = \frac{(2-H)\log(n)}{\log(n)}.$$

Logo efetuando o devido cancelamento obtêm-se a expressão $D = 2 - H$ para a dimensão de contagem de caixas de um traço fBm.

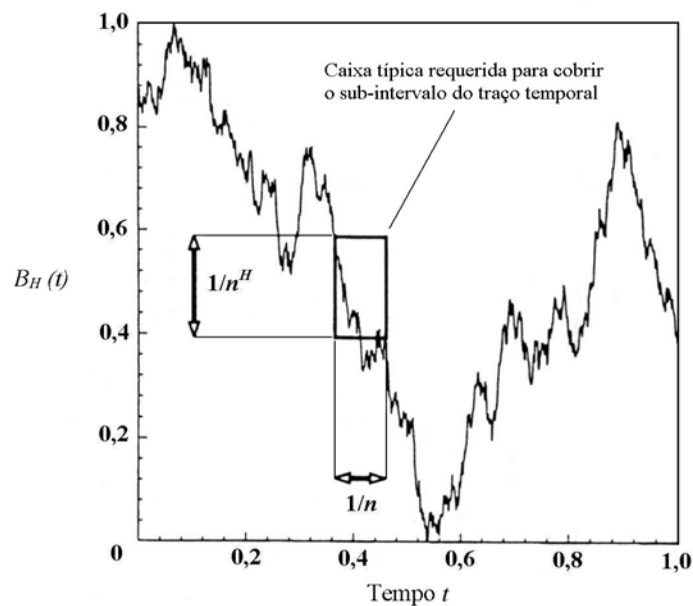


Figura 2.6. Propriedades de escala de um traço fBm contido dentro de uma caixa unitária.

[Fonte: ADDISON, 1997]

2.2.2. Método Espectral 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 [HILBORN, 1994].

Muitos ruídos ou funções randômicas encontradas na ciência e natureza têm espectro de potência com relações de lei bem definidas, sendo o espectro uma curva da magnitude quadrada da transformada de Fourier contra a frequência.

Supondo um número finito de valores amostrados de $f(t)$, a saber, $f_0, f_1, \dots, f_{N_0-1}$ e considerando $\Delta t = 1$ e o conjunto discreto de frequências de Fourier $\lambda_n = (2\pi n)/N_0$, $n = 0, 1, \dots, N_0 - 1$; define-se a transformada discreta de Fourier da seqüência como [MORETTIN, 1999]:

$$F_n = \sum_{t=0}^{N_0-1} f_t \cdot e^{-i \cdot \lambda_n \cdot t} . \quad (2.19)$$

O cálculo direto da transformada envolve N^2 operações complexas; no entanto, usando um algoritmo chamado FFT (fast Fourier transform), ela pode ser calculada usando $N_0 \cdot \log_2 N_0$ operações. Esse algoritmo é o de Cooley e Tukey (1965).

A transformada inversa é:

$$f_t = \frac{1}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0-1} F_n \cdot e^{i \cdot \lambda_n \cdot t} , \quad (2.20)$$

e o teorema de Parseval é:

$$\sum_{t=0}^{N_0-1} |f_t|^2 = \frac{1}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0-1} |F_n|^2 . \quad (2.21)$$

Uma curva de $|F_n|^2$ como uma função do número harmônico n é chamado de espectro de potência de Fourier para o sinal. O resultado prévio indica que o quadrado do valor absoluto do coeficiente de Fourier F_n quantifica a potência associada com o harmônico [HILBORN, 1994].

O ponto crucial na análise de Fourier é que, para uma função periódica, o espectro vai consistir de um conjunto discreto de frequência. Entretanto, se o sinal não é periódico (por exemplo, caótico), então o espectro de potência de Fourier será contínuo. Assim, a manifestação de um espectro contínuo quando algum parâmetro do sistema é mudado, pode ser vista como um indicador do início de comportamento caótico. Porém, esse espectro pode também surgir se ruído externo estiver presente. Assim, a presença

de um espectro de potência contínuo não pode necessariamente ser levado como evidência conclusiva para a existência de caos a não ser que se mostre que o ruído de fundo esteja ausente, e que a resolução experimental seja suficiente para ver todas as frequências que poderia estar presentes para um número esperados de graus de liberdade [HILBORN, 1994]. Portanto, são necessárias técnicas que podem se diferenciar entre séries temporais que são randômicas (ou ruidosas) e caóticas. Isso pode ser feito investigando a estrutura fractal.

Através da investigação da relação entre a densidade espectral de potência $\log P(f)$ (onde $P(f) = |F_n|^2$), obtida da transformada de Fourier dos dados discretos, e $\log(f)$ (onde f é a frequência), a dimensão fractal pode ser deduzida. Se existir a relação ($P(f) \propto f^{-\phi}$), então, a dimensão fractal pode ser calculada pela seguinte equação [HASEGAWA, 1996]:

$$D = \frac{5 - \phi}{2} \quad (2.22)$$

O expoente de escala de potência, ϕ , é medido da inclinação da curva $\log P(f)$ versus $\log(f)$ – ver **figura 2.7**. O valor de “ ϕ ” obtido pela curva espectral será considerado em módulo tanto neste exemplo como nos cálculos futuros.

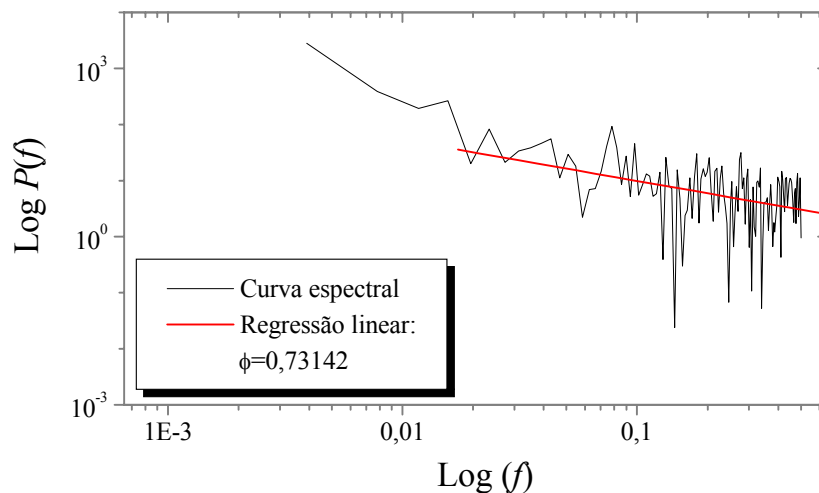


Figura 2.7. Análise Espectral dos dados pluviométricos da cidade de Fortaleza entre os anos de 1850 e 2001.

[Fonte: FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos]

Combinando as expressões (2.9) e (2.22), obtém-se a seguinte expressão que relaciona os expoentes de Hurst e espectral:

$$\phi = 1 + 2H \quad (2.23)$$

Isto dá expoentes espectrais na faixa de $1 < \phi < 3$ para fBms. O espectro de potência, portanto, provê um outro método para a classificação de fBms.

3. METODOLOGIA

3.1. MATERIAIS COMPÓSITOS E SUA INSPEÇÃO POR EMISSÃO ACÚSTICA

Compósitos são materiais produzidos artificialmente tendo uma combinação desejável das melhores propriedades das fases constituintes. Usualmente, uma fase (a matriz) é contínua e envolve completamente a outra (a fase dispersa).

Estes materiais são classificados em reforçados por partículas, por fibras e compósitos estruturais. Os compósitos reforçados por fibra possuem um reforço mais eficiente em relação aos demais. O objetivo do uso desse tipo é a alta resistência específica e/ou módulo de elasticidade. O mais comum é o de fibra de vidro reforçado, embutido numa matriz polimérica. [CALLISTER, 1994].

Hoje em dia, materiais compósitos reforçados com fibra estão sendo empregados em numerosas aplicações. Em todos os casos estas aplicações requerem um entendimento completo de suas propriedades mecânicas. Especificamente, desempenho mecânico de tal material é fundamentalmente dependente da resistência do ligante da fibra-matriz. Em muitos casos, as camadas interfaciais metálicas são também empregadas para aumentar a ductilidade da interface fibra/matriz. Assim, para realçar a confiabilidade, durabilidade e tenacidade dos compósitos reforçados por fibra é imperativo entender as propriedades básicas de micro-escala e seus efeitos sobre as propriedades de macro-escalas do sistema compósito.

Como resultado da temperatura, cargas mecânicas e reações químicas, um material compósito reforçado com fibra é submetido a um grande número de micro e macro-mecanismos de dano. Em algumas instâncias, estes mecanismos danosos contribuem para a tenacidade global do material compósito. Em muitos casos, a rugosidade na interface fibra/matriz tem um efeito dominante sobre a integridade e comportamento mecânico do material compósito.

A tenacidade destes materiais é largamente atribuída à energia de dissipação do escorregamento friccional das fibras em suas interfaces com o material da matriz.

A estrutura da interface entre dois corpos em contato é diferente daquela do material correspondente de cada corpo. O contato atual entre dois sólidos reais é

percebido somente sobre uma pequena fração da superfície num número discreto de áreas que dependem da curvatura e rugosidade das superfícies de contato. Para muitos processos de formação de superfície de contato esta rugosidade persiste sobre muitas escalas de comprimento, as quais sugerem uma representação fractal. Tem sido também observado que em alguns casos dois ou mais regimes fractais existem sobre as escalas de comprimento fisicamente relevante com a dimensão fractal aumentando com o aumento da escala de comprimento. A investigação experimental da morfologia superficial da fibra, usando microscopia de força atômica, demonstrou que as superfícies de muitas fibras de reforço comumente usadas exibem comportamento fractal. [WARREN & KRAJGINOVIC, 1996].

Equipamentos fabricados com material plástico reforçado com fibra de vidro ou kevlar possuem poucos recursos disponíveis para inspeção. A técnica normalmente utilizada é a inspeção visual, que fica muito prejudicada nos casos em que os equipamentos estão pintados por exigência da proteção contra a ação da radiação ultravioleta que degrada estes materiais. Manter a integridade destes equipamentos não é tarefa simples para o pessoal envolvido com a manutenção e inspeção, considerando o modo de falha que eles apresentam. Pelo fato de serem escassos os métodos de inspeção, é complexo o acompanhamento da degradação que só é identificada quando a falha ocorre, normalmente de forma catastrófica e repentina. Este modo de falha é característico destes materiais devido ao seu caráter frágil e sensibilidade ao efeito visco-elástico. A partir de 1979, usuários preocupados com falhas que envolviam descontinuidades operacionais, danos patrimoniais e pessoais, investiram na tecnologia de EA com o objetivo de eliminá-los [PHISICAL ACOUSTICS SOUTH AMERICA, 2001].

A EA de um material compósito reforçado com fibra tem uma amplitude significativamente maior do que a de um metal. O fator mais importante para o sucesso num teste em tal material é a eliminação do ruído gerado fora dele. Dois métodos podem ser usados para checar fontes de ruído estranho: (1) recarregar uma amostra de compósito que apresente o efeito Kaiser e (2) substituir o espécime de compósito por uma metálica de alta resistência. Este deve permanecer bem na região elástica quando carregado e não deve produzir EA detectável.

A técnica particular usada num dado teste depende do propósito dos dados de EA. A técnica mais usada para compósitos reforçados com fibra é a soma das contagens de EA. A atenuação do sinal de EA quando se propaga no compósito é normalmente

maior do que na maioria dos metais; por isso, para avaliar analiticamente tal efeito, é necessário ter os dados sobre as propriedades de atenuação dos compósitos nas várias direções onde suas propriedades são diferentes.

Curvas de EA versus tensão ou deformação são muito úteis para interpretar ensaios de tração de compósitos, e os gráficos em função do tempo são convenientes para estudar as propriedades de tensão de ruptura dos compósitos.

Quando a EA é usada para estudar a deformação de um material compósito, é necessário que fontes e mecanismos sejam identificados.

A EA pode ser usada para determinar propriedades de compósitos que seriam difícil ou impossível através de outras técnicas. As características das discontinuidades de teste geradas em vários estágios avançados podem ser estudadas por outros ensaios. Sem a EA, seria praticamente impossível encontrar discontinuidades danosas em testes antecipados. A tabela 3.1 [WEVERS, 1997] mostra diferentes testes usados para quantificar danos em compósitos.

Tabela 3.1. Diferentes técnicas não-destrutivas usadas para identificar danos em compósitos.

| Mecanismo de falha | Emissão Acústica | Ultra-som C-scan | Radiografia | Microscopia |
|---------------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|
| Fratura de fibra | possível | não | não | não |
| Delaminação | possível | sim | sim | na borda |
| Trincamento de matriz | possível | não | sim | na borda |
| Descolamento fibra-matriz | possível | não | não | não |

3.2. MATERIAL INSPECIONADO

O material compósito utilizado neste trabalho tinha como combinação as seguintes fases constituintes [FERREIRA, 2000]:

- Matriz: resina epóxi DER 331. Fabricante: DOW QUÍMICA S.A.
- Fase dispersa/agente de reforço: conjunto de fios (Roving) de fibra de vidro tipo E e fibra de vidro tipo-E CJ-10 (usado nas extremidades do espécime no ensaio de tração). Fabricante: Owens-Corning Fiberglass.

O agente de cura utilizado na resina foi o DEH 24, líquido do tipo poliamina, baseado no trietilenotetramina (TETA). A seguir tem-se a tabela 3.2 com as propriedades e especificações dos componentes utilizados na fabricação dos corpos de prova.

A tabela 3.2 mostra as características do material inspecionado.

Tabela 3.2. Propriedades e especificações das composições dos CP's.

| ENDURECEDOR E RESINA EPÓXI | |
|---|-----------------|
| Propriedades do Endurecedor DEH 24 | |
| Peso Equivalente Em Hidrogênio Ativo | 24,4 |
| Viscosidade, Cps, 25°C | 19,5 - 22,5 |
| Cor Apha, Máx. | 200 |
| Densidade, G/ML, 25°C | 0,97 - 0,98 |
| Flash Point Pensky-Martens, °C | 114 |
| Propriedades físicas e mecânicas da resina epóxi DER 331 | |
| Peso Equivalente em Epóxi (EEW) | 182 - 192 |
| Viscosidade, cps, 25°C | 11.000 - 14.000 |
| Cor Gardner, máx. | 3 |
| Densidade (Gcm ⁻³), 25°C | 1,1 - 1,4 |
| Flash Point (Coc), °C | 255 |
| Módulo de Young (GPa) | 3,0 - 6,0 |
| Resistência à Tração (MPa) | 35 – 100 |
| Resistência à Compressão (Mpa) | 100 – 200 |
| Elongação Máx. (%) | 1 – 6 |
| Coefficiente de Expansão Térmica (10 ⁻⁶ °C ⁻¹) | 60 |
| Contração na Cura (%) | 1 – 2 |
| FIBRA DE VIDRO | |
| Especificação do “Roving” | |
| Diâmetro Nominal da Fibra (µm) | 10 |
| Quantidade de Fios | 200 |
| Composição da Fibra de Vidro Tipo-E | |
| Componentes | % em peso |
| SiO ₂ | 52 – 56 |
| Al ₂ O ₃ | 12 – 16 |
| Cão | 16 – 25 |
| MgO | 0 – 6 |
| Ba ₂ O ₃ | 8 – 13 |
| Na ₂ O e K ₂ O | 0 – 3 |
| TiO ₂ | 0 - 0,4 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,05 - 0,4 |
| F ₂ | 0 - 0,5 |
| Propriedades da Fibra de Vidro Tipo-E | |
| Densidade (gcm ⁻³), 25°C | 2,54 |
| Módulo de Young (GPa) | 72,4 |
| Resistência à Tração (GPa) | 1,70 |
| Coefficiente de Expansão Térmica (10 ⁻⁶ °C ⁻¹) | 5,04 |
| Especificação do Tecido de Fibra de Vidro CJ-10 | |
| Gramatura (gm ⁻²) | 228 |
| Espessura (mm) | 0,25 |
| Largura (m) | 1,19 |

3.3. CORPOS DE PROVA E ESPECIFICAÇÕES

Para os ensaios foram fabricados os seguintes corpos de prova [FERREIRA, 2000]:

1. Placas de resina epóxi DER 331 reforçadas com fibra de vidro (1 ou 2 camadas, com ou sem tratamento térmico) tipo E unidimensional - método do empilhamento manual.

As etapas do processo de fabricação das placas compósitas foram: (1) preparo do molde; (2) preparo do reforço; (3) preparo da matriz; (4) vazamento e (5) operação final.

- Nomenclatura e significado dos CP's

- TLEV: matriz epóxi reforçada com uma camada de fibra de vidro, na direção 0° em relação ao eixo de tração.

- TTEV: matriz epóxi reforçada com uma camada de fibra de vidro, na direção 90° em relação ao eixo de tração.

- F31 e F41: matriz epóxi reforçada com uma camada de fibra de vidro.

- F31T e F41T: matriz epóxi reforçada com uma camada de fibra de vidro tratada superficialmente.

- F32 e F42: matriz epóxi reforçada com duas camadas de fibra de vidro.

2. Placas de resina epóxi DER 331.

As etapas de fabricação dos corpos de prova de resina epóxi foram: (1) preparo do molde; (2) preparo da matriz; (3) vazamento e (4) operação final.

- Nomenclatura e significado do CP:

- TME: matriz de resina epóxi.

- **Especificações dos CP's de acordo com o Ensaio Mecânico**

1. Ensaio de tração:

- TME: comprimento de 240 mm, larguras de 19,85 e 19,4 mm e raio de concordância de 76 mm e espessura de 7 mm.

- TLEV e TTEV: comprimento de 252 mm, largura de 20,7 e espessura de 1 mm.

2. Ensaio de flexão:

- F31, F41, F31T e F41T: comprimento de 100 mm; largura de 25,20 mm e espessura de 1 mm.

- F32 e F42: comprimento de 100 mm, largura de 25,20 mm e espessura de 1,80 mm.

3.4. ENSAIOS E EQUIPAMENTOS MECÂNICOS E DE EMISSÃO ACÚSTICA

No ensaio de tração, utilizou-se a máquina INSTRON, modelo 1125 de 10 t. Para o CP epóxi, adotou-se a norma ASTM D638-91 e para o CP compósito, a norma ASTM D3039-95. Já no ensaio de flexão, a norma utilizada foi a ASTM D790-91.

No ensaio de EA, usou-se o Equipamento de EA LOCAN 320 e os Sensores S9220, diâmetro 10 mm, altura 4 mm, cabeçote de alumínio, face de material cerâmico e faixa de frequência de 100 a 1000 kHz; ambos da Physical Acoustics Corporation – PAC (ver **figuras 3.1 e 3.2**). Todos os ensaios foram realizados por Ferreira (2000).

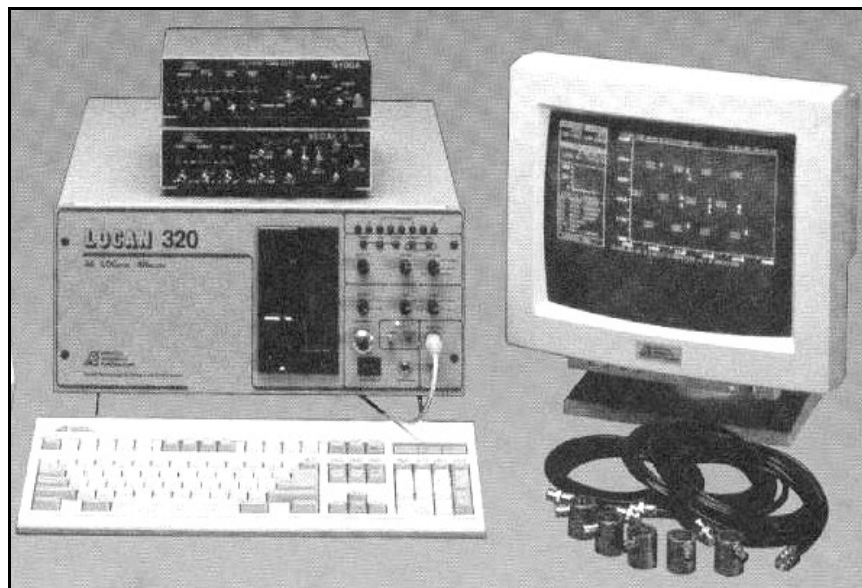


Figura 3.1. Equipamento de teste de EA LOCAN 320-PAC.

[Fonte: PAC – LOCAN 320 User's Manual, 1992]

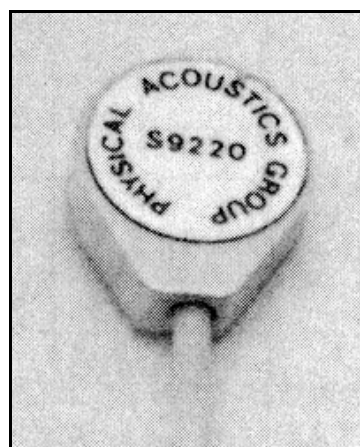


Figura 3.2. Sensor de EA S9220-PAC

[Fonte: FERREIRA, 2000]

3.5. EXECUÇÃO DO ENSAIO E AQUISIÇÃO DO SINAL

Uma vez instalado na máquina Instron e com os sensores devidamente acoplados com cola quente de silicone, o corpo de prova foi tencionado até se deformar plasticamente (fratura total). A aquisição e o armazenamento dos sinais, em tempo real e no domínio do tempo, se deu através do programa Gagescope instalado no microcomputador interconectado ao equipamento de EA [FERREIRA, 2000].

3.6. PROGRAMAS E SOFTWARES UTILIZADOS NAS ANÁLISES DOS SINAIS

Para determinar a dimensão fractal dos sinais de EA em questão, utilizaram-se programas e/ou técnicas matemáticas como:

- Software Origin 5.0: utilizado para traçar os gráficos dos sinais de EA e as curvas referentes aos dados dos cálculos da dimensão fractal, da análise de Hurst e da transformada de Fourier discreta obtidos pelos programas em Fortran. Usou-se também para calcular a Transformada Rápida de Fourier (FFT) a fim de comparar com os cálculos obtidos pelo programa em Fortran.
- Processador Fortran Microsoft 4.0: usado para executar os algoritmos dos programas contagem de caixas, Transformada de Fourier e R/S .

Os programas desenvolvidos em FORTRAN foram três:

- Programa do Intervalo Re-escalado de Hurst: fornece o cálculo da relação R/S dos sinais de EA.
- Programa Transformado de Fourier Discreta: avalia o espectro de potência dos sinais de EA.
- Programa Contagem de Caixas: calcula as dimensões fractais dos sinais de EA. Foram usadas três versões desse programa. O primeiro calcula a dimensão fractal do sinal com o número de pontos especificados. O segundo fornece os cálculos considerando uma taxa de amostragem reduzida à metade. Já a terceira versão considera o número de pontos totais, porém efetua um tratamento (média móvel – quatro pontos adjacentes) nos dados a fim de eliminar platôs, valores iguais de amplitudes para tempos diferentes, encontrados nos sinais.

Os códigos desses programas encontram-se no Apêndice, exceto o programa da análise R/S . Entretanto, este foi baseado no algoritmo apresentado no capítulo dois, item 2.2.1.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios mecânicos e de EA realizados nos corpos de prova e os respectivos modos de falha estão expressos na tabela 4.1.

| DESIGNAÇÕES REFERENTES À TABELA 4.1 |
|--|
| F31 e F32: flexão em 3 pontos na matriz epóxi reforçada com 1 e 2 camadas de fibra de vidro. |
| F31T e F41T: flexão em 3 e 4 pontos na matriz epóxi reforçada com 1 camada de fibra de vidro tratada termicamente. |
| F41 e F42: flexão em 4 pontos na matriz epóxi reforçada com 1 e 2 camadas de fibra de vidro. |
| TLEV: tração longitudinal na matriz epóxi reforçada com 1 camada de fibra de vidro. |
| TME: Tração na matriz de resina epóxi. |
| TTEV: tração transversal na matriz epóxi reforçada com 1 camada de fibra de vidro. |
| PDT (tempo de definição de pico), HDT (tempo de definição de evento) e HLT (tempo de reativação de evento) são parâmetros do sistema de EA e dependem do material utilizado. |

Tabela 4.1. Ensaios e resultados mecânicos e de EA.

| Ensaio/ CP | Tensão de Ruptura (MPa) | Parâmetros de Entrada de EA | | | | | Parâmetros de Saída de EA | | | | | Mecanismos de Falha Predominantes |
|------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------|----------|----------|----------|---------------------------|--------------|----------|----------------|---------|---|
| | | Ganho (dB) | Limiar (dB) | PDT (µs) | HDT (µs) | HLT (µs) | Tempo de Subida (µs) | Duração (µs) | Contagem | Amplitude (dB) | Energia | |
| Tração (TME) | 53,34 | 50 | 23 | 75 | 150 | 300 | 24 | 75 | 10 | 67 | 31 | -Trincamento transversal da matriz. |
| Tração (TLEV) | 478,78 | 23 | 55 | 75 | 150 | 300 | 33 | 51 | 7 | 62 | 17 | -Trincamento longitudinal da matriz. -Descolamento fibra/matriz. -Ruptura de fibra. |
| Tração (TTEV) | 11,76 | 23 | 45 | 75 | 150 | 300 | 15 | 16 | 2 | 47 | 6 | -Trincamento transversal da matriz. |
| Flexão 4 pontos (F41) | 449,71 | 35 | 20 | 75 | 150 | 300 | 24 | 41 | 4 | 44 | 5 | -Trincamento transversal da matriz. -Descolamento fibra/matriz. -Ruptura de fibra. |
| Flexão 4 pontos (F41T) | 565,56 | 35 | 20 | 75 | 150 | 300 | 8 | 10 | 2 | 28 | 2 | -Descolamento fibra/matriz |
| Flexão 4 pontos (F42) | 851,52 | 25 | 30 | 75 | 150 | 300 | 10 | 14 | 2 | 34 | 2 | -Trincamento transversal da matriz. -Deslocamento fibra/matriz. -Ruptura de fibra. -Delaminação. |
| Flexão 3 pontos (F31) | 657,38 | 35 | 20 | 75 | 150 | 300 | 6 | 8 | 2 | 35 | 3 | -Trincamento transversal da matriz. -Descolamento fibra/matriz. |
| Flexão 3 pontos (F31T) | 566,78 | 25 | 30 | 75 | 150 | 300 | 11 | 38 | 6 | 29 | 2 | -Descolamento fibra/matriz |
| Flexão 3 pontos (F32) | 551,70 | 35 | 20 | 75 | 150 | 300 | 9 | 33 | 9 | 40 | 2 | -Trincamento transversal da matriz. -Descolamento fibra/matriz. -Delaminação. |

4.2. SINAIS ESTUDADOS

Dois tipos de sinais foram estudados: (a) sinais originais, porém janelados, ou seja, especificados dentro de uma certa escala temporal. Cada sinal foi escolhido com 7000 pontos. (b) sinais processados, ou seja, suavizados. Estes também foram janelados, mas com números de pontos diferentes para cada grupo de sinais: F31T - 2747, F41T - 3656, F41 - 5534, F42 - 4767, F31 - 3226, F32 - 4077, TME - 4928, TTEV - 5416 e TLEV - 4940 pontos. Além do janelamento, os sinais processados passaram por um alisamento (média móvel: método dos pontos vizinhos adjacentes – software origin), onde se obteve uma variação mais suave da amplitude com o tempo. Cabe ressaltar que esse processamento foi obtido por Ferreira (2000).

Os gráficos seguintes caracterizam a forma de onda de cada sinal original referente a seu grupo tal qual obtido dos ensaios (figuras 4.1 a 4.9), bem como a dos sinais processados correspondentes (figuras 4.10 a 4.18).

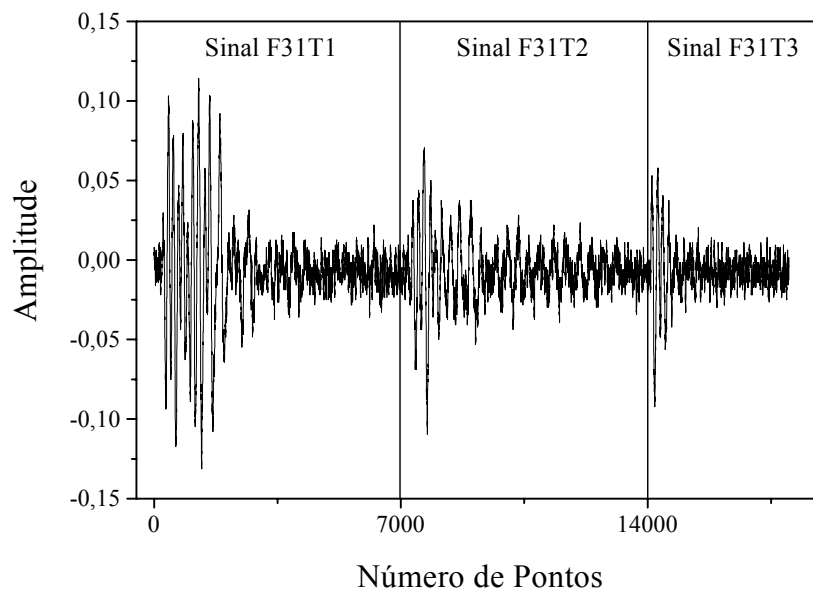


Figura 4.1. Grupo dos sinais F31T originais.

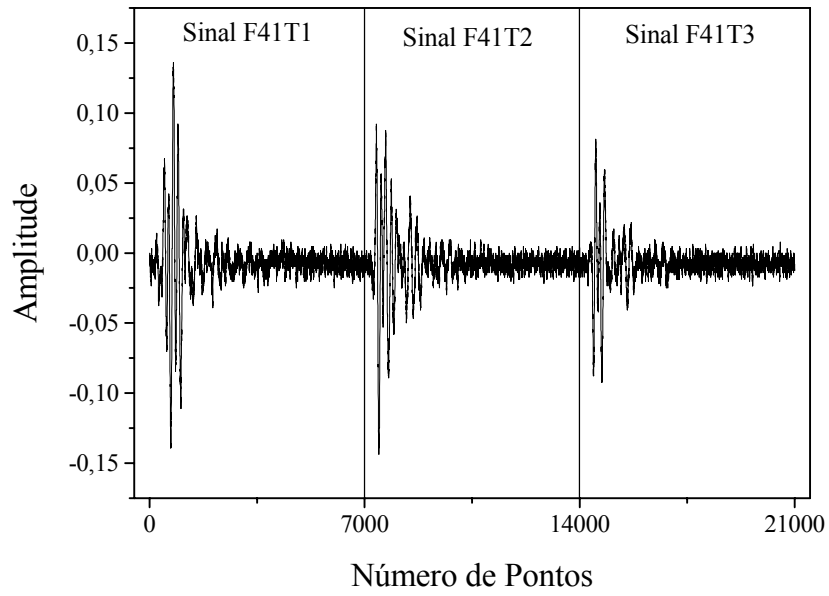


Figura 4.2. Grupo dos sinais F41T originais.

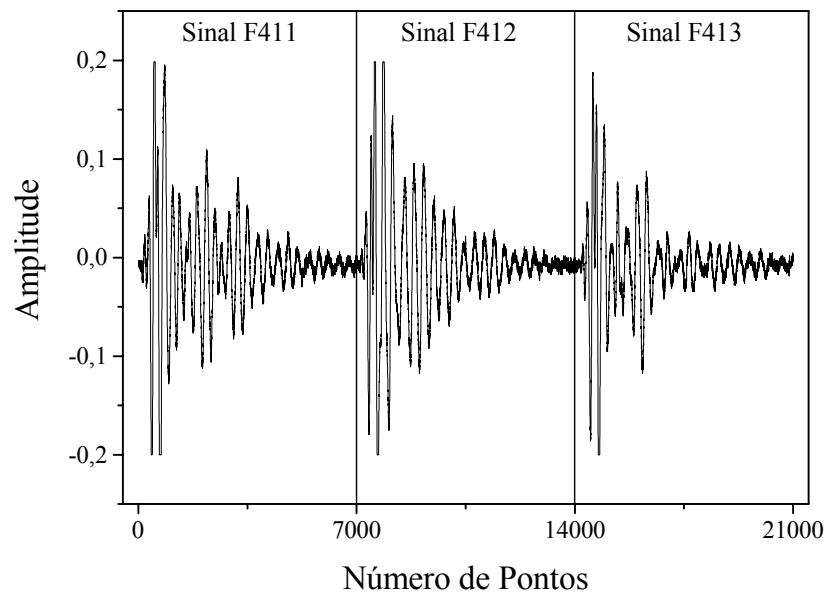


Figura 4.3. Grupo dos sinais F41 originais.

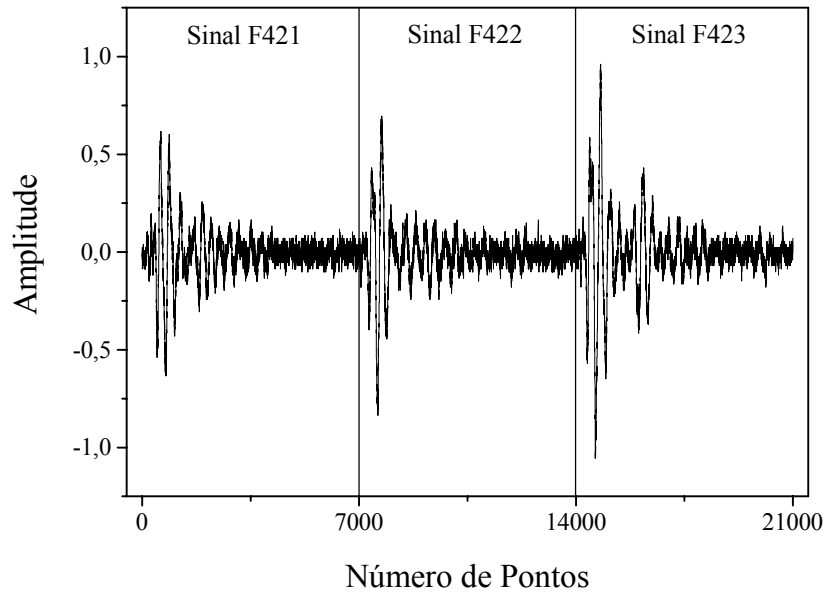


Figura 4.4. Grupo dos sinais F42 originais.

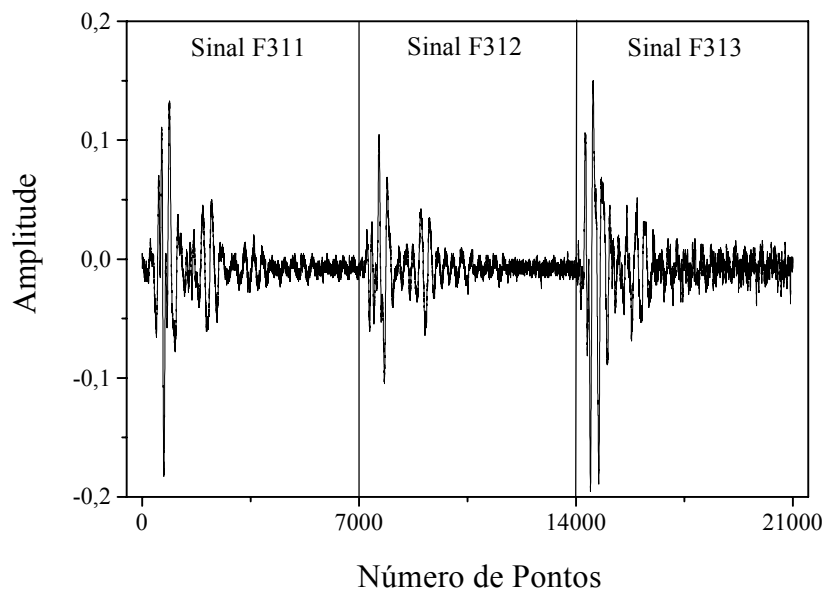


Figura 4.5. Grupo dos sinais F31 originais.

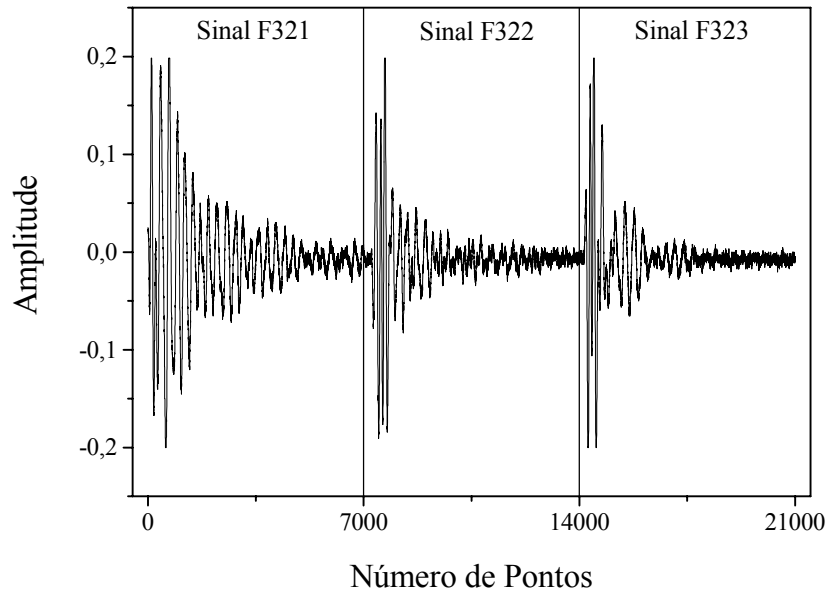


Figura 4.6. Grupo dos sinais F32 originais.

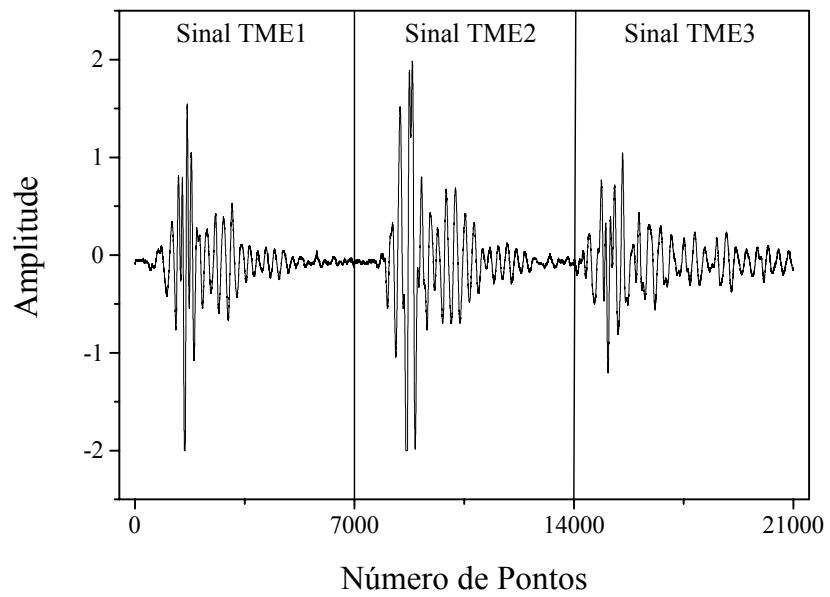


Figura 4.7. Grupo dos sinais TME originais.

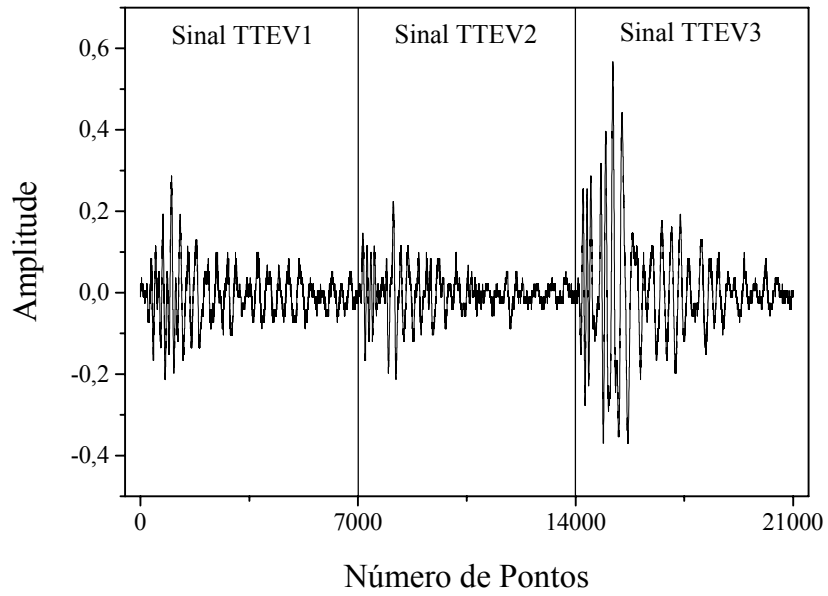


Figura 4.8. Grupo dos sinais TTEV originais.

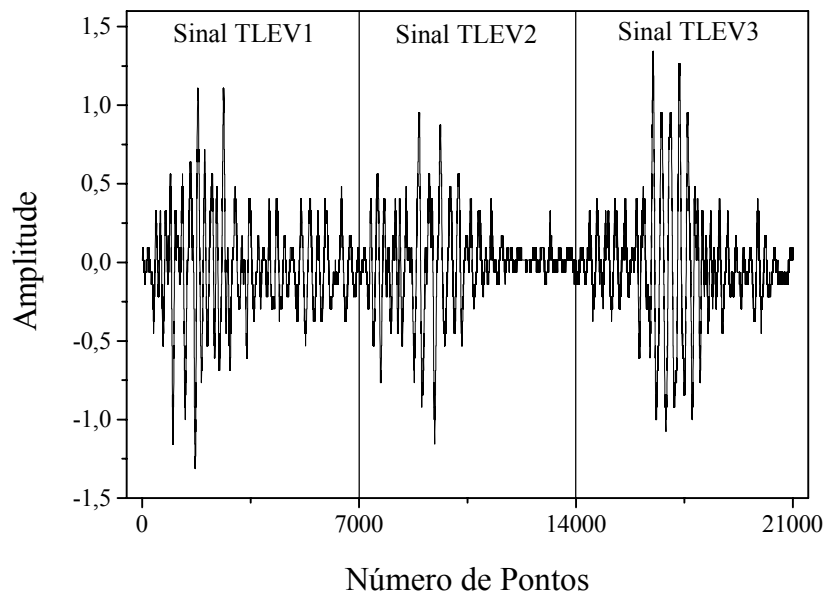


Figura 4.9. Grupo dos sinais TLEV originais.

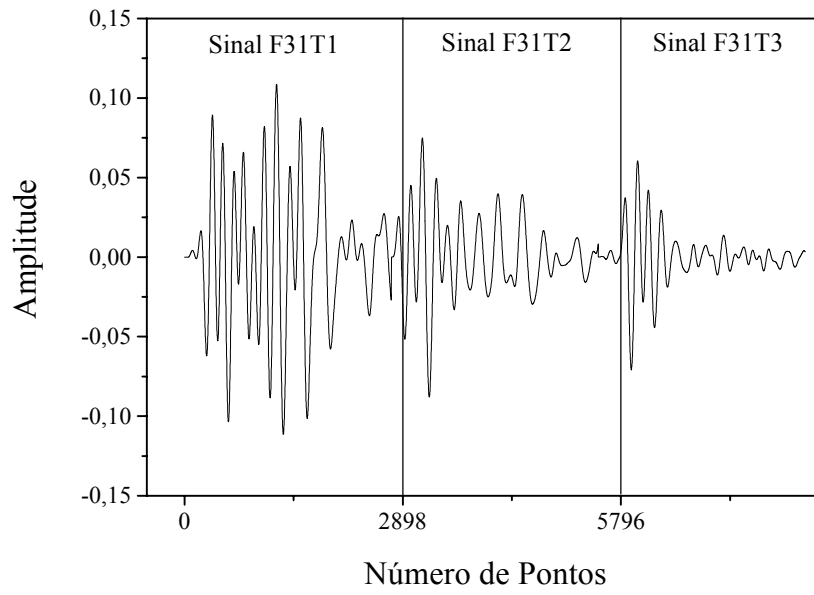


Figura 4.10. Grupo dos sinais F31T processados.

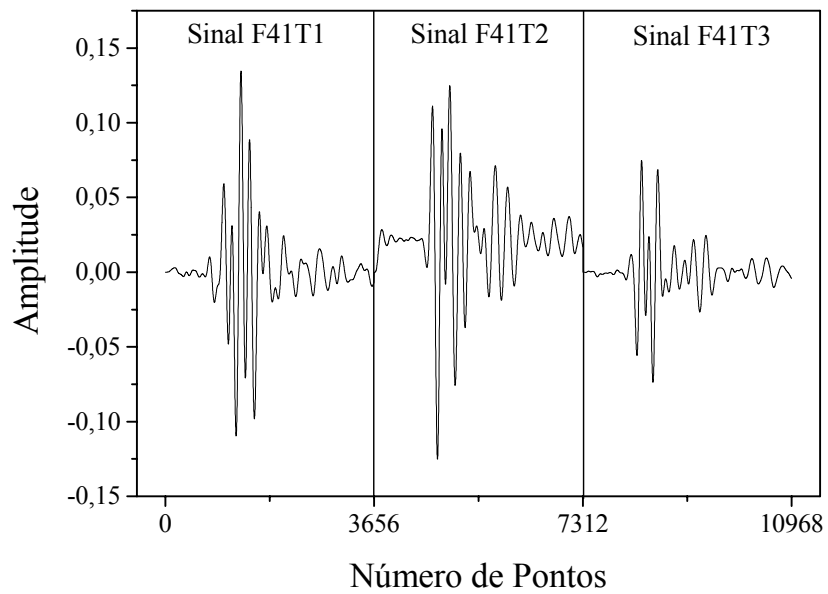


Figura 4.11. Grupo dos sinais F41T processados.

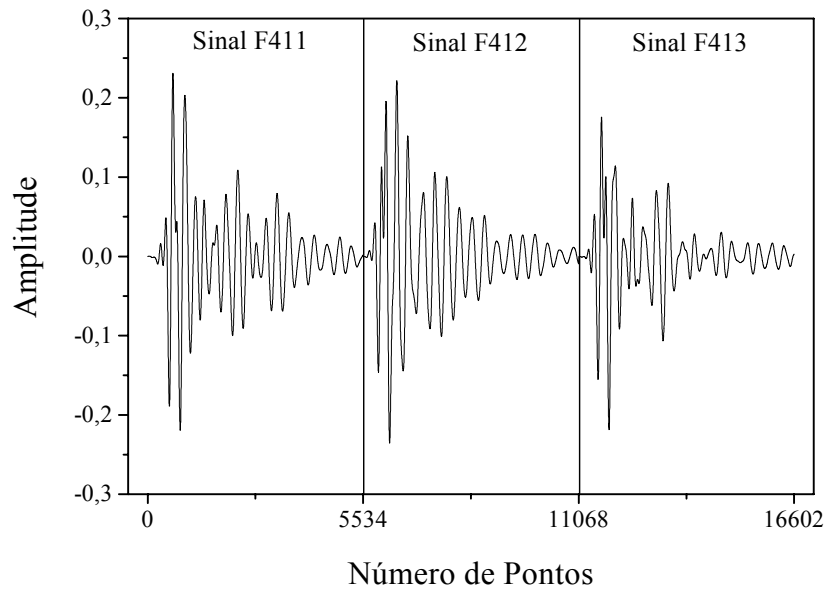


Figura 4.12. Grupo dos sinais F41 processados.

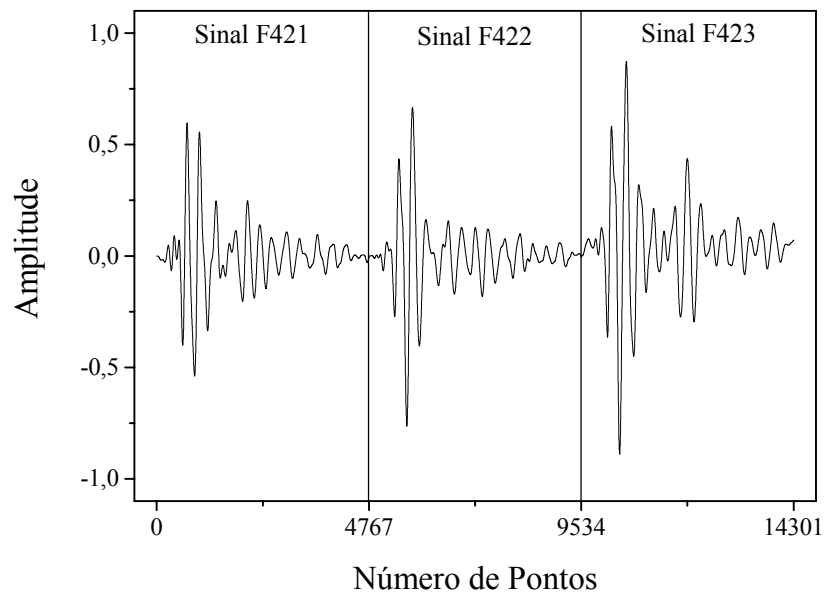


Figura 4.13. Grupo dos sinais F42 processados.

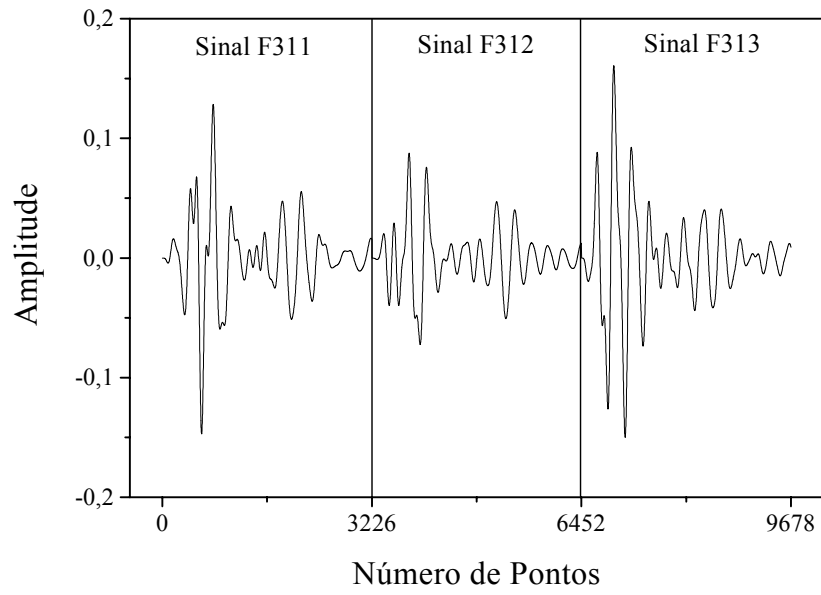


Figura 4.14. Grupo dos sinais F31 processados.

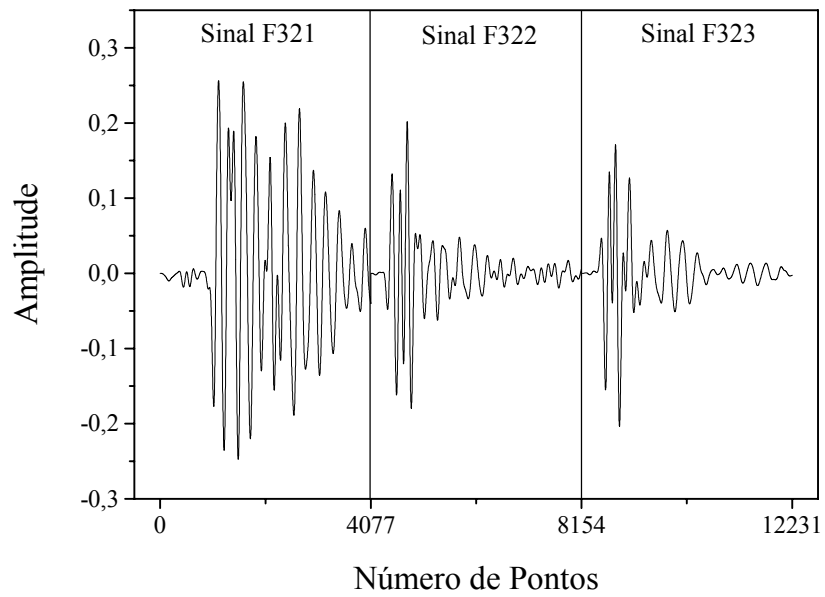


Figura 4.15. Grupo dos sinais F32 processados.

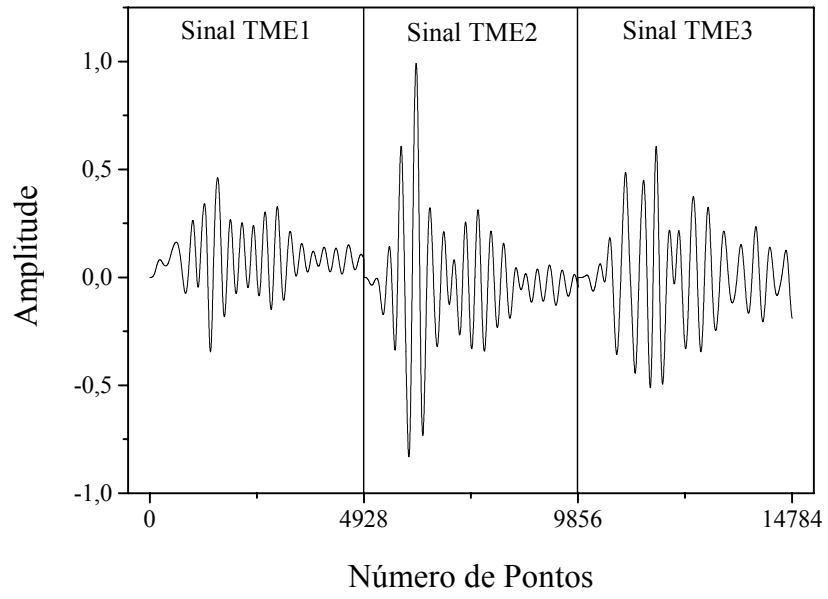


Figura 4.16. Grupo dos sinais TME processados.

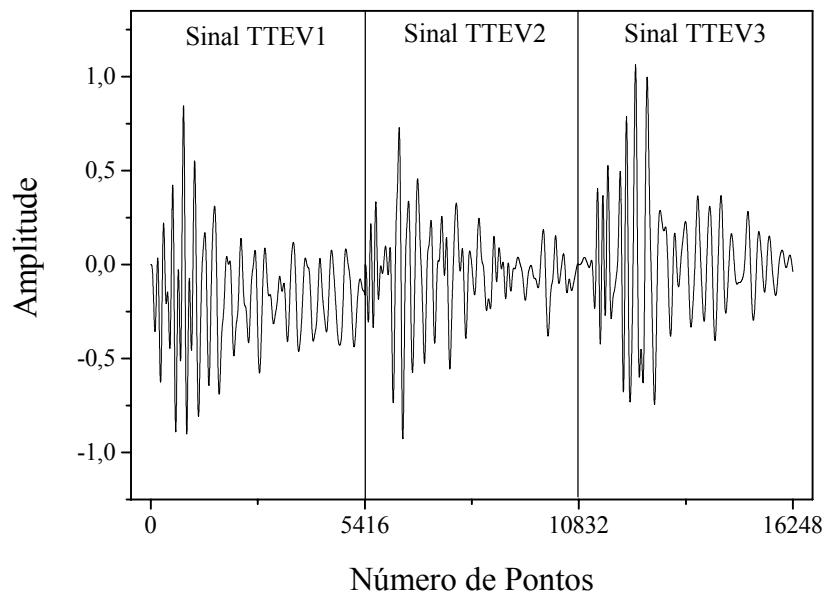


Figura 4.17. Grupo dos sinais TTEV processados.

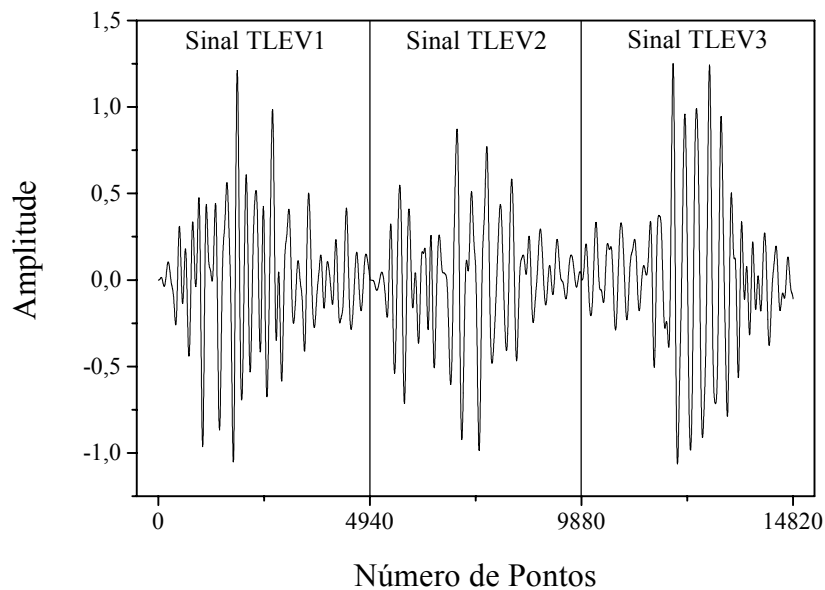


Figura 4.18. Grupo dos sinais TLEV processados.

4.3. ANÁLISES DE CONTAGEM DE CAIXAS, R/S E ESPECTRAL DOS SINAIS ORIGINAIS

Os gráficos seguintes são os resultados das análises de contagem de caixas (figuras 4.19 a 4.27), R/S (figuras 4.28 a 4.36) e espectral (figuras 4.37 a 4.45) dos sinais originais. Para os dois primeiros métodos, têm-se as curvas sobrepostas e as retas correspondentes às regressões lineares médias de cada regime observado. Na análise espectral não foi feita a sobreposição das curvas, pois as mesmas se mostraram muito ruidosas e isso impossibilitaria a visualização das duas regiões de forma bem caracterizada. Então, preferiu-se escolher apenas um sinal de cada grupo e neste caso foi escolhido apenas o primeiro sinal.

As inclinações das retas representam os valores das dimensões fractais – D , dos expoentes de Hurst – H e dos expoentes de escala de potência – ϕ (considerar valor absoluto), dos regimes. Para realçar, os símbolos utilizados têm os seguintes significados:

- O Curva do método de análise para o 1º sinal do grupo correspondente.
- Δ Curva do método de análise para o 2º sinal do grupo correspondente.
- Curva do método de análise para o 3º sinal do grupo correspondente.
- Regressão linear do regime observado (no caso de apenas uma curva exibida) ou regressão linear média para os casos em que se tem as três curvas sobrepostas. ‘R’ é o coeficiente de ajuste linear da reta. O erro referente a H , D e ϕ representa um valor relativo percentual.

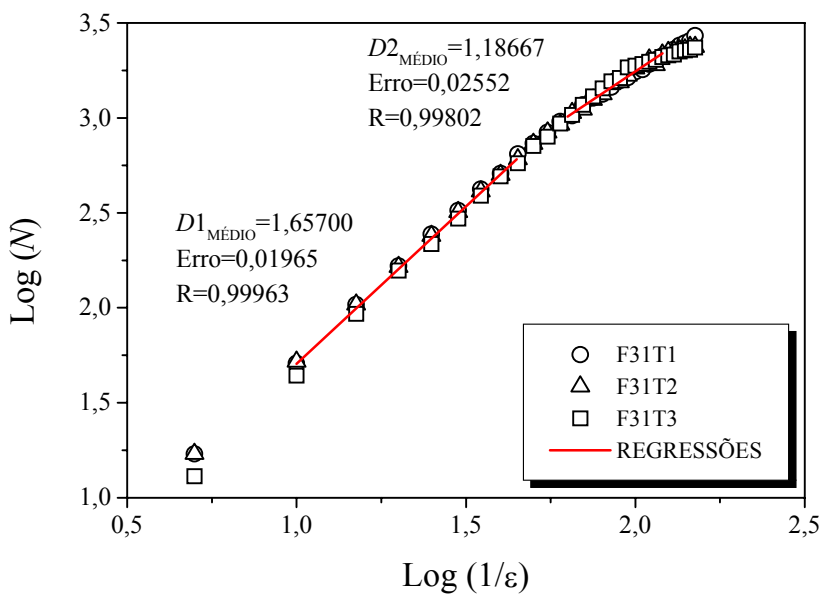


Figura 4.19. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais F31T originais.

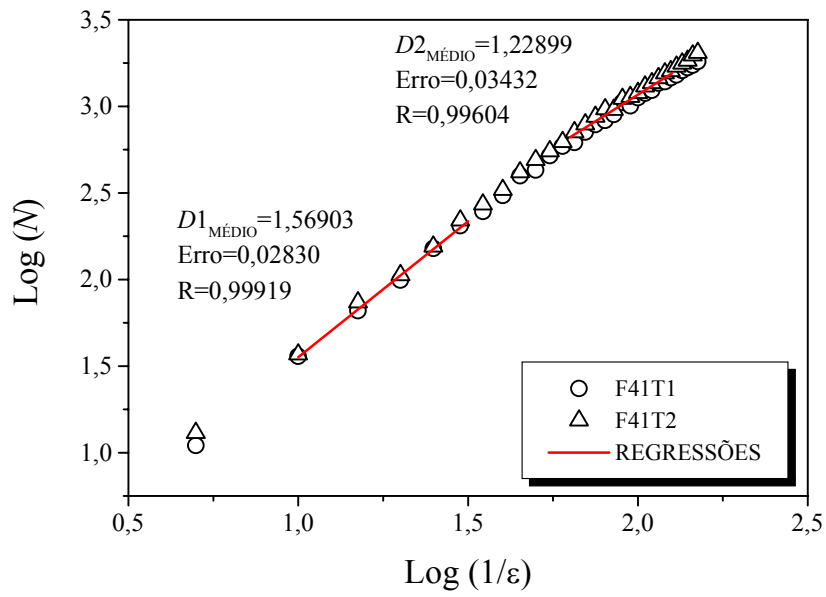


Figura 4.20. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais F41T originais.

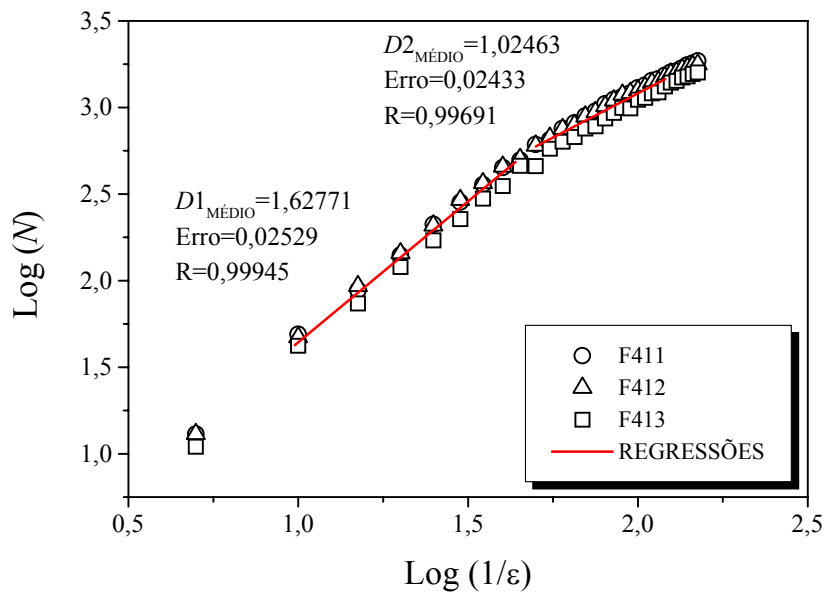


Figura 4.21. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais F41 originais.

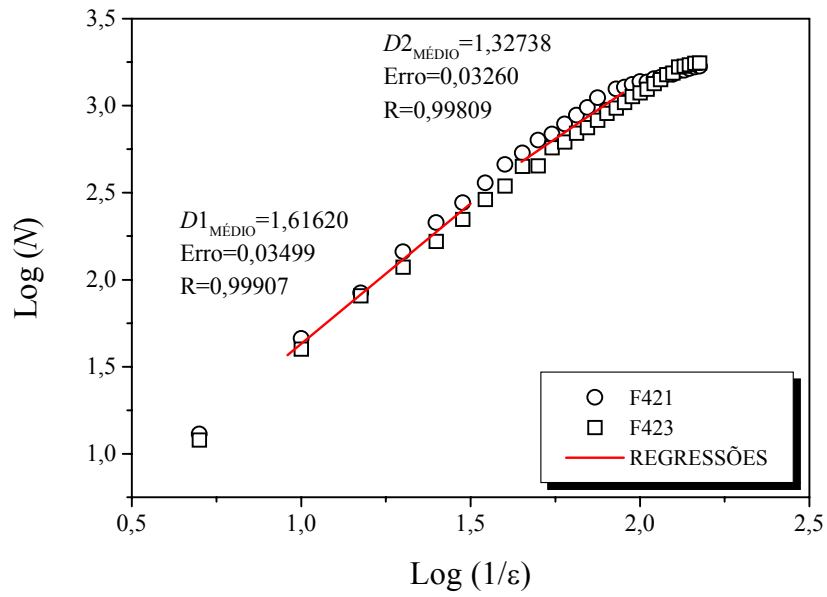


Figura 4.22. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais F42 originais.

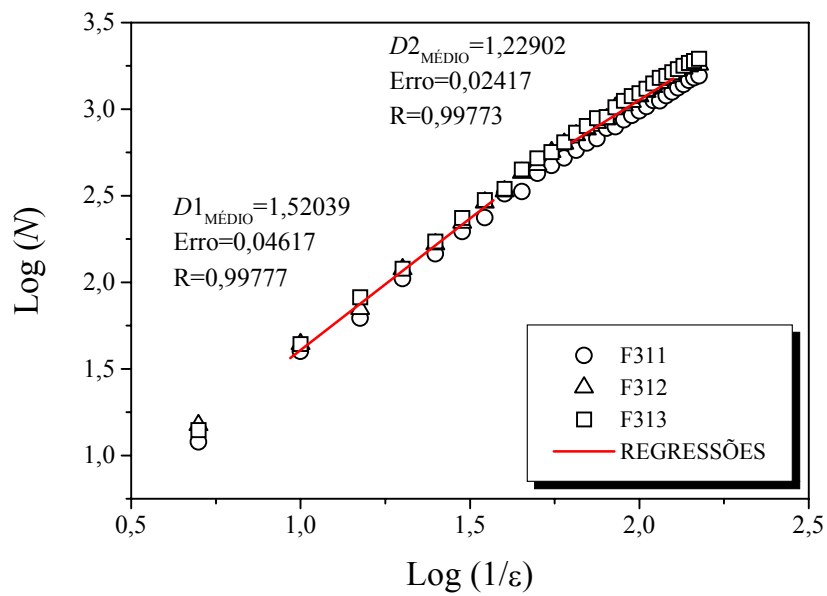


Figura 4.23. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais F31 originais.

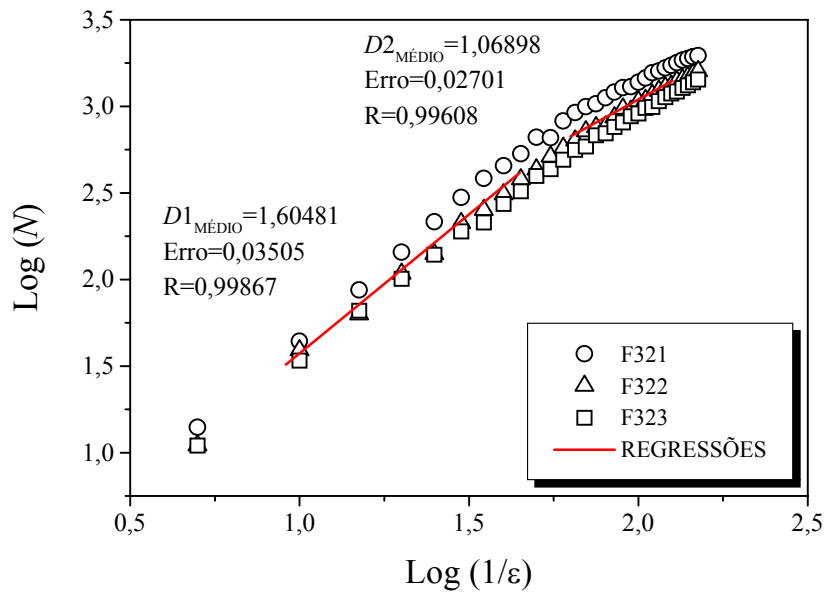


Figura 4.24. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais F32 originais.

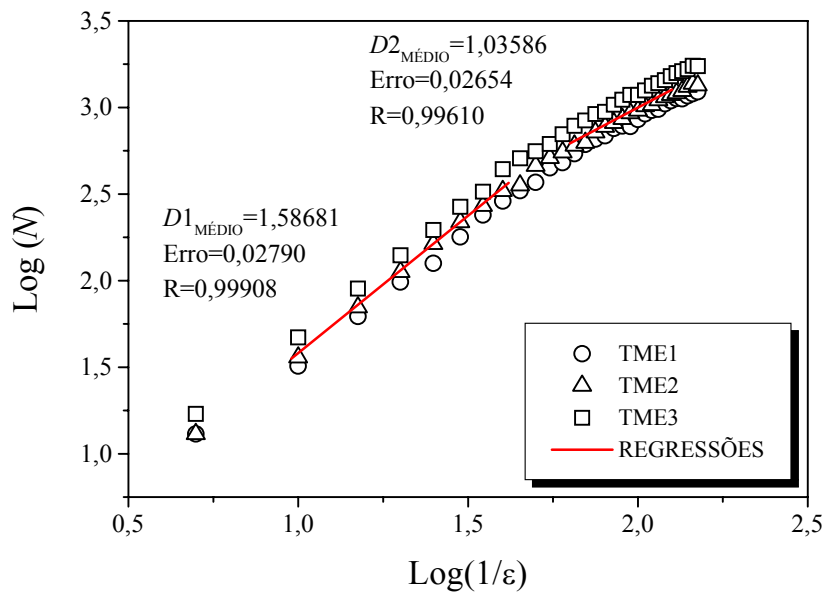


Figura 4.25. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais TME originais.

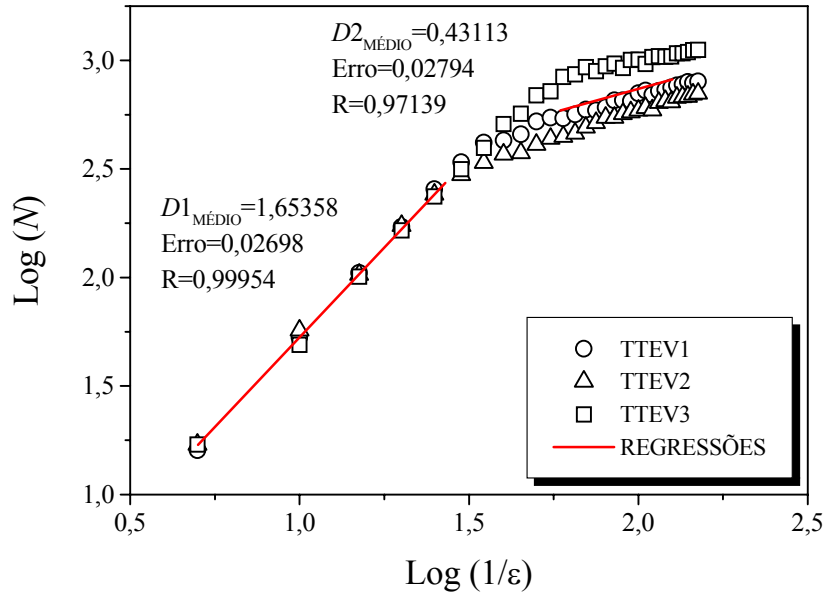


Figura 4.26. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais TTEV originais.

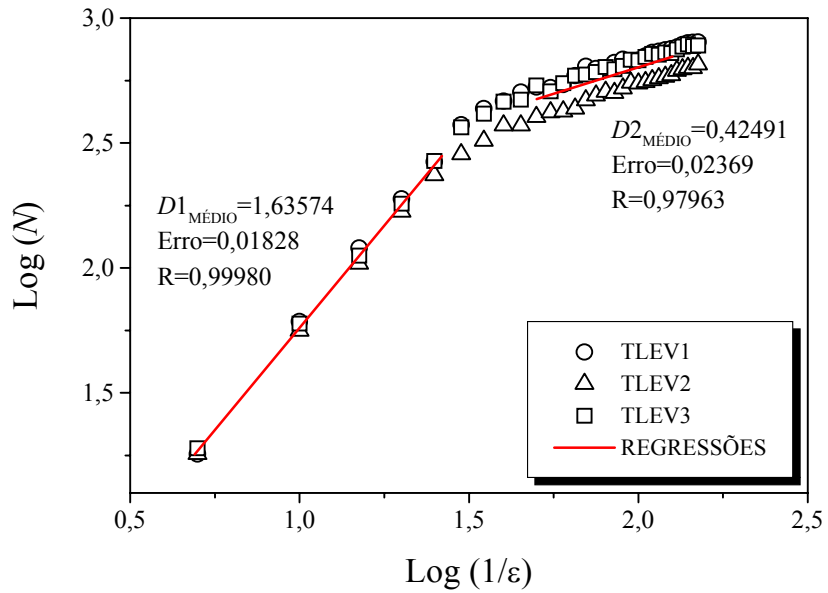


Figura 4.27. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais TLEV originais.

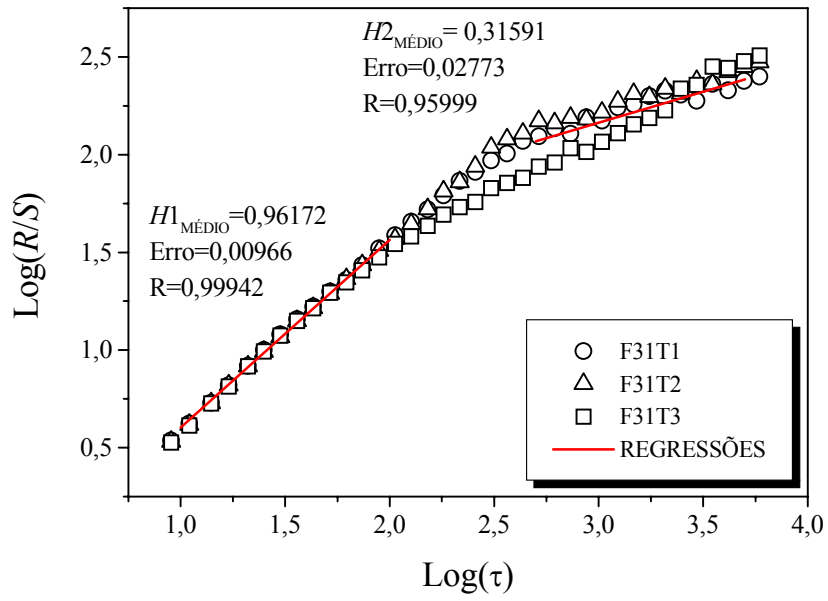


Figura 4.28. Análise R/S do grupo dos sinais F31T originais.

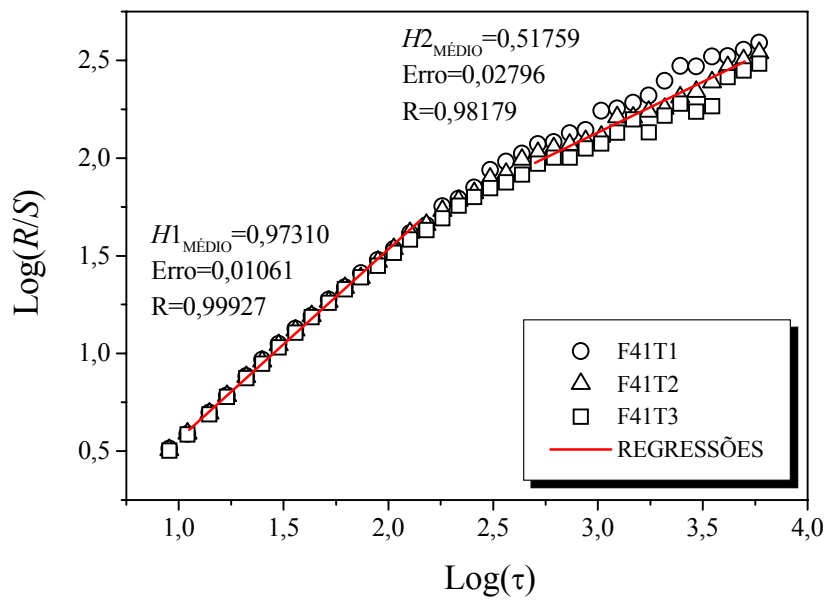


Figura 4.29. Análise R/S do grupo dos sinais F41T originais.

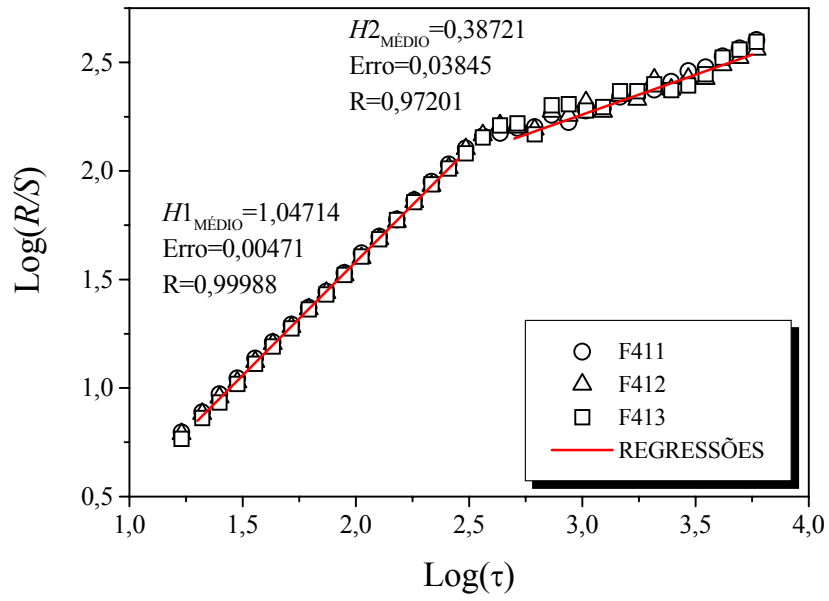


Figura 4.30. Análise R/S do grupo dos sinais F41 originais.

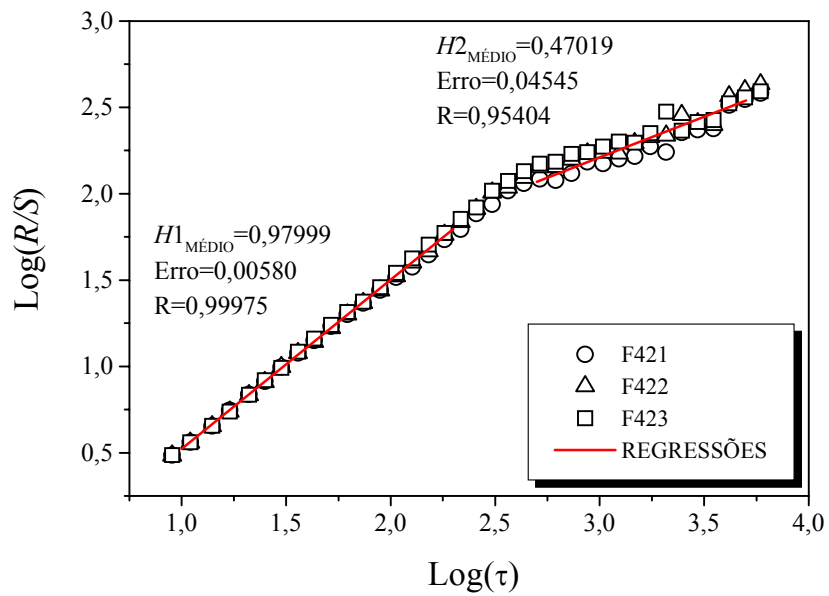


Figura 4.31. Análise R/S do grupo dos sinais F42 originais.

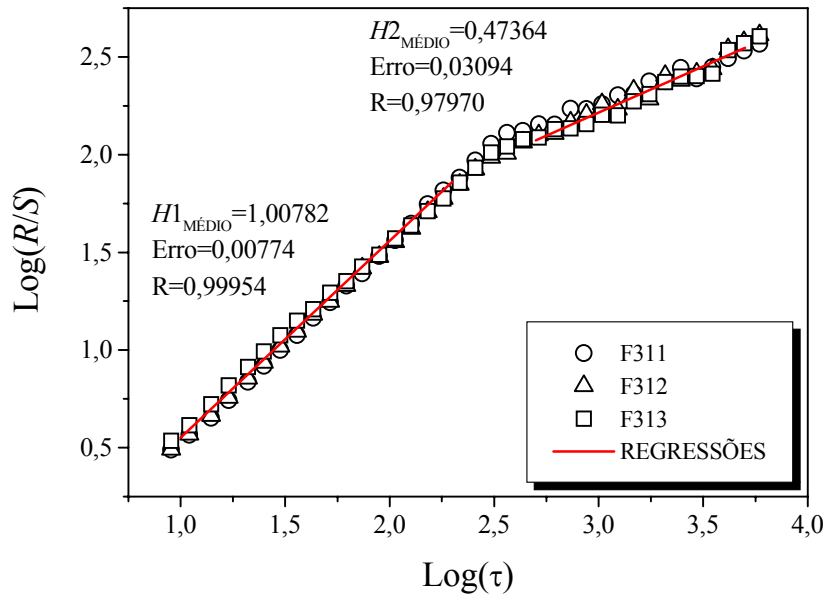


Figura 4.32. Análise R/S do grupo dos sinais F31 originais.

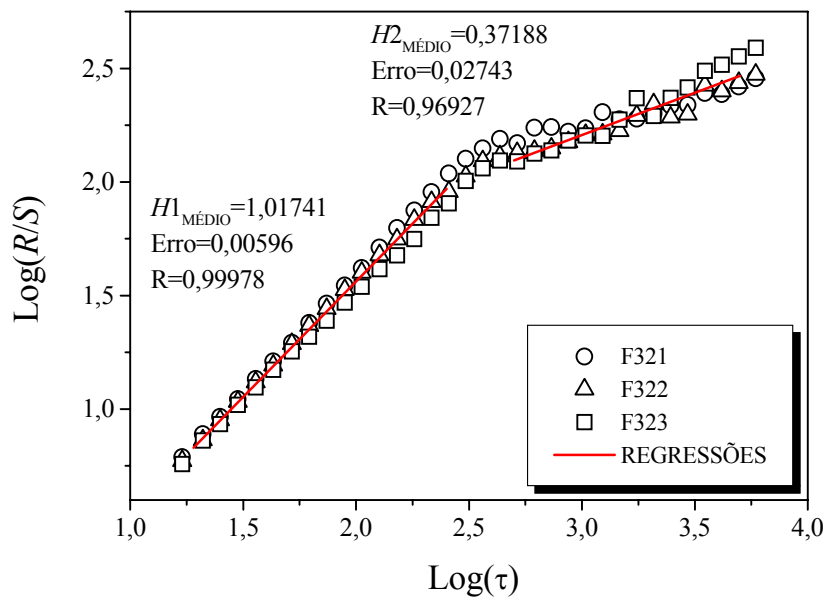


Figura 4.33. Análise R/S do grupo dos sinais F32 originais.

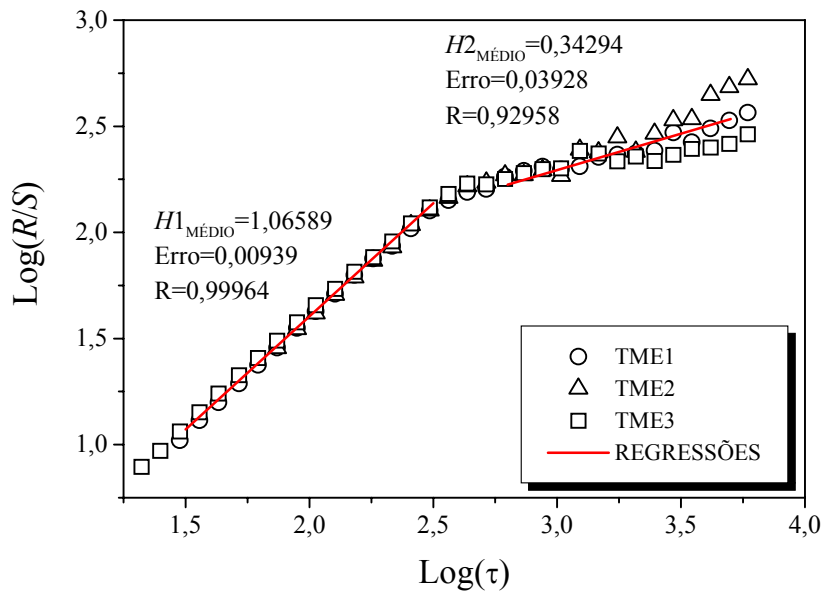


Figura 4.34. Análise R/S do grupo dos sinais TME originais.

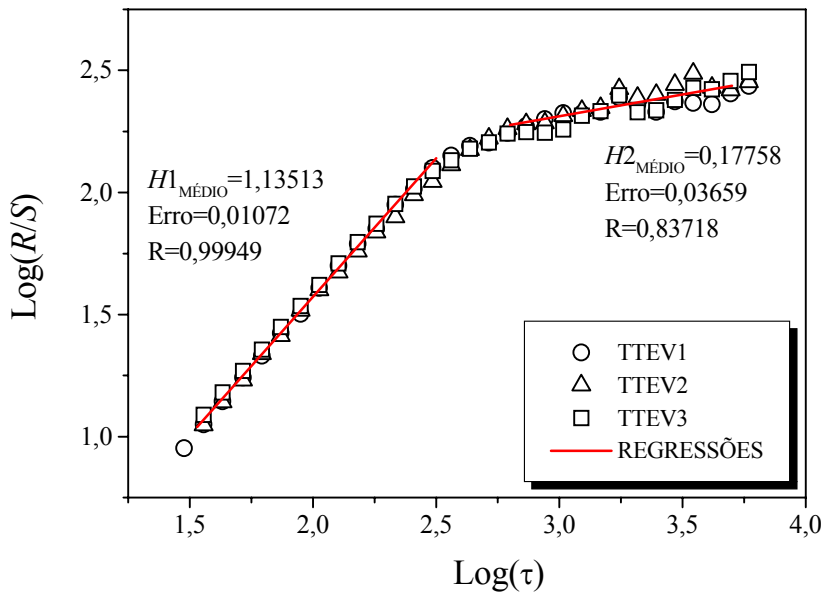


Figura 4.35. Análise R/S do grupo dos sinais TTEV originais.

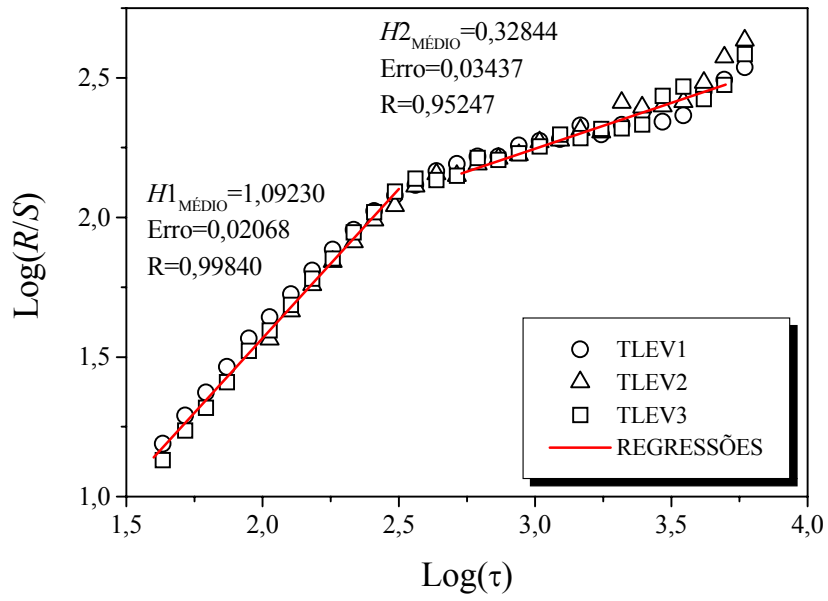


Figura 4.36. Análise R/S do grupo dos sinais TLEV originais.

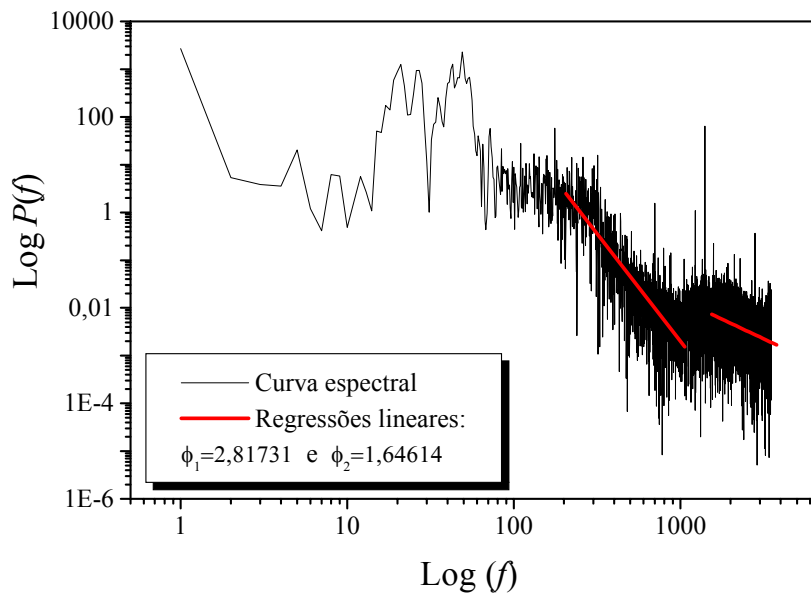


Figura 4.37. Análise espectral de Fourier do sinal F31T1 original.

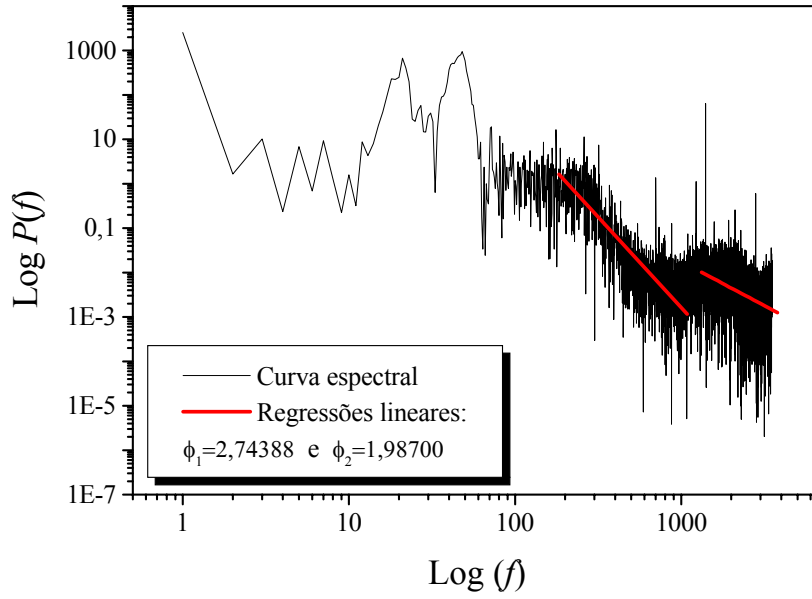


Figura 4.38. Análise espectral de Fourier do sinal F41T1 original.

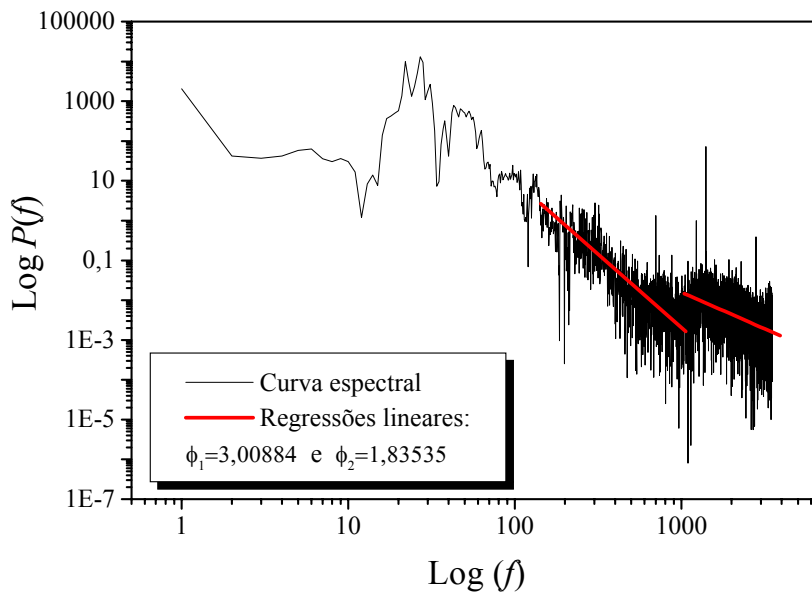


Figura 4.39. Análise espectral de Fourier do sinal F411 original.

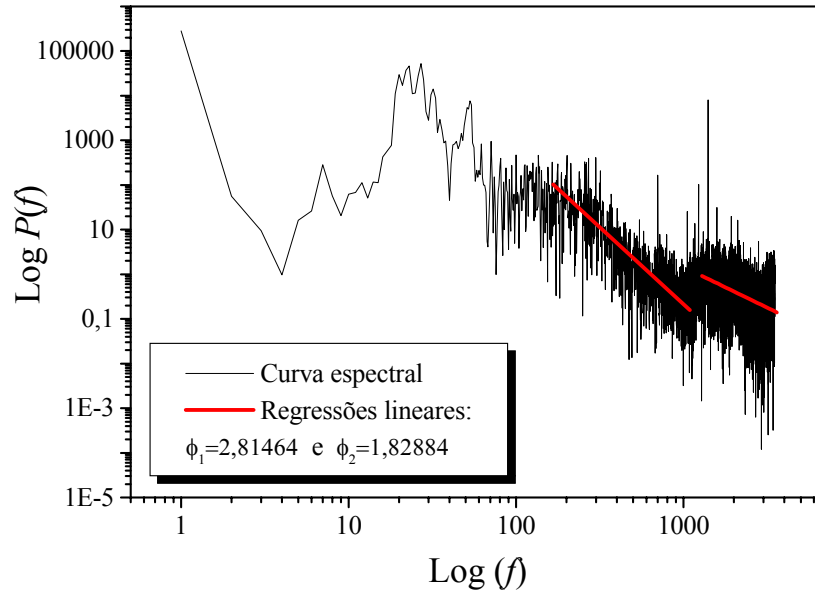


Figura 4.40. Análise espectral de Fourier do sinal F421 original.

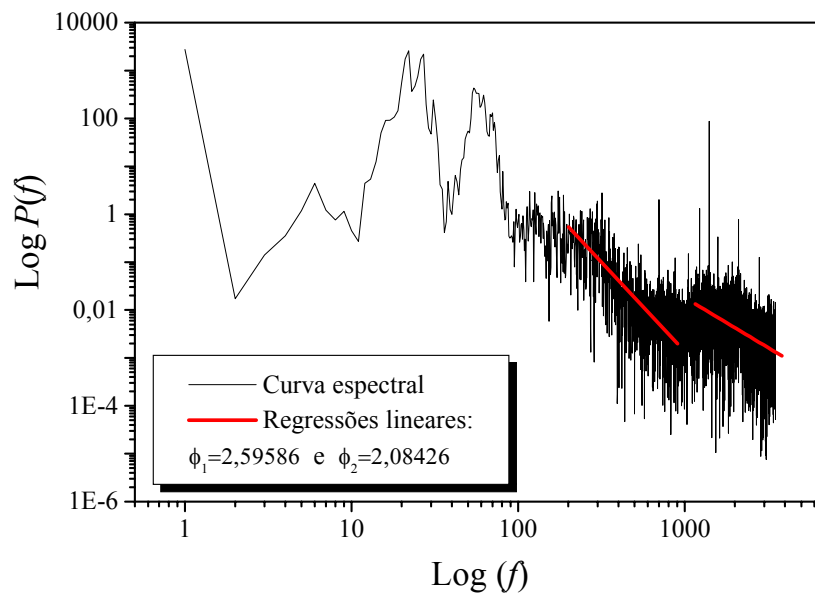


Figura 4.41. Análise espectral de Fourier do sinal F311 original.

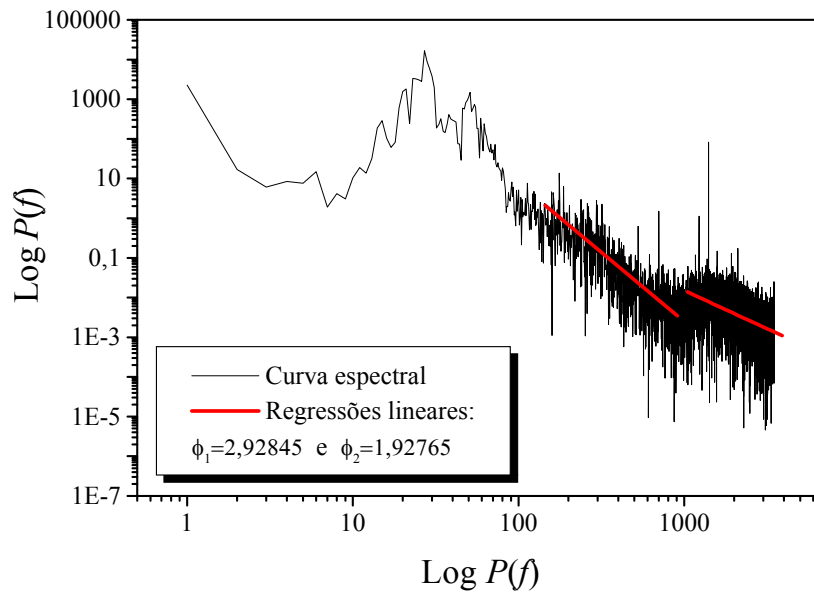


Figura 4.42. Análise espectral de Fourier do sinal F321 original.

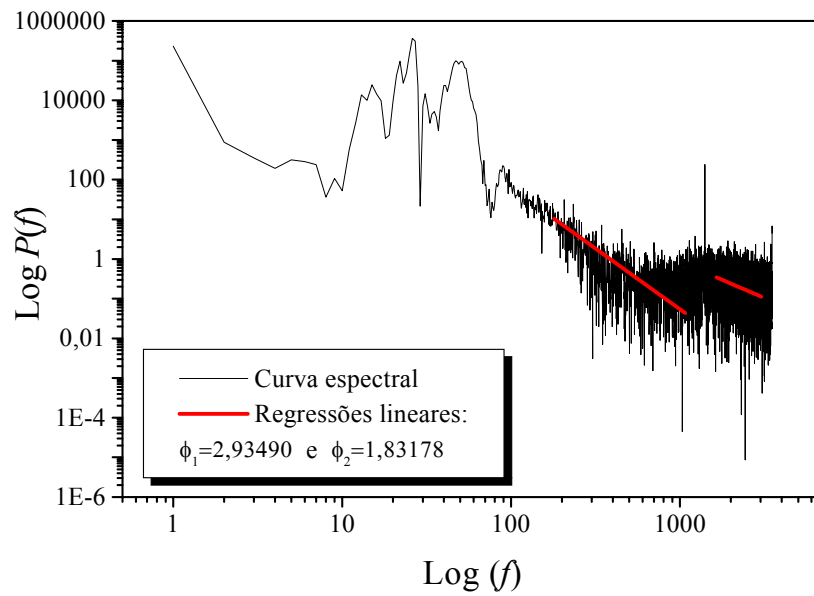


Figura 4.43. Análise espectral de Fourier do sinal TME1 original.

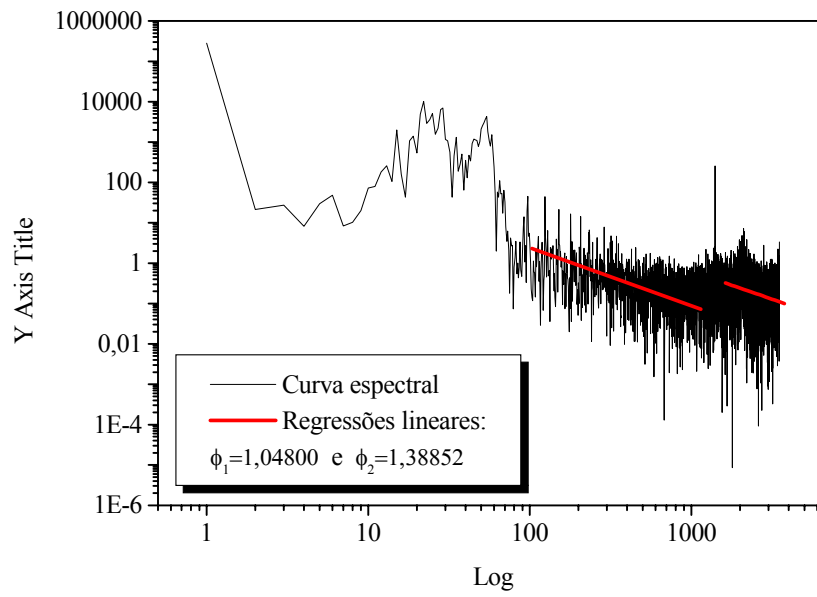


Figura 4.44. Análise espectral de Fourier do sinal TTEV1 original.

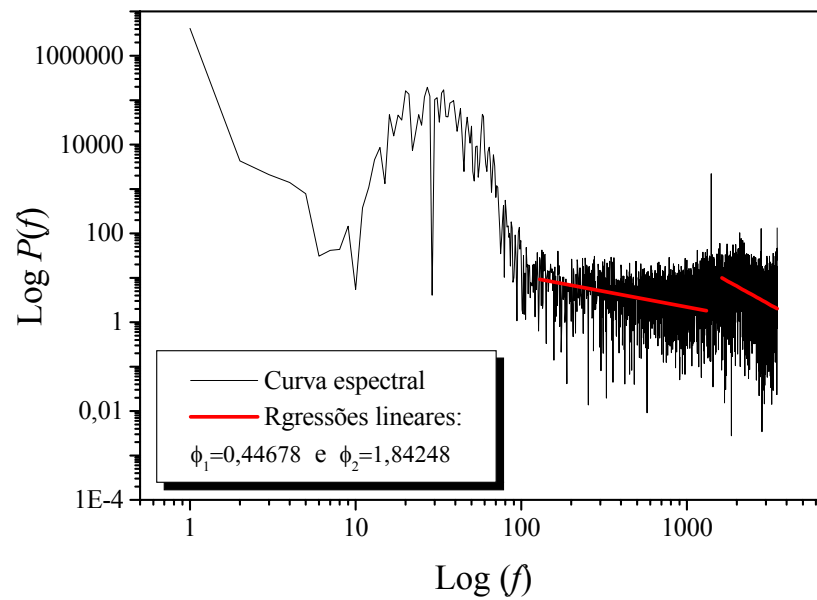


Figura 4.45. Análise espectral de Fourier do sinal TLEV1 original.

4.4. ANÁLISES DE CONTAGEM DE CAIXAS, R/S E ESPECTRAL DOS SINAIS PROCESSADOS

Os gráficos seguintes são os resultados das análises de contagem de caixas (figuras 4.46 a 4.54), R/S (figuras 4.55 a 4.63) e espectral (figuras 4.64 a 4.72) dos sinais processados. Para os dois primeiros métodos, têm-se as curvas sobrepostas e as retas correspondentes às regressões lineares médias de cada regime observado, similar ao que foi feito nas análises dos sinais originais. Na análise espectral preferiu-se mostrar apenas um sinal de cada grupo e para exemplificar foi escolhido o primeiro sinal, pois mesmo com as curvas mais suaves notou-se uma certa dificuldade em observá-las quando sobrepostas.

As inclinações das retas representam os valores das dimensões fractais – D , dos expoentes de Hurst – H e dos expoentes de escala de potência – ϕ (considerar valor absoluto), dos regimes. Os símbolos têm os mesmos significados daqueles usados para os sinais originais.

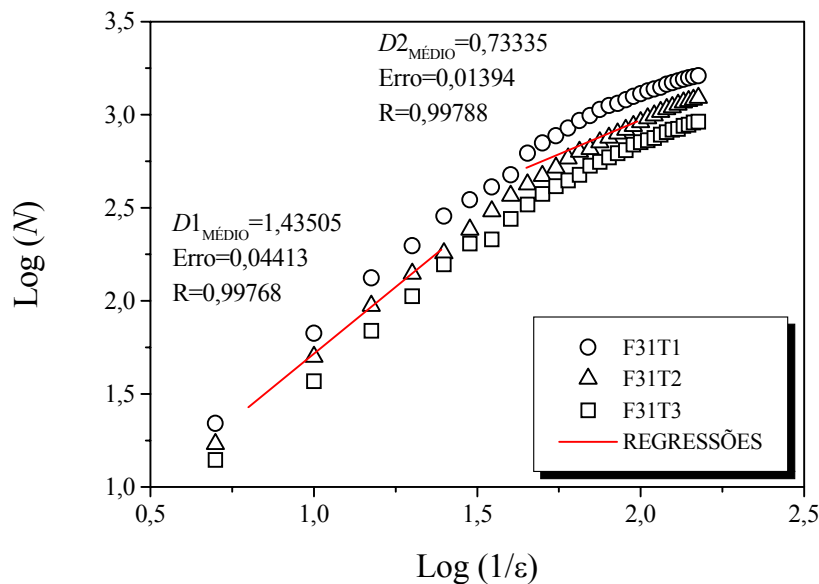


Figura 4.46. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais F31T processados.

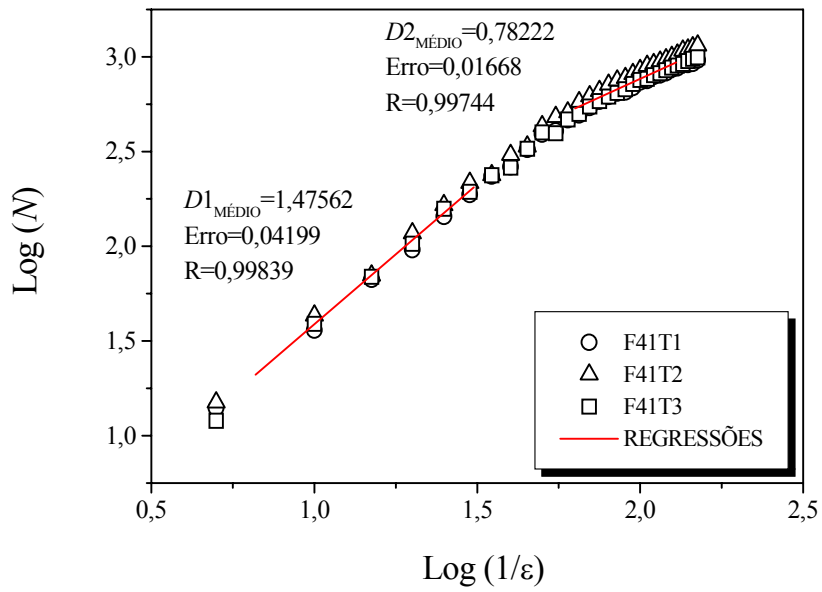


Figura 4.47. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais F41T processados.

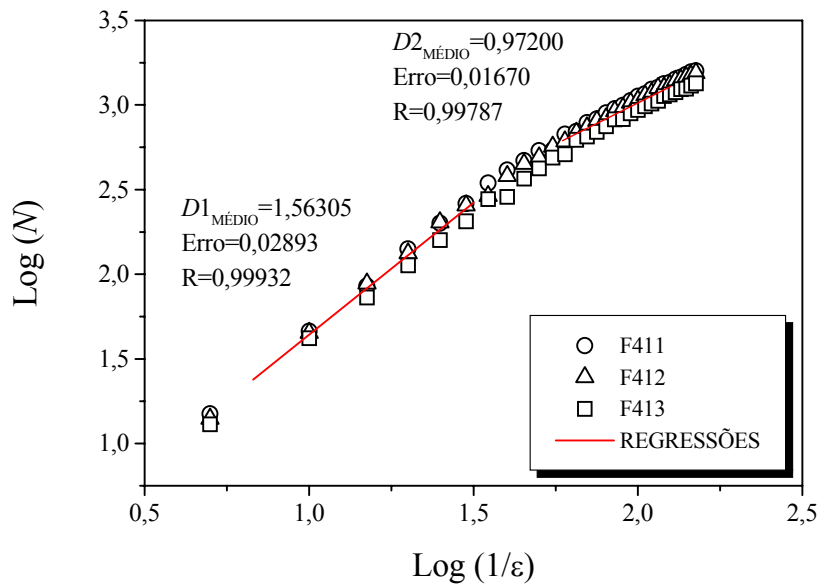


Figura 4.48. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais F41 processados.

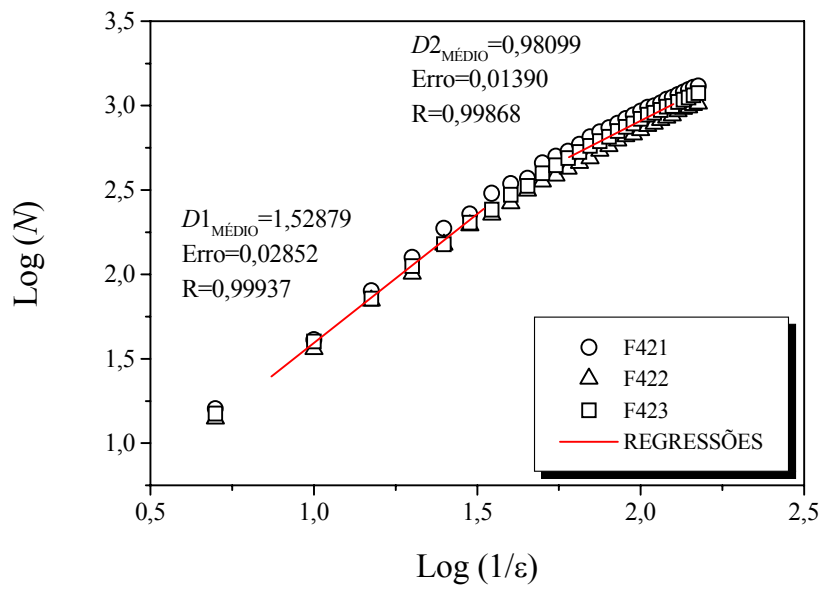


Figura 4.49. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais F42 processados.

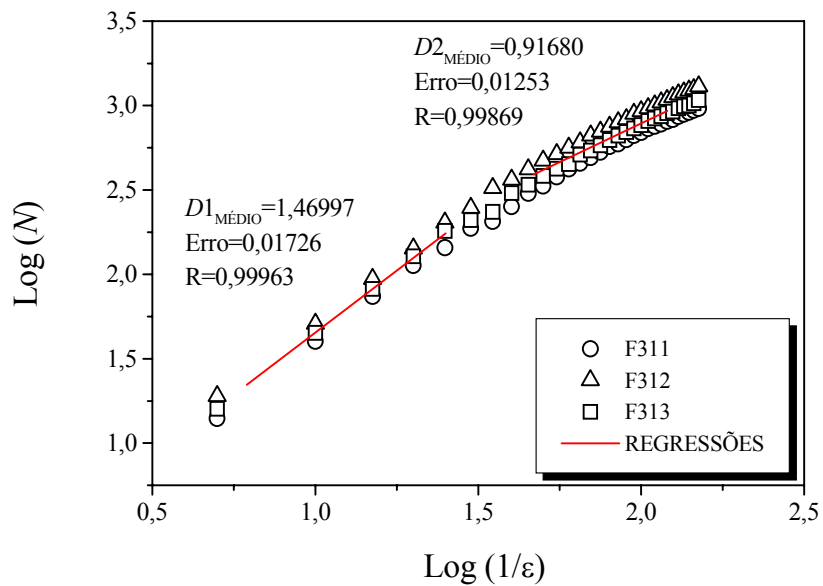


Figura 4.50. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais F31 processados.

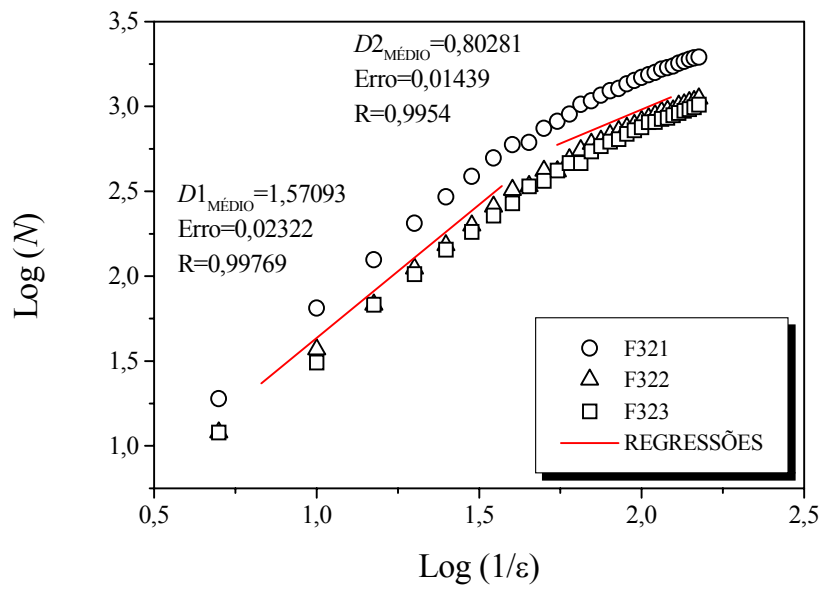


Figura 4.51. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais F32 processados.

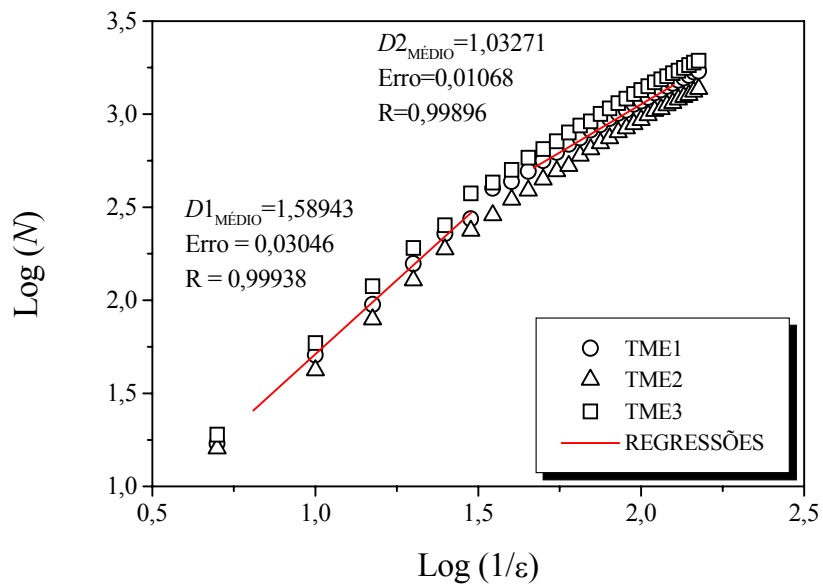


Figura 4.52. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais TME processados.

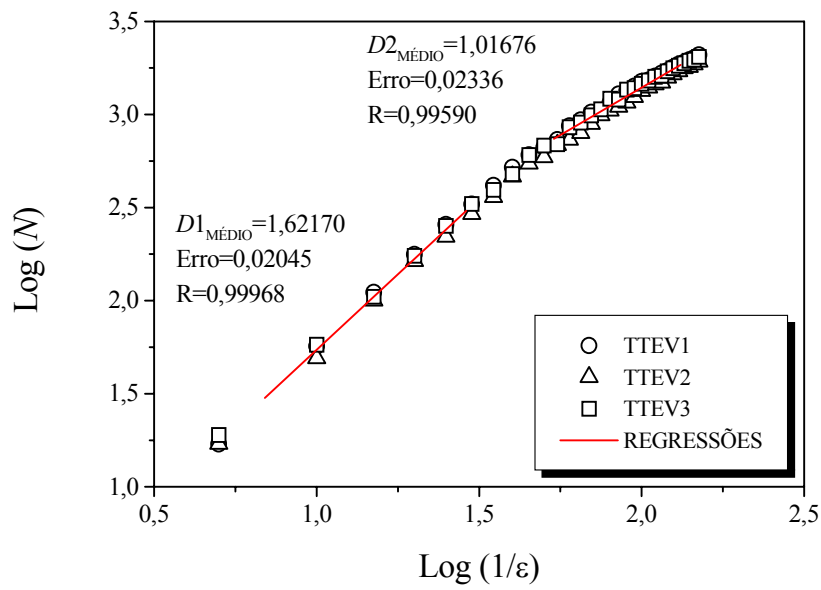


Figura 4.53. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais TTEV processados.

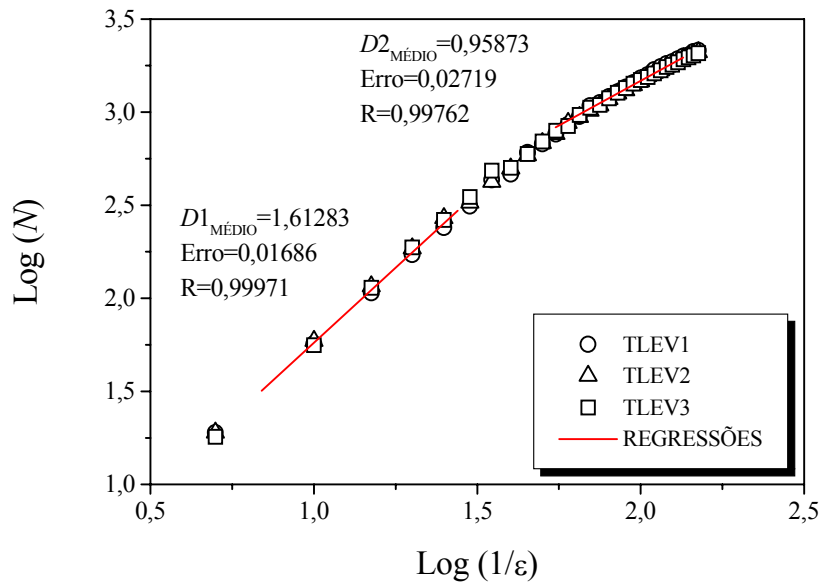


Figura 4.54. Análise de contagem de caixas do grupo dos sinais TLEV processados.

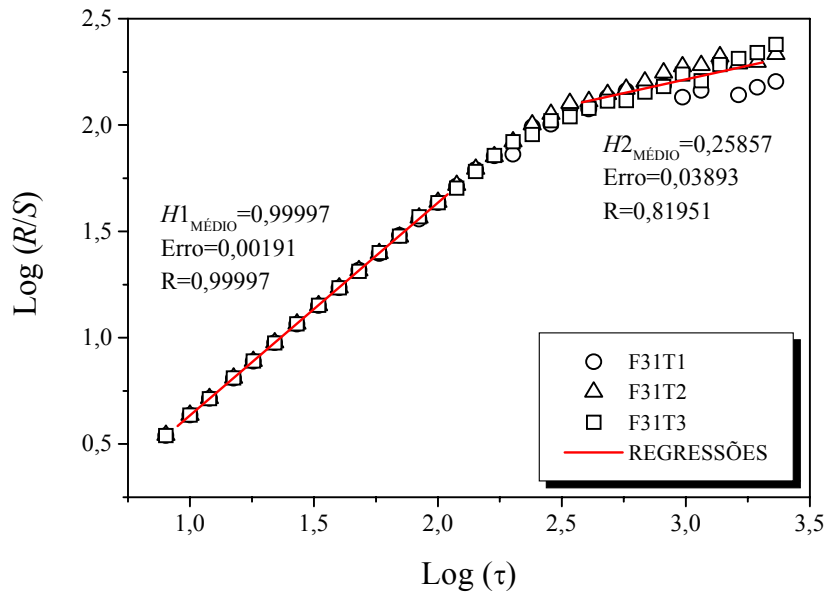


Figura 4.55. Análise R/S do grupo dos sinais F31T processados.

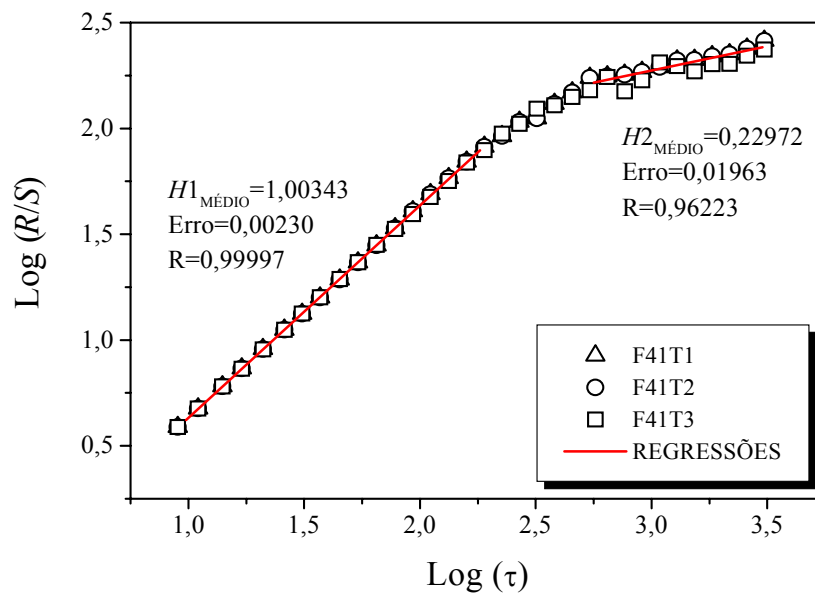


Figura 4.56. Análise R/S do grupo dos sinais F41T processados.

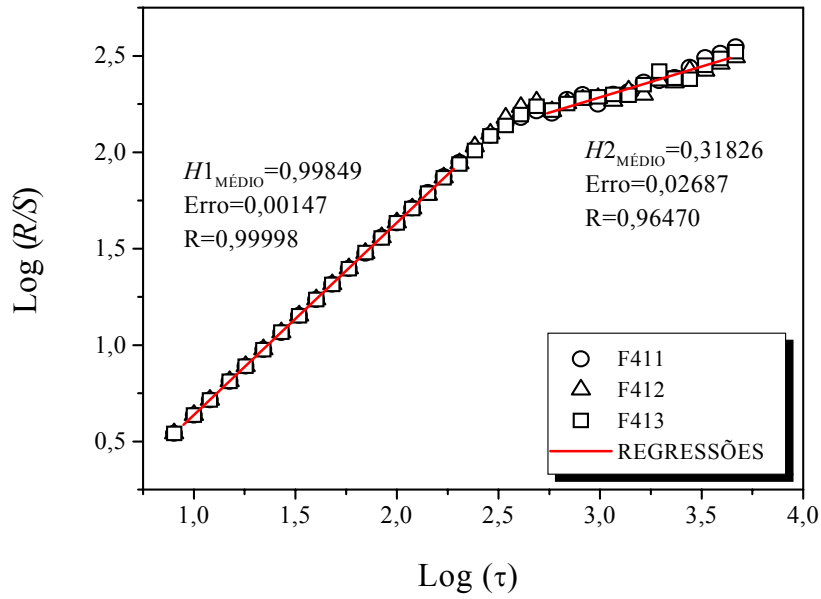


Figura 4.57. Análise R/S do grupo dos sinais F41 processados.

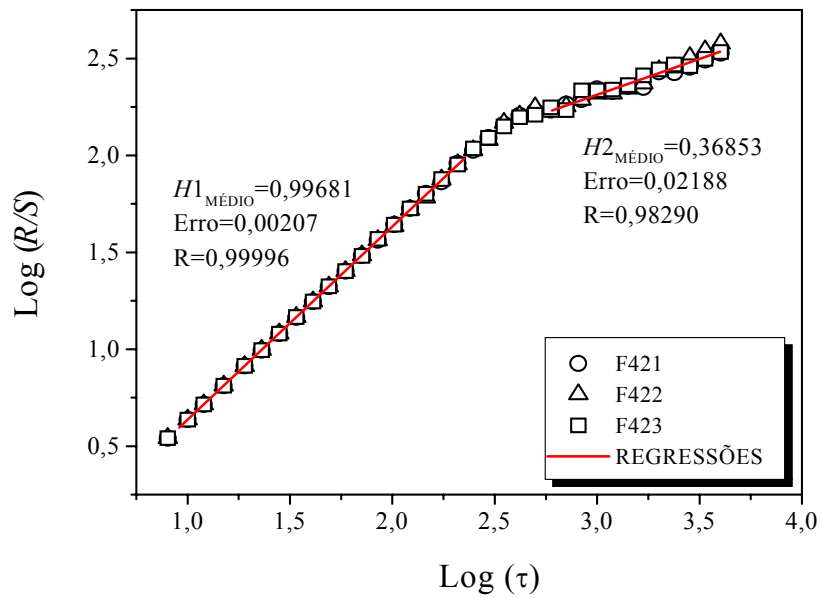


Figura 4.58. Análise R/S do grupo dos sinais F42 processados.

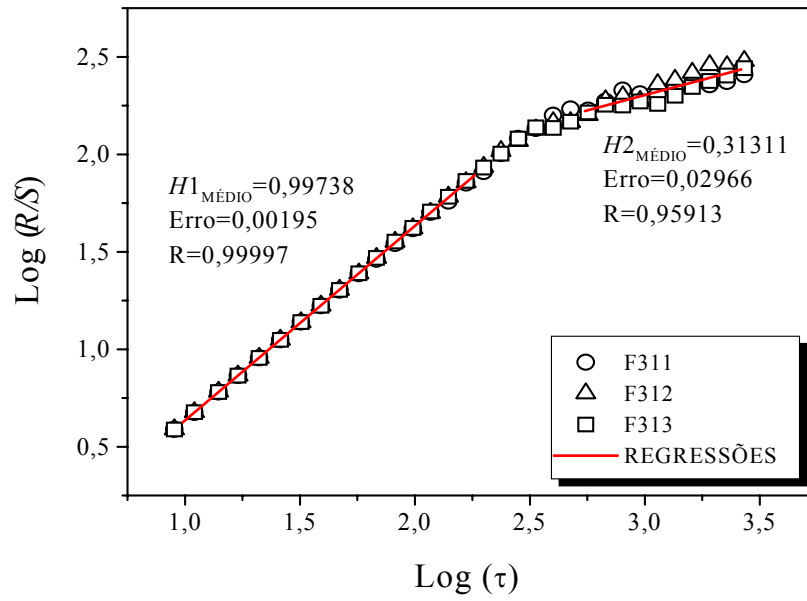


Figura 4.59. Análise R/S do grupo dos sinais F31 processados.

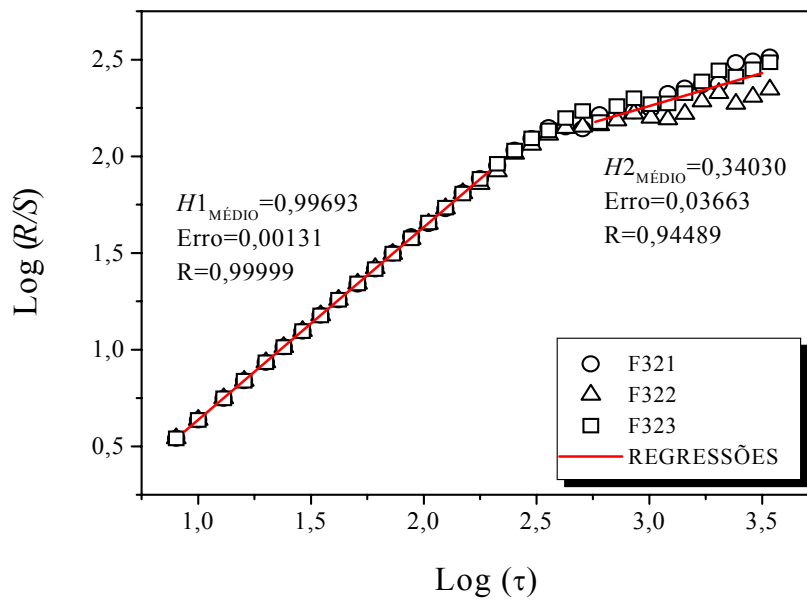


Figura 4.60. Análise R/S do grupo dos sinais F32 processados.

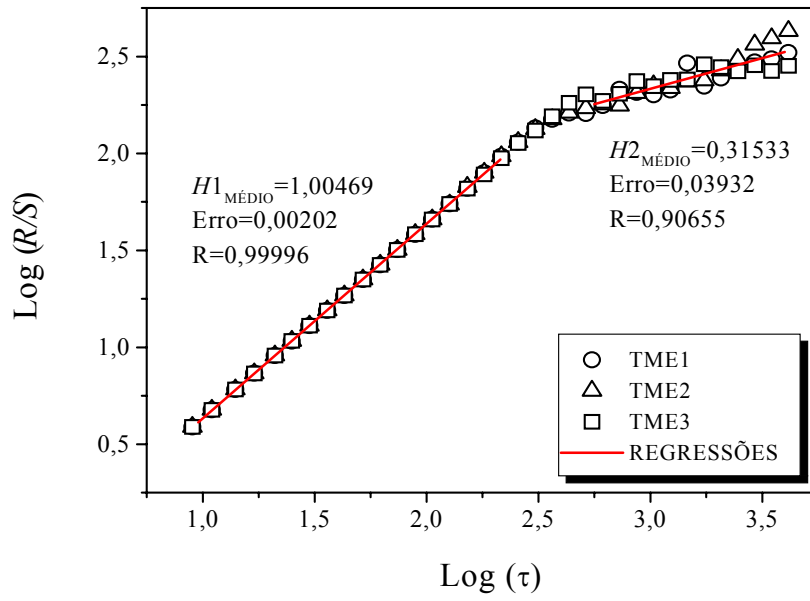


Figura 4.61. Análise R/S do grupo dos sinais TME processados.

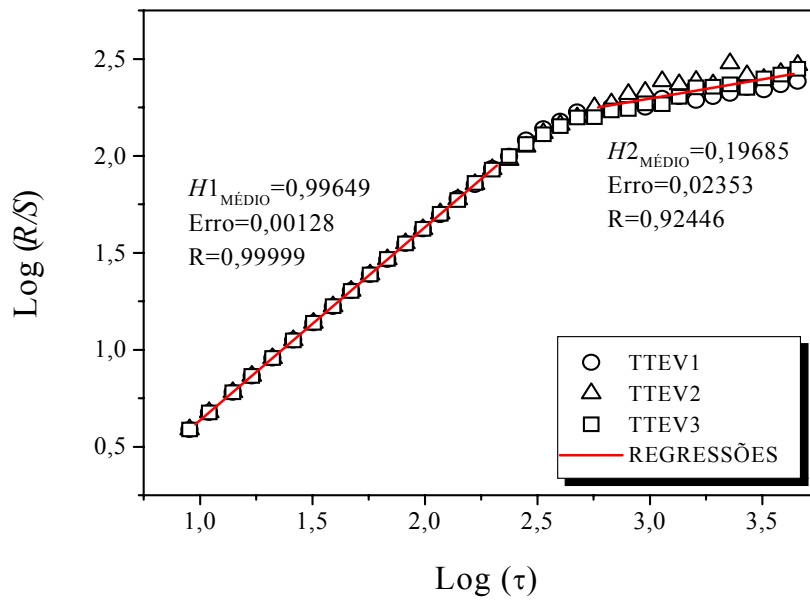


Figura 4.62. Análise R/S do grupo dos sinais TTEV processados.

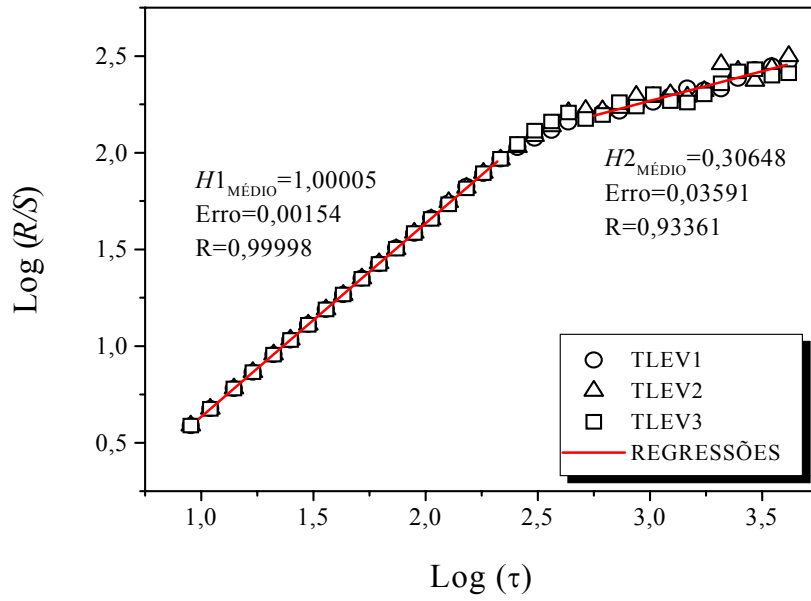


Figura 4.63. Análise R/S do grupo dos sinais TLEV processados.

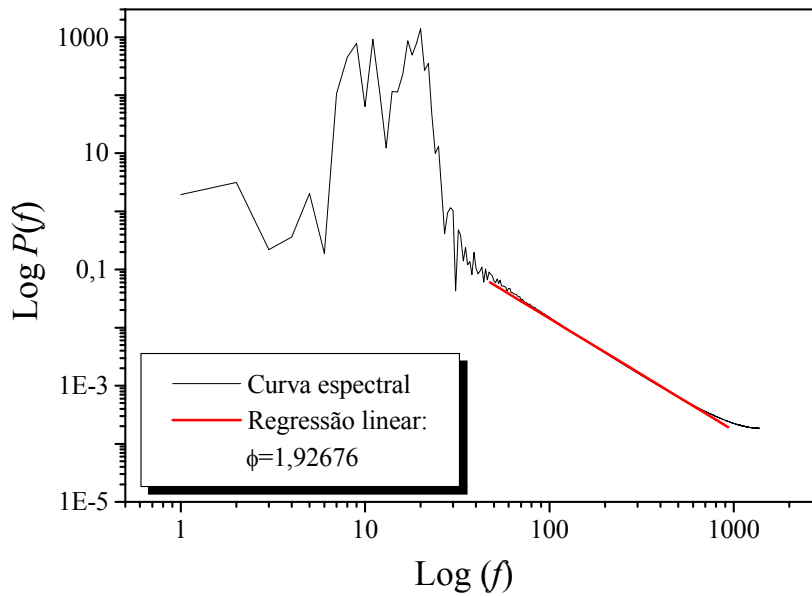


Figura 4.64. Análise espectral do sinal F31T1 processado.

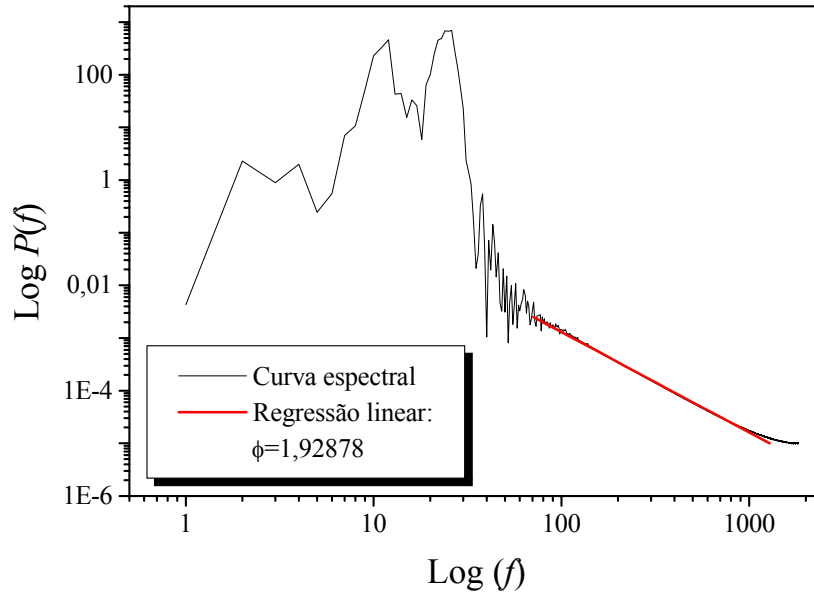


Figura 4.65. Análise espectral do sinal F41T1 processado.

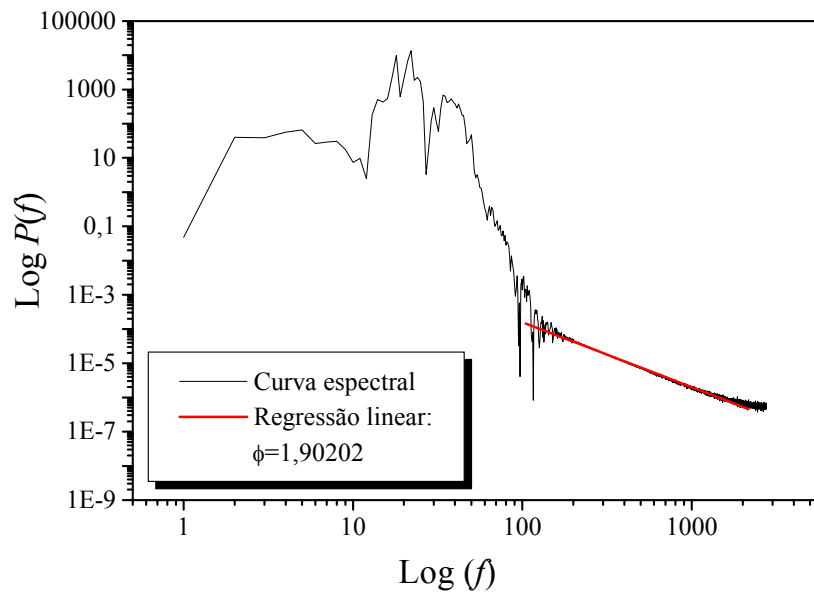


Figura 4.66. Análise espectral do sinal F411 processado.

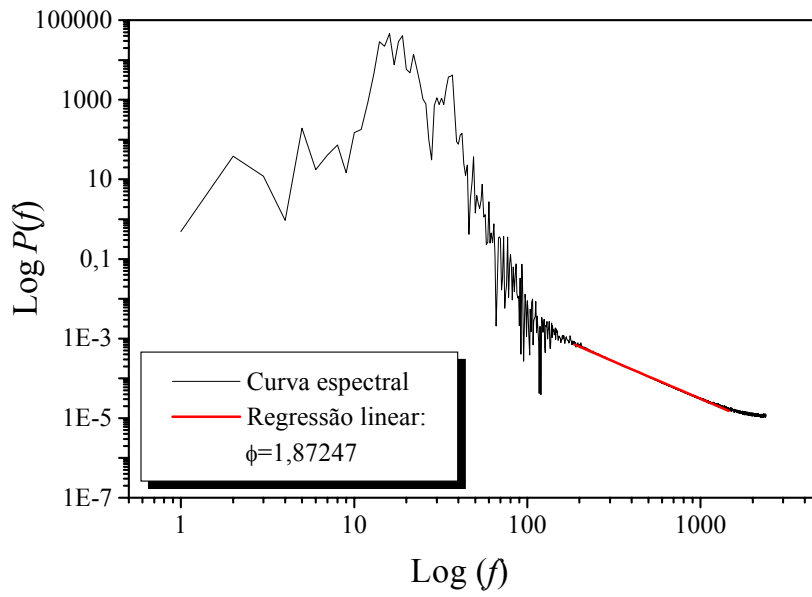


Figura 4.67. Análise espectral do sinal F421 processado.

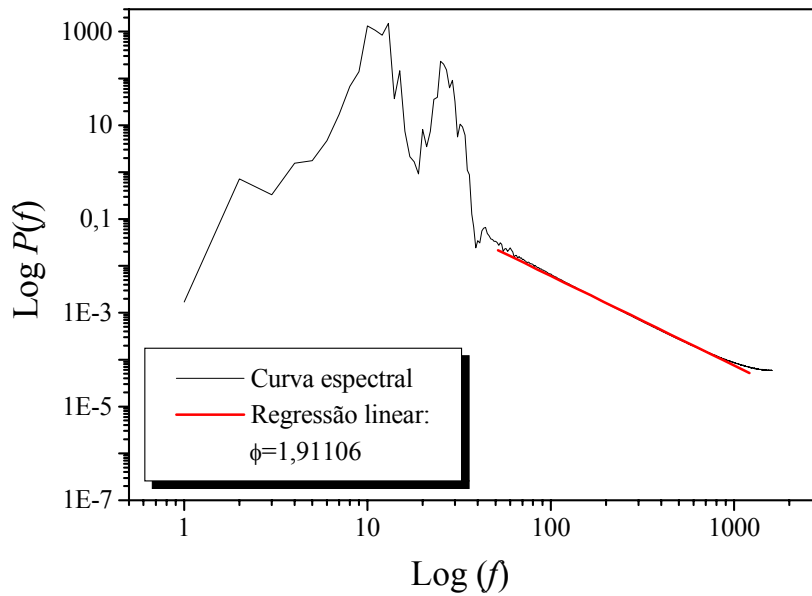


Figura 4.68. Análise espectral do sinal F311 processado.

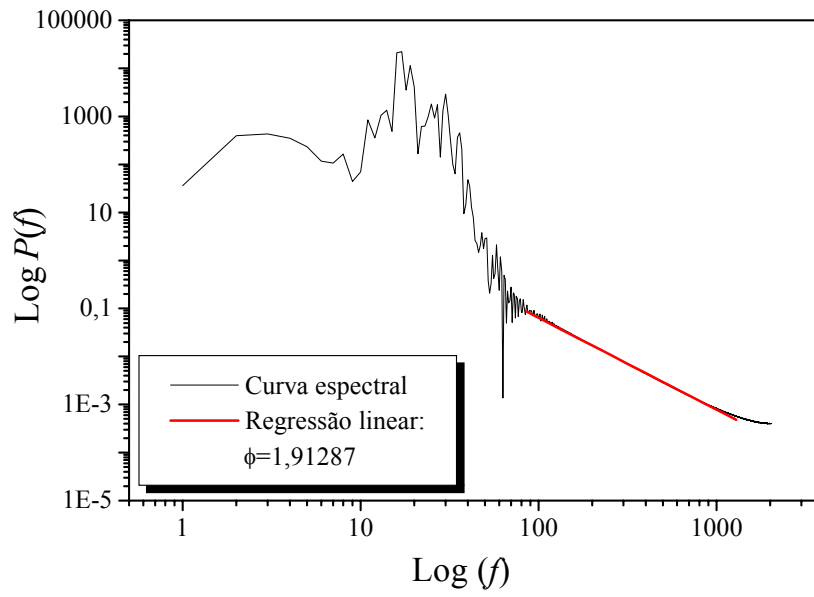


Figura 4.69. Análise espectral do sinal F321 processado.

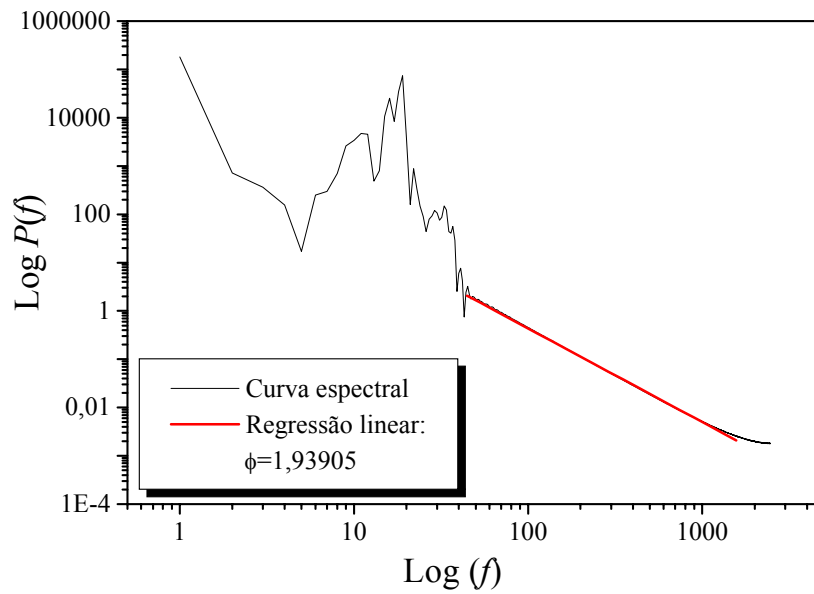


Figura 4.70. Análise espectral do sinal TME1 processado.

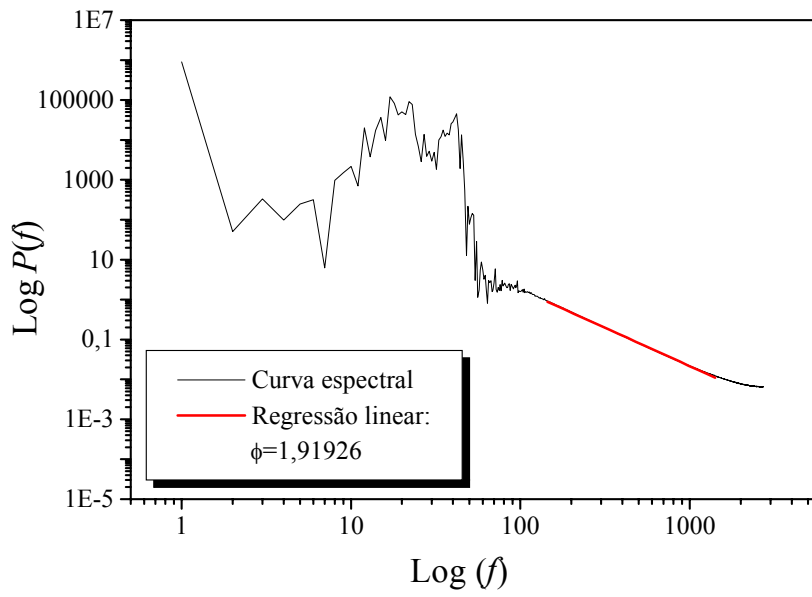


Figura 4.71. Análise espectral do sinal TTEV1 processado.

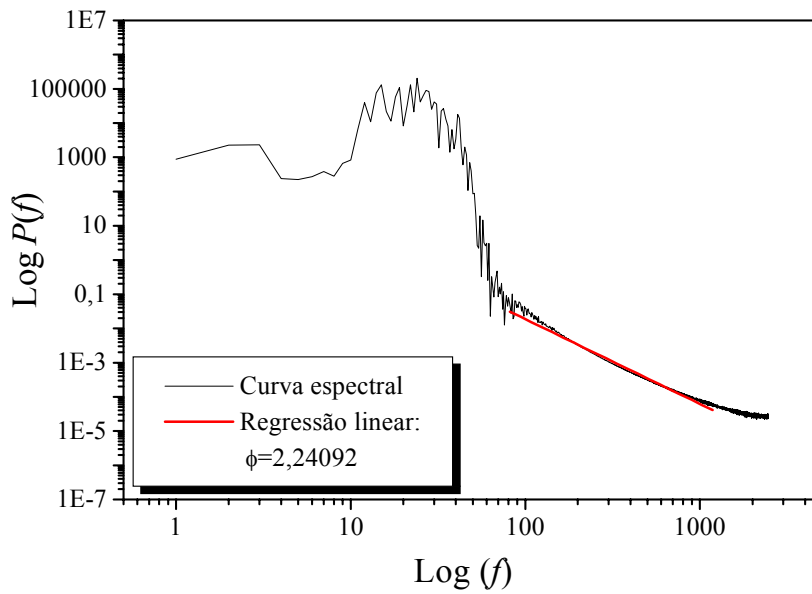


Figura 4.72. Análise espectral do sinal TLEV1 processado.

4.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Observou-se no caso da análise *R/S* a presença de duas regiões bem caracterizadas, tanto nos sinais processados quanto nos originais. Os valores médios para o primeiro regime, mostraram-se muito próximos de 1 nos dois tipos de sinais, denotando, assim, a persistência do sinal. Já para a segunda região, esses valores apresentaram-se diferentes e maiores para os sinais originais.

No tocante aos cálculos das dimensões fractais, as duas regiões também foram verificadas para os dois tipos de sinais. Isso indica, de fato, a presença de duas escalas de tempos distintas. Verificou-se que nos sinais processados os valores das dimensões fractais da segunda região foram menores do que os valores correspondentes aos sinais originais, similar ao que se observou na análise *R/S*.

Já na análise espectral somente nos sinais originais se verificou os dois regimes bem definidos (ver figuras 4.37 a 4.45 e 4.64 a 4.72). Então, para a segunda escala de tempo, sugere-se uma forte ligação com a intensidade do ruído inerente ao sinal e também uma maior sensibilidade do método espectral em relação ao ruído no sinal.

Para verificar o comportamento do sinal frente ao ruído, analisou-se o espaço de fase (amplitude do sinal versus sua derivada) dos sinais de EA. Como exemplo, têm as **figuras 4.73 e 4.74** que mostram, respectivamente, o comportamento do sinal TME2 original e processado.

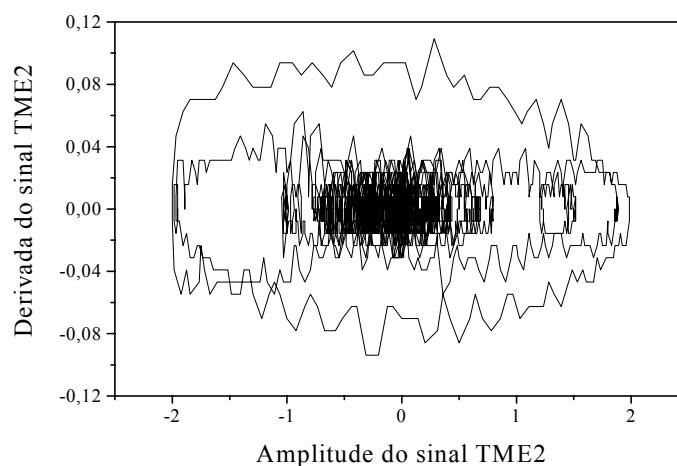


Figura 4.73. Comportamento do sinal TME2 original.

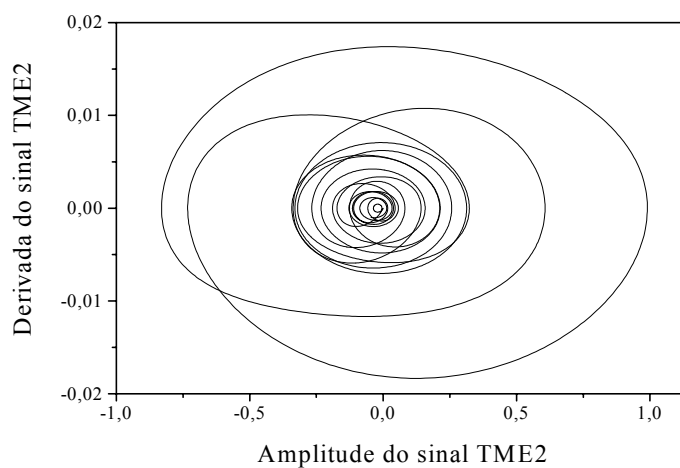


Figura 4. 74. Comportamento do sinal TME2 processado.

Comparando as figuras dos espaços de fase para os sinais em questão, nota-se para o sinal processado (que sofreu alisamento e teve o ruído bastante amenizado) uma tendência da curva apresentar-se de forma mais suave, contrário à curva do espaço de fase do sinal original que mostra um comportamento caótico.

Através dos cálculos realizados, procurou-se verificar as relações matemáticas (2.9, 2.22 e 2.23) relacionando os expoentes e dimensão fractal obtidos pelas leis de escalada para os sinais em questão. As mesmas relacionam os métodos aplicados e caracterizam a fractalidade ou não dos sinais temporais.

Em relação aos sinais processados, somente para a relação ($D + H = 2$), verificou-se convergência em alguns grupos de sinais, uma vez não ter sido possível determinar ‘ ϕ ’ nas duas regiões. – ver **tabelas 4.2 e 4.3.**

| DESIGNAÇÕES REFERENTES ÀS TABELAS 4.2 À 4.7 |
|--|
| ϕ : expoente de escala de potência. |
| CP: corpo de prova. |
| D : dimensão fractal do regime correspondente. |
| Del: delaminação. |
| Dfm: descolamento fibra/matriz. |
| F31 e F32: flexão em 3 pontos na matriz epóxi reforçada com 1 e 2 camadas de fibra de vidro. |
| F31T e F41T: flexão em 3 e 4 pontos na matriz epóxi reforçada com 1 camada de fibra de vidro tratada termicamente. |
| F41 e F42: flexão em 4 pontos na matriz epóxi reforçada com 1 e 2 camadas de fibra de vidro. |
| H : coeficiente de Hurst do regime correspondente. |
| Rf: ruptura da fibra. |
| TLEV: tração longitudinal na matriz epóxi reforçada com 1 camada de fibra de vidro. |
| Tlm: trincamento longitudinal da matriz. |
| TME: Tração na matriz de resina epóxi. |
| TTEV: tração transversal na matriz epóxi reforçada com 1 camada de fibra de vidro. |
| Ttm: trincamento transversal da matriz. |
| *: região não verificada decorrente de problemas apresentados pelas formas de onda do sinal de emissão acústica. |

É importante ressaltar que as tabelas seguintes são os resultados obtidos das curvas referentes às análises de contagem de caixas, R/S e espectral de Fourier.

Tabela 4.2. Relação entre os métodos de Hurst e Contagem de Caixas para os sinais processados.

| Tipos de Falha | CP | Coeficientes de Hurst | | Dimensões fractais | | $D + H = 2$ | |
|--------------------|--------------|-----------------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| | | $H1$ | $H2$ | $D1$ | $D2$ | $H1 + D2$ | $H2 + D1$ |
| Dfm | F31T1 | 1,00077 | 0,11922 | 1,45519 | 0,63640 | 1,63717 | 1,57441 |
| | F31T2 | 1,00249 | 0,25978 | 1,41233 | 0,83436 | 1,83685 | 1,67211 |
| | F31T3 | 0,99664 | 0,39670 | 1,43763 | 0,72930 | 1,72594 | 1,83433 |
| | Média | 0,99997 | 0,25857 | 1,43505 | 0,73335 | 1,73332 | 1,69362 |
| | F41T1 | 1,00645 | 0,22600 | 1,46202 | 0,77113 | 1,77758 | 1,68802 |
| | F41T2 | 1,00645 | 0,22600 | 1,49829 | 0,78552 | 1,79197 | 1,72429 |
| | F41T3 | 0,99739 | 0,23717 | 1,46656 | 0,79002 | 1,78741 | 1,70373 |
| | Média | 1,00343 | 0,22972 | 1,47562 | 0,78222 | 1,78565 | 1,70535 |
| Dfm, Ttm e Rf | F411 | 1,00010 | 0,35306 | 1,60069 | 0,96681 | 1,96691 | 1,95375 |
| | F412 | 1,00004 | 0,29098 | 1,59243 | 0,97658 | 1,97662 | 1,88341 |
| | F413 | 0,99534 | 0,31075 | 1,49604 | 0,97260 | 1,96794 | 1,80679 |
| | Média | 0,99849 | 0,31826 | 1,56305 | 0,97200 | 1,97049 | 1,88132 |
| Dfm, Ttm, Rf e Del | F421 | 0,99828 | 0,33227 | 1,58461 | 0,94262 | 1,94090 | 1,91688 |
| | F422 | 0,99169 | 0,42942 | 1,52968 | 0,98444 | 1,97613 | 1,95910 |
| | F423 | 1,00046 | 0,34390 | 1,47207 | 1,01591 | 2,01637 | 1,81597 |
| | Média | 0,99681 | 0,36853 | 1,52879 | 0,98099 | 1,97780 | 1,89732 |
| Dfm e Ttm | F311 | 0,98992 | 0,21352 | 1,44958 | 0,86021 | 1,85013 | 1,66310 |
| | F312 | 1,00230 | 0,39857 | 1,45586 | 0,92226 | 1,92456 | 1,85443 |
| | F313 | 0,99991 | 0,32725 | 1,50446 | 0,96792 | 1,96783 | 1,83171 |
| | Média | 0,99738 | 0,31311 | 1,46997 | 0,91680 | 1,91417 | 1,78308 |
| Dfm, Ttm e Del | F321 | 0,99627 | 0,43976 | 1,60990 | 0,79391 | 1,79018 | 2,04966 |
| | F322 | 0,99676 | 0,22929 | 1,57073 | 0,80681 | 1,80357 | 1,80002 |
| | F323 | 0,99776 | 0,35185 | 1,53216 | 0,80771 | 1,80547 | 1,88401 |
| | Média | 0,99693 | 0,34030 | 1,57093 | 0,80281 | 1,79974 | 1,91123 |
| Ttm | TME1 | 1,00666 | 0,29035 | 1,60827 | 1,02773 | 2,03439 | 1,89862 |
| | TME2 | 1,00569 | 0,48668 | 1,52781 | 1,03224 | 2,03793 | 2,01449 |
| | TME3 | 1,00171 | 0,16896 | 1,63220 | 1,03817 | 2,03988 | 1,80116 |
| | Média | 1,00469 | 0,31533 | 1,58943 | 1,03271 | 2,03740 | 1,90476 |
| | TTEV1 | 0,99608 | 0,14736 | 1,66232 | 0,98756 | 1,98364 | 1,80968 |
| | TTEV2 | 0,99720 | 0,18883 | 1,60514 | 1,09212 | 2,08932 | 1,79397 |
| | TTEV3 | 0,99619 | 0,25437 | 1,59764 | 0,97061 | 1,96680 | 1,85201 |
| | Média | 0,99649 | 0,19685 | 1,62170 | 1,01676 | 2,01325 | 1,81855 |
| Dfm, Ttm e Rf | TLEV1 | 1,00291 | 0,33629 | 1,57022 | 0,95029 | 1,95320 | 1,90651 |
| | TLEV2 | 0,99738 | 0,31170 | 1,59834 | 0,98176 | 1,97914 | 1,91004 |
| | TLEV3 | 0,99985 | 0,27144 | 1,66992 | 0,94413 | 1,94398 | 1,94136 |
| | Média | 1,00005 | 0,30648 | 1,61283 | 0,95873 | 1,95877 | 1,91930 |

Tabela 4.3. Cálculos comparativos dos valores de “ ϕ ” para os sinais processados obtidos pelas curvas espectrais e pelas relações matemáticas 2.22 e 2.23.

| Tipos de Falha | CP | Curva espectral | $\phi = 1 + 2H$ | | $\phi = 5 - 2D$ | |
|--------------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | | ϕ | $\phi 1$ | $\phi 2$ | $\phi 1$ | $\phi 2$ |
| Dfm | F31T1 | 1,92676 | 3,00154 | 1,23844 | 3,72720 | 2,08962 |
| | F31T2 | 1,92296 | 3,00498 | 1,51956 | 3,33128 | 2,17534 |
| | F31T3 | 1,92095 | 2,99328 | 1,79340 | 3,54140 | 2,12474 |
| | Média | 1,92356 | 2,99993 | 1,51713 | 3,53329 | 2,12990 |
| | F41T1 | 1,92878 | 3,01290 | 1,45200 | 3,45774 | 2,07596 |
| | F41T2 | 1,92400 | 3,01290 | 1,45200 | 3,42896 | 2,00342 |
| | F41T3 | 1,91951 | 2,99478 | 1,47434 | 3,41996 | 2,06688 |
| | Média | 1,92410 | 3,00686 | 1,45945 | 3,43555 | 2,04875 |
| Dfm, Ttm e Rf | F411 | 1,90202 | 3,00020 | 1,70612 | 3,06638 | 1,79862 |
| | F412 | 1,90202 | 3,00008 | 1,58196 | 3,04684 | 1,81514 |
| | F413 | 1,91304 | 2,99068 | 1,62150 | 3,05480 | 2,00792 |
| | Média | 1,90569 | 2,99699 | 1,63653 | 3,05601 | 1,87389 |
| Dfm, Ttm, Rf e Del | F421 | 1,87247 | 2,99656 | 1,66454 | 3,11476 | 1,83078 |
| | F422 | 1,90549 | 2,98338 | 1,85884 | 3,03112 | 1,94064 |
| | F423 | 1,90092 | 3,00092 | 1,68780 | 2,96818 | 2,05586 |
| | Média | 1,89296 | 2,99362 | 1,73706 | 3,03802 | 1,94243 |
| Dfm e Ttm | F311 | 1,91106 | 2,97984 | 1,42704 | 3,27958 | 2,10084 |
| | F312 | 1,90578 | 3,00460 | 1,79714 | 3,15548 | 2,08828 |
| | F313 | 1,90446 | 2,99982 | 1,65450 | 3,06416 | 1,99108 |
| | Média | 1,90710 | 2,99475 | 1,62623 | 3,16641 | 2,06007 |
| Dfm, Ttm e Del | F321 | 1,91287 | 2,99254 | 1,87952 | 3,41218 | 1,78020 |
| | F322 | 1,91498 | 2,99352 | 1,45858 | 3,38638 | 1,85854 |
| | F323 | 1,91179 | 2,99552 | 1,70370 | 3,38458 | 1,93568 |
| | Média | 1,91321 | 2,99386 | 1,68060 | 3,39438 | 1,85814 |
| Ttm | TME1 | 1,93905 | 3,01332 | 1,58070 | 2,94454 | 1,78346 |
| | TME2 | 1,93203 | 3,01138 | 1,97336 | 2,93552 | 1,94438 |
| | TME3 | 1,93420 | 3,00342 | 1,33792 | 2,92366 | 1,73560 |
| | Média | 1,93509 | 3,00937 | 1,63066 | 2,93457 | 1,82115 |
| | TTEV1 | 1,91926 | 2,99216 | 1,29472 | 3,02488 | 1,67536 |
| | TTEV2 | 1,96858 | 2,99440 | 1,37766 | 2,81576 | 1,78972 |
| | TTEV3 | 1,93679 | 2,99238 | 1,50874 | 3,05878 | 1,80472 |
| | Média | 1,94154 | 2,99298 | 1,39371 | 2,96647 | 1,75660 |
| Dfm, Ttm e Rf | TLEV1 | 2,24092 | 3,00582 | 1,67258 | 3,09942 | 1,85956 |
| | TLEV2 | 1,92186 | 2,99476 | 1,62340 | 3,03648 | 1,80332 |
| | TLEV3 | 1,92606 | 2,99970 | 1,54288 | 3,11174 | 1,66016 |
| | Média | 2,02961 | 3,00009 | 1,61295 | 3,08255 | 1,77435 |

Com respeito aos sinais não-processados houve, no geral, uma aceitável convergência dos valores médios das expressões que correlacionam H , D e ϕ – ver **tabelas 4.4 e 4.5**.

Com base na tabela 4.5 (análise espectral), nota-se uma boa aproximação dos valores de ' ϕ ' de acordo com as relações matemáticas expressas. Entretanto, é importante mencionar uma certa dificuldade encontrada para se chegar a esses valores através das curvas traçadas. Foi preciso, portanto, tratamento cuidadoso do resultado para se observar os valores obtidos pelas expressões.

Em relação aos sinais originais, também são mostrados na **tabela 4.6** os valores das dimensões fractais (D) obtidos utilizando-se a metade dos pontos (3500) considerados na obtenção da tabela 4.4. Para isso se usou a segunda versão do programa contagem de caixas que selecionou metade dos dados de forma alternada. A tabela 4.6 e as **figuras 4.75, 4.76 e 4.77** (comparar com as figuras 4.19, 4.21 e 4.25) mostram esses resultados e comprovaram, com uma pequena margem de erro (relativo percentual), o fato teórico de que ' D ' permanece invariável com a mudança na taxa de amostragem do sinal capturado [DUTTA, 1995]. Para o grupo de sinais F31T, os erros para os valores de $D1$ e $D2$ foram 1,17% e 9,12%. Para o grupo F41, 1,74% e 6,88% e para o grupo TME, 2,54% e 6,91%. Esses erros baixos para a primeira região reforçam a idéia de presença de auto-similaridade nesse regime e um comportamento aleatório em relação à segunda região, característica típica de ruído.

Tabela 4.4. Relação entre os métodos de Hurst e Contagem de Caixas para os sinais originais.

| Tipos de Falha | CP | Coeficientes de Hurst | | Dimensões fractais | | $D + H = 2$ | |
|--------------------|----------------|-----------------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| | | $H1$ | $H2$ | $D1$ | $D2$ | $H1 + D2$ | $H2 + D1$ |
| Dfm | F31T1 | 0,94462 | 0,26979 | 1,66394 | 1,08278 | 2,02740 | 1,93373 |
| | F31T2 | 0,94589 | 0,31135 | 1,62817 | 1,26137 | 2,20726 | 1,93952 |
| | F31T3 | 0,99465 | 0,36659 | 1,67888 | 1,21586 | 2,21051 | 2,04547 |
| | Média | 0,96172 | 0,31591 | 1,65700 | 1,18667 | 2,14839 | 1,97291 |
| | F41T1 | 0,96553 | 0,52928 | 1,56077 | 1,23138 | 2,19691 | 2,09005 |
| | F41T2 | 0,96771 | 0,52276 | 1,57729 | 1,22659 | 2,19430 | 2,10005 |
| | F41T3 | 0,98606 | 0,50072 | 1,55938 | * | * | 2,06010 |
| Média | 0,97310 | 0,51759 | 1,56903 | 1,22899 | 2,19561 | 2,09505 | |
| Dfm, Ttm e Rf | F411 | 1,03655 | 0,43950 | 1,61317 | 1,01228 | 2,04883 | 2,05267 |
| | F412 | 1,03963 | 0,32916 | 1,64020 | 1,00318 | 2,04281 | 1,96936 |
| | F413 | 1,06524 | 0,39296 | 1,62975 | 1,05843 | 2,12367 | 2,02271 |
| | Média | 1,04714 | 0,38721 | 1,62771 | 1,02463 | 2,07177 | 2,01491 |
| Dfm, Ttm, Rf e Del | F421 | 0,95979 | 0,50009 | 1,66685 | 1,38817 | 2,34796 | 2,16694 |
| | F422 | 0,97638 | 0,50524 | 1,51727 | * | * | 2,02251 |
| | F423 | 1,00381 | 0,40523 | 1,56554 | 1,26659 | 2,27040 | 1,97077 |
| | Média | 0,97999 | 0,47019 | 1,61620 | 1,32738 | 2,30918 | 2,06886 |
| Dfm e Ttm | F311 | 1,04115 | 0,38276 | 1,51284 | 1,18586 | 2,22701 | 1,89560 |
| | F312 | 0,99910 | 0,47714 | 1,52599 | 1,24749 | 2,24659 | 2,00313 |
| | F313 | 0,95859 | 0,56101 | 1,52235 | 1,25371 | 2,21230 | 2,08336 |
| | Média | 1,00782 | 0,47364 | 1,52039 | 1,22902 | 2,22863 | 1,99403 |
| Dfm, Ttm e Del | F321 | 1,05989 | 0,26011 | 1,71242 | 0,96832 | 2,02813 | 1,97253 |
| | F322 | 1,02989 | 0,35004 | 1,61637 | 1,11037 | 2,14026 | 1,96641 |
| | F323 | 0,96244 | 0,50549 | 1,48564 | 1,12825 | 2,09069 | 1,99113 |
| | Média | 1,01741 | 0,37188 | 1,60481 | 1,06898 | 2,08636 | 1,97669 |
| Ttm | TME1 | 1,09556 | 0,33929 | 1,55560 | 0,99448 | 2,09004 | 1,89489 |
| | TME2 | 1,05139 | 0,53666 | 1,62189 | 1,06201 | 2,11340 | 2,15855 |
| | TME3 | 1,05072 | 0,15288 | 1,58294 | 1,05268 | 2,10346 | 1,73582 |
| | Média | 1,06589 | 0,34294 | 1,58681 | 1,03586 | 2,10230 | 1,92975 |
| | TTEV1 | 1,18245 | 0,12008 | 1,70047 | 0,46019 | 1,64264 | 1,82055 |
| | TTEV2 | 1,10789 | 0,15641 | 1,59106 | 0,53624 | 1,64413 | 1,74747 |
| | TTEV3 | 1,11506 | 0,25624 | 1,66922 | 0,29671 | 1,41200 | 1,92546 |
| Média | 1,13513 | 0,17758 | 1,65358 | 0,43169 | 1,56626 | 1,83116 | |
| Dfm, Tlm e Rf | TLEV1 | 1,11803 | 0,34493 | 1,67694 | 0,41757 | 1,53560 | 2,02187 |
| | TLEV2 | 1,01147 | 0,32455 | 1,59717 | 0,45012 | 1,46160 | 1,92172 |
| | TLEV3 | 1,14739 | 0,31583 | 1,63312 | 0,40705 | 1,94895 | 1,55444 |
| | Média | 1,09230 | 0,32844 | 1,63574 | 0,42491 | 1,64872 | 1,83268 |

Tabela 4.5. Cálculos comparativos dos valores de “ ϕ ” para os sinais originais obtidos pelas curvas espectrais e pelas relações matemáticas 2.22 e 2.23.

| Tipos de Falha | CP | Curva do espectral | | $\phi = 1 + 2H$ | | $\phi = 5 - 2D$ | |
|--------------------|--------------|--------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| | | $\phi 1$ | $\phi 2$ | $\phi 1$ | $\phi 2$ | $\phi 1$ | $\phi 2$ |
| Dfm | F31T1 | 2,81731 | 1,64614 | 2,88924 | 1,53958 | 2,83444 | 1,67212 |
| | F31T2 | 2,77509 | 1,75364 | 2,89178 | 1,62270 | 2,47726 | 1,74366 |
| | F31T3 | 2,68049 | 1,76126 | 2,98930 | 1,73318 | 2,56828 | 1,64224 |
| | Média | 2,75763 | 1,72035 | 2,92344 | 1,63182 | 2,62666 | 1,68600 |
| | F41T1 | 2,74388 | 1,98700 | 2,93106 | 2,05856 | 2,53724 | 1,87846 |
| | F41T2 | 2,74808 | 2,11048 | 2,93542 | 2,04552 | 2,54682 | 1,84542 |
| | F41T3 | 2,86432 | 2,05633 | 2,97212 | 2,00144 | 5,00000 | 1,88124 |
| | Média | 2,78543 | 2,05127 | 2,94620 | 2,03518 | 2,54202 | 1,86194 |
| Dfm, Ttm e Rf | F411 | 3,00884 | 1,83535 | 3,07310 | 1,87900 | 2,97544 | 1,77366 |
| | F412 | 2,97267 | 1,77929 | 3,07926 | 1,65832 | 2,99364 | 1,71960 |
| | F413 | 3,00271 | 1,83185 | 3,13048 | 1,78592 | 2,88314 | 1,74050 |
| | Média | 2,99474 | 1,81550 | 3,09428 | 1,77442 | 2,95074 | 1,74458 |
| Dfm, Ttm, Rf e Del | F421 | 2,81464 | 1,82884 | 2,91958 | 2,00018 | 2,22366 | 1,66630 |
| | F422 | 2,78358 | 1,87400 | 2,95276 | 2,01048 | 5,00000 | 1,96546 |
| | F423 | 2,76154 | 1,70957 | 3,00762 | 1,81046 | 2,46682 | 1,86892 |
| | Média | 2,78659 | 1,80414 | 2,95998 | 1,94038 | 2,34524 | 1,76760 |
| Dfm e Ttm | F311 | 2,59586 | 2,08426 | 3,08230 | 1,76552 | 2,62828 | 1,97432 |
| | F312 | 2,90004 | 1,92962 | 2,99820 | 1,95428 | 2,50502 | 1,94802 |
| | F313 | 3,08739 | 1,81568 | 2,91718 | 2,12202 | 2,49258 | 1,95530 |
| | Média | 2,86110 | 1,94319 | 3,01564 | 1,94728 | 2,54196 | 1,95922 |
| Dfm, Ttm e Del | F321 | 2,92845 | 1,92765 | 3,11978 | 1,52022 | 3,06336 | 1,57516 |
| | F322 | 2,88368 | 1,70099 | 3,05978 | 1,70008 | 2,77926 | 1,76726 |
| | F323 | 2,99997 | 1,78408 | 2,92488 | 2,01098 | 2,74350 | 2,02872 |
| | Média | 2,93737 | 1,80424 | 3,03482 | 1,74376 | 2,86204 | 1,79038 |
| Ttm | TME1 | 2,93490 | 1,83178 | 3,19112 | 1,67858 | 3,01104 | 1,88880 |
| | TME2 | 2,89337 | 1,76222 | 3,10278 | 2,07332 | 2,87598 | 1,75622 |
| | TME3 | 1,3859 | 1,49777 | 3,10144 | 1,30576 | 2,89464 | 1,83412 |
| | Média | 2,91414 | 1,79700 | 3,13178 | 1,68588 | 2,92828 | 1,82638 |
| | TTEV1 | 1,04800 | 1,38852 | 3,36490 | 1,24016 | 4,20190 | 1,59906 |
| | TTEV2 | 1,36723 | 1,59317 | 3,21578 | 1,31282 | 3,92752 | 1,81788 |
| | TTEV3 | 1,43773 | 1,34679 | 3,23012 | 1,51248 | 4,40658 | 1,66156 |
| | Média | 1,28432 | 1,44283 | 3,27026 | 1,35516 | 4,13662 | 1,69284 |
| Dfm, Ttm e Rf | TLEV1 | 0,44678 | 1,84248 | 3,23606 | 1,68986 | 4,16486 | 1,64612 |
| | TLEV2 | 0,33926 | 1,77507 | 3,02294 | 1,64910 | 4,09976 | 1,80566 |
| | TLEV3 | 0,33713 | 1,66629 | 3,29478 | 1,63166 | 4,18590 | 1,73376 |
| | Média | 0,37439 | 1,76128 | 3,18460 | 1,65688 | 4,15018 | 1,72852 |

Tabela 4.6. Contagem de caixas dos sinais originais para a taxa de amostragem reduzida para 3500 pontos.

| Tipos de Falha | CP | Coeficientes de Hurst | | Dimensões fractais | | $D + H = 2$ | |
|--------------------|--------------|-----------------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| | | $H1$ | $H2$ | $D1$ | $D2$ | $H1 + D2$ | $H2 + D1$ |
| Dfm | F31T1 | 0,94462 | 0,26979 | 1,58308 | 1,08061 | 2,02523 | 1,85287 |
| | F31T2 | 0,94589 | 0,31135 | 1,63292 | 1,09606 | 2,04195 | 1,94427 |
| | F31T3 | 0,99465 | 0,36659 | 1,69675 | 1,05873 | 2,05338 | 2,06334 |
| | Média | 0,96172 | 0,31591 | 1,63758 | 1,07847 | 2,04019 | 1,95349 |
| | F41T1 | 0,96553 | 0,52928 | 1,54601 | 1,16513 | 2,13066 | 2,07529 |
| | F41T2 | 0,96771 | 0,52276 | 1,57342 | 1,14607 | 2,11378 | 2,09618 |
| | F41T3 | 0,98606 | 0,50072 | 1,59843 | 1,26240 | 2,24846 | 2,09915 |
| | Média | 0,97310 | 0,51759 | 1,57262 | 1,19120 | 2,16430 | 2,09021 |
| Dfm, Ttm e Rf | F411 | 1,03655 | 0,43950 | 1,60906 | 0,93228 | 1,96883 | 2,04856 |
| | F412 | 1,03963 | 0,32916 | 1,64063 | 0,97767 | 2,01730 | 1,96979 |
| | F413 | 1,06524 | 0,39296 | 1,54996 | 0,95232 | 2,01756 | 1,94292 |
| | Média | 1,04714 | 0,38721 | 1,59988 | 0,95409 | 2,00123 | 1,98709 |
| Dfm, Ttm, Rf e Del | F421 | 0,95979 | 0,50009 | 1,60510 | 0,48841 | 1,44820 | 2,10519 |
| | F422 | 0,97638 | 0,50524 | 1,51488 | 0,51746 | 1,49384 | 2,02012 |
| | F423 | 1,00381 | 0,40523 | 1,53119 | 1,10360 | 2,10741 | 1,93642 |
| | Média | 0,97999 | 0,47019 | 1,55039 | 0,70316 | 1,68315 | 2,02058 |
| Dfm e Ttm | F311 | 1,04115 | 0,38276 | 1,48505 | 1,08635 | 2,12750 | 1,86781 |
| | F312 | 0,99910 | 0,47714 | 1,57183 | 1,08490 | 2,08400 | 2,04897 |
| | F313 | 0,95859 | 0,56101 | 1,50499 | 1,12795 | 2,08654 | 2,066 |
| | Média | 1,00782 | 0,47364 | 1,52062 | 1,09973 | 2,10755 | 1,99426 |
| Dfm, Ttm e Del | F321 | 1,05989 | 0,26011 | 1,72874 | 0,85651 | 1,91640 | 1,98885 |
| | F322 | 1,02989 | 0,35004 | 1,50922 | 0,99886 | 2,02875 | 1,85926 |
| | F323 | 0,96244 | 0,50549 | 1,51902 | 1,05682 | 2,01926 | 2,02451 |
| | Média | 1,01741 | 0,37188 | 1,58566 | 0,97073 | 1,98814 | 1,95754 |
| Ttm | TME1 | 1,09556 | 0,33929 | 1,53290 | 0,87957 | 1,97513 | 1,87219 |
| | TME2 | 1,05139 | 0,53666 | 1,56307 | 0,95673 | 2,00812 | 2,09973 |
| | TME3 | 1,05072 | 0,15288 | 1,54362 | 1,07052 | 2,12124 | 1,6965 |
| | Média | 1,06589 | 0,34294 | 1,54653 | 0,96894 | 2,03483 | 1,88947 |
| | TTEV1 | 1,18245 | 0,12008 | 1,70258 | 0,39905 | 1,58150 | 1,82266 |
| | TTEV2 | 1,10789 | 0,15641 | 1,70565 | 0,54872 | 1,65661 | 1,86206 |
| | TTEV3 | 1,11506 | 0,25624 | 1,61631 | 0,26221 | 1,37727 | 1,87255 |
| | Média | 1,13513 | 0,17758 | 1,67485 | 0,40333 | 1,53846 | 1,85243 |
| Dfm, Tlm e Rf | TLEV1 | 1,11803 | 0,34493 | 1,67662 | 0,37029 | 1,48832 | 2,02155 |
| | TLEV2 | 1,01147 | 0,32455 | 1,59315 | 0,42020 | 1,43167 | 1,9177 |
| | TLEV3 | 1,14739 | 0,31583 | 1,62223 | 0,34601 | 1,49340 | 1,93806 |
| | Média | 1,09230 | 0,32844 | 1,63067 | 0,37883 | 1,47113 | 1,95911 |

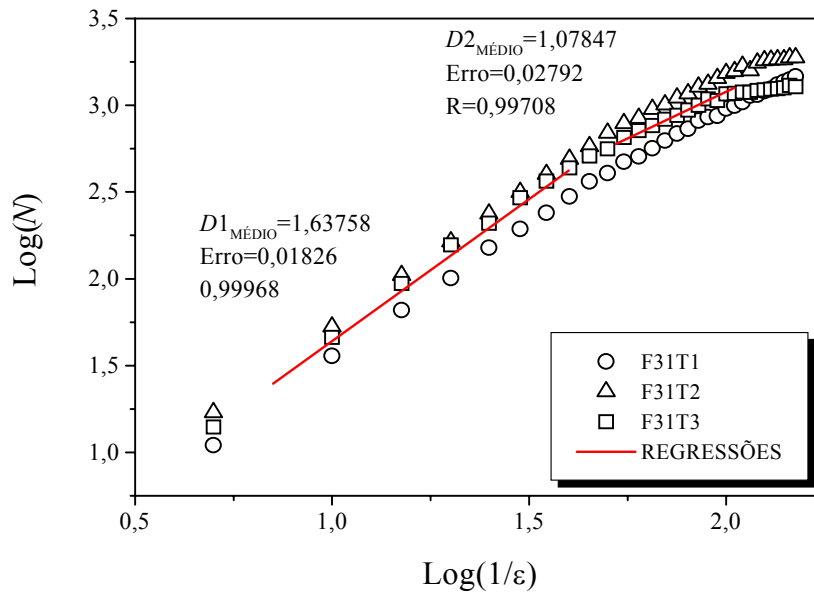


Figura 4.75. Dimensões fractais do grupo dos sinais F31T originais com resolução temporal reduzida (3500 pontos).

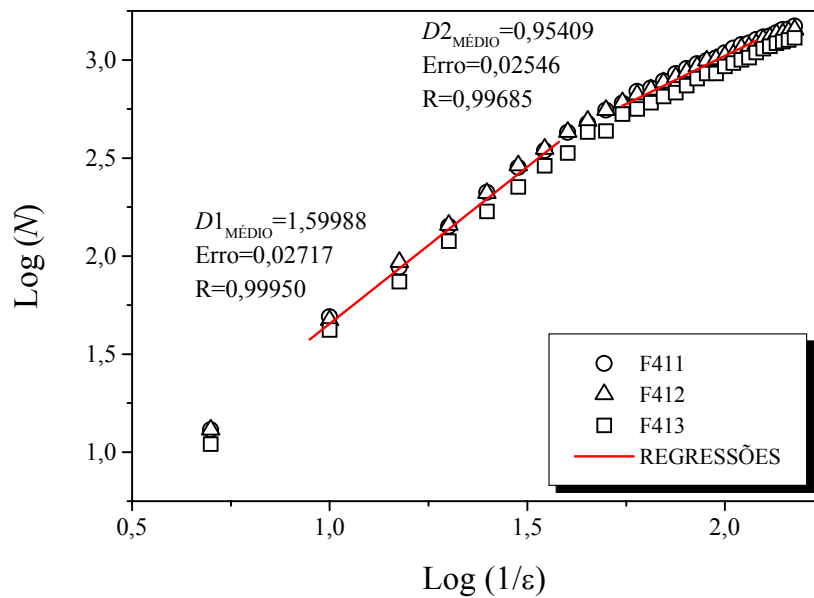


Figura 4.76. Dimensões fractais do grupo dos sinais F41 originais com resolução temporal reduzida (3500 pontos).

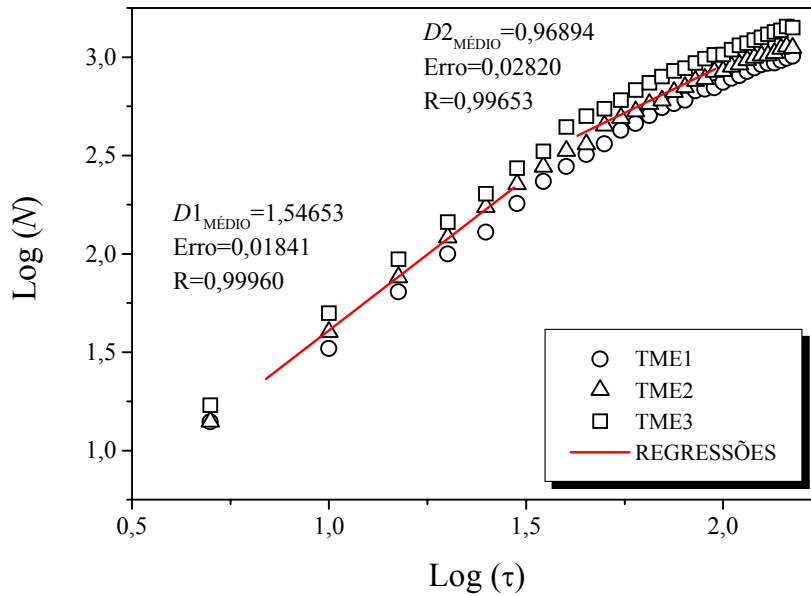


Figura 4.77. Dimensões fractais do grupo dos sinais TME originais com resolução temporal reduzida (3500 pontos).

Apesar da verificação da relação entre expoentes ser considerada aceitável, nota-se em alguns grupos de sinais originais uma convergência não muito boa, como por exemplo, em TTEV, TLEV. Em outros não se detecta a existência de duas regiões e como exemplo tem-se o sinal F422 (ver tabelas 4.4 e 4.5). Acredita-se que este comportamento é devido à existência de platôs espúrios (valores iguais de amplitudes para tempos diferentes) nas formas de onda dos sinais originais – ver figura 4.9.

No sentido de eliminar os platôs espúrios, usou-se a terceira versão do programa contagem de caixas onde foi feito um tratamento dos sinais (média móvel usando quatro pontos adjacentes) concomitantemente ao cálculo de D . A **tabela 4.7** mostra os resultados dos valores da dimensão fractal dos dados tratados dos grupos que apresentam o problema de forma mais acentuada. Percebeu-se, com esse tratamento, uma maior aproximação das relações matemáticas estudadas. (Comparar com os valores da tabela 4.4).

Tabela 4.7. Contagem de caixas dos sinais originais com os dados tratados.

| CP | H1 | H2 | D1 | D2 | H1 + D2 = 2 | H2 + D1 = 2 |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| F421 | 0,95979 | 0,50009 | 1,56608 | 1,02991 | 1,98970 | 2,06617 |
| F422 | 0,97638 | 0,50524 | 1,49376 | 1,12164 | 2,09802 | 1,99900 |
| F423 | 1,00381 | 0,40523 | 1,49722 | 0,85541 | 1,85922 | 1,90245 |
| Média | 0,97999 | 0,47019 | 1,51902 | 1,00232 | 1,98231 | 1,98921 |
| TTEV1 | 1,18245 | 0,12008 | 1,69808 | 0,69434 | 1,87679 | 1,81816 |
| TTEV2 | 1,10789 | 0,15641 | 1,64017 | 0,77323 | 1,88112 | 1,79658 |
| TTEV3 | 1,11506 | 0,25624 | 1,63975 | 0,58123 | 1,69629 | 1,89599 |
| Média | 1,13513 | 0,17758 | 1,65933 | 0,68293 | 1,81806 | 1,83691 |
| TLEV1 | 1,11803 | 0,34493 | 1,5747 | 0,67674 | 1,79477 | 1,91963 |
| TLEV2 | 1,01147 | 0,32455 | 1,60042 | 0,69545 | 1,70692 | 1,92497 |
| TLEV3 | 1,14739 | 0,31583 | 1,64356 | 0,61628 | 1,76367 | 1,95939 |
| Média | 1,09230 | 0,32844 | 1,60623 | 0,66282 | 1,75512 | 1,93467 |

Os resultados mostrados na tabela 4.4 apresentam uma pequena variação dos valores do coeficiente de Hurst (H) e da dimensão fractal (D) na primeira região de escala. No entanto, na segunda região, verificou-se uma variação mais acentuada sendo possível agrupar os resultados em dois grupos distintos, onde conjecturou-se predominância dos mecanismos de falha descolamento fibra/matriz (Dfm) e trincamento transversal da matriz (Ttm).

Assim, conjecturou-se que o mecanismo 'Dfm' predominou sobre os grupos (Dfm, Ttm, Rf e Del) e (Dfm e Ttm) e que 'Ttm' predominou sobre os grupos (Dfm, Ttm e Rf) e (Dfm, Ttm e Del). Pelo fato dos sinais relativos ao grupo (Dfm, Ttm e Rf) terem apresentados problemas em suas formas de onda, não foi possível apontar o possível defeito predominante.

Acredita-se que a dificuldade em correlacionar, de maneira inequívoca, a forma de onda de emissão acústica com os mecanismos de falha através dos valores de D , H e ϕ foi consequência da aquisição dos dados onde foram selecionados limiar de referência e ganho em função do ensaio mecânico e do tipo de corpo de prova (ver tabela 4.1). Além disso, foi verificado, em testes posteriores, que existia uma certa incompatibilidade entre o sensor e o pré-amplificador utilizados no teste de EA para o material em questão e sugere-se que ocorreu, em alguns tipos de ensaios mecânicos, uma sobrecarga no pré-amplificador causando, assim, uma saturação do sinal e perda da resolução temporal de aquisição do mesmo.

CONCLUSÕES

- Os sinais de emissão acústica apresentaram fractalidade, pois as dimensões fractais mostraram-se invariáveis com a mudança na sua resolução temporal, indicando a propriedade de auto-similaridade.
- As curvas relativas aos métodos contagem de caixas, R/S e decomposição espectral mostraram dois regimes para os sinais originais, sendo que nos sinais processados isso não foi verificado na análise espectral de Fourier. Este resultado indicou uma forte relação entre o segundo regime e o ruído inerente ao sinal e mostrou que o método espectral é o mais sensível para caracterizar tal fato.
- Os cálculos referentes aos métodos espectral de Fourier e faixa re-escalado de Hurst apresentaram valores que verificaram as relações matemáticas [$\phi = 5 - 2D$ e $D + H = 2$], comprovando por procedimento distinto o valor da dimensão fractal obtida pelo método contagem de caixas.
- Na análise espectral de Fourier, considerando a sua grande sensibilidade observada frente ao ruído, necessitou-se de um tratamento cuidadoso dos resultados para se verificar as relações previstas pelas leis de escala [$\phi = 5 - 2D$ e $\phi = 1 + 2H$], no caso dos sinais originais.
- Nas análises R/S e de contagem de caixas os resultados para a primeira escala de tempo apresentaram pequena variação dos valores dos coeficientes de Hurst (H) e da dimensão fractal (D) e uma variação mais acentuada em relação ao segundo regime. Esse fato possibilitou apontar o mecanismo predominante sobre cada grupo de falha: ‘Dfm’ predominou nos grupos (Dfm, Ttm, Rf e Del) e (Dfm e Ttm) e ‘Ttm’ predominou nos grupos (Dfm, Ttm e Rf) e (Dfm, Ttm e Del). Em relação ao grupo (Dfm, Ttm e Rf) não foi possível classificar o mecanismo principal devido aos problemas apresentados pelas formas de onda.
- Neste trabalho foi possível, como mencionado, apontar os mecanismos predominantes de cada grupo de falha e principalmente diferenciar os grupos entre si. No trabalho desenvolvido por Ferreira (2000) foram apontadas diferenças entre os espectros dos sinais correspondentes a um único grupo (por exemplo, TME versus TTEV, F31T versus F41T) ou entre os espectros dos sinais de grupos diferentes, mas provenientes do

mesmo tipo de ensaio mecânico (por exemplo, F32 versus F31, F42 versus F41) com exceção para TLEV versus F41, onde os sinais são correspondentes a CP's e carregamentos diferentes. Nessas análises são mostradas as diferenças espectrais para os CP's que apresentam um mecanismo de falha a mais em relação a um outro em questão, e nenhum estudo foi feito no sentido de diferenciar os grupos de falha entre si.

- Não foi possível, entretanto, correlacionar, inquestionavelmente, a forma de onda de emissão acústica com todos os modos de falha mecânica do material de suas características fractais. Acredita-se que isso tenha sido decorrente da forma de aquisição dos dados que foram obtidos variando o ganho e limiar de referência de acordo com o tipo de ensaio mecânico utilizado. Além disso, foram observados problemas técnicos (incompatibilidade) entre sensor e pré-amplificador que resultaram nas formas de ondas apresentadas nos sinais TTEV e TLEV.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDISON, P. S., “Fractals and Chaos – An Illustrated Course”. IOP Publishing Ltd., 1997.
- BARAT, P. et al. “Fractal property of backscattered acoustic signals from polycrystalline aluminium”. Physics Letters A 245 (1998) 91-96.
- BARAT, P., “Fractal Characterization of Ultrasonic Signals from Polycrystalline Materials”. Chaos, Solitons & Fractals vol. 9, N° 11, pp. 1827-1834, Índia, 1998.
- BLITZ, J. & SIMPSON, G., “Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing”, Chapman & Hall, 1996.
- BLITZ, J., “Fundamentals of Ultrasonics”, New York, Plenum Press, 1967.
- BORODICH, F. M., “Some Fractal Models of Fracture”. J. Mech. Phys. Solids, vol.45, No. 2, pp.239-259, UK, 1997.
- CALLISTER, W. D., “Materials science and Engineering – An Introduction”, 3^a ed., USA, John Wiley & Sons, 1994.
- CAMERINI, C. S., “Relação entre Emissão Acústica e CTOD para um aço estrutural”, tese de M.Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1990.
- CHATFIELD, C., “The Analysis of Time Series – An Introduction”, 4^a Ed., London, Chapman & Hall, 1992.
- CIÊNCIA HOJE, “Dimensão fractal multiescala: o mundo visto de outro ângulo”. vol. 31, N° 183, junho de 2002.
- DUTTA, D. & BARAT, P. “Fractal characterization of ultrasonic backscattered signals from single crystal and polycrystalline materials”. J. Acoust. Soc. Am. Vol. 98, N° 2, Pt.1, 1995.

- FEDER, J. “Fractals”, Plenum Press, New York, 1988.

- FERREIRA, D. B. B., “Aplicação da Técnica de Emissão Acústica na Caracterização dos Mecanismos de Falha em Plásticos Reforçados por Fibras”, Tese de DSc, PEMM/COPPE/UFRJ, RJ, Brasil, 2000.

- HASEGAWA, M. et al. “Calculation of the fractal dimensions of machined surface profiles”. Wear 192 (1996) 40-45.

- HILBORN, R. C. “Chaos and Nonlinear Dynamics – An introduction for scientists and engineers”, Oxford University Press, 1994.

- HOFFMAN, F. M., “An Introduction to Fourier Theory”. Disponível em: <<http://aurora.phys.utk.edu/~forrest/papers/fourier/index.html>>. Acesso em 26 sep. 2002.

- JEMIELNIAK, K., “Some aspects of acoustic emission signal pre-processing”, Journal of Materials Processing Technology 109 (2001) 242-247.

- MANDELBROT, B. B. “The Fractal Geometry of Nature”. W.H. Freeman and Company, New York, 1983.

- MILLER, R. K. & MCINTIRE, P. “Nondestructive Testing Handbook – Acoustic Emission”, vol.5, 2ed., USA, ASNT, 1987.

- MORETTIN, P. A., “Ondas e Ondaletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas”, Edusp, 1999.

- PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION (PAC), “LOCAM 320 User’s Manual”, 1992.

- PHYSICAL ACOUSTICS SOUTH AMERICA (PASA), “Seminário: Novas Tecnologias para Racionalização de Inspeção, Manutenção e Controle de perdas”, São Paulo, 12 de novembro de 2001.

- POLLOCK, A. A., “Nondestructive Evaluation and Quality Control – Acoustic Emission Inspection”, vol.17, 2ed, USA, ASM handbook, 1992.

- POLLOCK, A. A., Physical Acoustics Corporation - PAC, Princeton, New Jersey, USA, 1988.
- RAWERS, J. & TYLCZAK, J., “Fractal Characterization of Wear-Erosion Surfaces”. Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 8 (6), pp.669-676, 1999.
- STROGATZ, S. H., “Nonlinear Dynamics and Chaos”, Addison-Wesley Publishing Company, 1994.
- VAHAVIOLOS, S., “Industrial and Research Applications of Acoustic Emission”, Princeton, New Jersey, September, 1980.
- WARREN, T. L. & KRAJCINOVIC, D. “A fractal model for the static coefficient of friction at the fiber – matrix interface”, composites: part B 27B (1996) 421-430.
- WEVERS, M., “Listening to the sound of materials: acoustic emission for the analysis of material behaviour”, NDT & E International, Vol. 30, No. 2, pp. 99-106, 1997.
- WOOD, B. R. A. & HARRIS, R. W., “Structural integrity and remnant life evaluation of pressure equipment from acoustic emission monitoring”, International journal of Pressure Vessels and piping 77 (2000) 125-132.

APÊNDICE

PROGRAMA TRANSFORMADA DE FOURIER DISCRETA

```
parameter (m=n° de pontos da série temporal)
real*8 ff(m),xx,yy,aa(m),xlam(m)
complex*16 gg(m),ffg
open(unit=1, file='DADOS.dat')
n=m
yy=0.0d0
do 10 i=1,n
read(1,*) ff(i)
yy=yy+(ff(i))**2
10 continue
close(unit=1)
open(unit=2, file='RESULTADO.dat')
xx=0.0d0
call tfourier(ff,n,gg,xlam)
do 20 j=1,n
aa(j)=(cdabs(gg(j)))**2
xx=xx+aa(j)
20 continue
xx=xx/dfloat(n)
write(*,*) xx,yy
do 21 j=1,n/2
write(2,*) aa(j)
continue
close(unit=2)
stop
end
subroutine tfourier(f,n,g,xlambd)
real*8 f(n),pi,z,xlambd(n)
```

```

complex*16 g(n),xlambda(n)
pi=2.*dasin(1.d0)
do 10 i=1,n
z=(2.*pi*dfloat(i-1))/dfloat(n)
xlambda(i)=dcmplx(0.0d0,z)
xlambd(i)=z
10  continue
do 20 j=1,n
g(j)=0.0
do 20 jj=1,n
g(j)=g(j)+f(jj)*cdexp(-xlambda(jj)*dfloat(j-1))
20  continue
return
end

```

PROGRAMA CONTAGEM DE CAIXAS 1

```

implicit double precision (a-h,o-z)
dimension x(50000),y(50000)
nmax=(n° de pontos da série temporal)
open (1, file='DADOS.dat')
read(1,*) (y(i),i=1,nmax)
open (2, file='RESULTADO.dat')
m =nmax
mm=30
do 2 j=1,m
x(j)=dfloat(j)/dfloat(m)
2  continue
ymax=-1.0d20
ymin=1.0d20
do i=1,nmax
ymax=dmax1(ymax,y(i))

```

```

ymin=dmin1(ymin,y(i))
enddo
rmax=ymax-ymin
do i=1,nmax
y(i)=(y(i)-ymin)/rmax
enddo
do 10 i=1,mm
delta=1.d0/dfloat(5*i)
n1=5*i
nb=0
do 11 ii=1,n1
x1=dfloat(ii-1)*delta
x2=dfloat(ii)*delta
do 12 jj=1,n1
y1=dfloat(jj-1)*delta
y2=dfloat(jj)*delta
do 20 j=1,m
if(x(j).lt.x1) goto 20
if(x(j).ge.x2) goto 20
if(y(j).lt.y1) goto 20
if(y(j).ge.y2) goto 20
goto 21
20 continue
if(j-1.eq.m) goto 12
nb=nb+1
12 continue
11 continue
write(2,*) -dlog10(delta),dlog10(dfloat(nb))
10 continue
close(unit=2)
stop
end

```

PROGRAMA CONTAGEM DE CAIXAS 2

```
implicit double precision (a-h,o-z)
dimension x(50000),y(50000)
nmax=(n° pontos da série temporal)
open (1, file='DADOS.dat')
read(1,*) (y(i),i=1,nmax)
open (2, file='RESULTADO.dat')
m =nmax
mm=30
do 2 j=1,m-1,2
ii=1+(j-1)/2
x(ii)=dfloat(j)/dfloat(m)
y(ii)=y(j)
2 continue
ymax=-1.0d20
ymin=1.0d20
do i=1,nmax/2
ymax=dmax1(ymax,y(i))
ymin=dmin1(ymin,y(i))
enddo
rmax=ymax-ymin
do i=1,nmax/2
y(i)=(y(i)-ymin)/rmax
enddo
do 10 i=1,mm
delta=1.d0/dfloat(5*i)
n1=5*i
nb=0
do 11 ii=1,n1
x1=dfloat(ii-1)*delta
x2=dfloat(ii)*delta
do 12 jj=1,n1
y1=dfloat(jj-1)*delta
```

```

y2=dfloat(jj)*delta
do 20 j=1,m
if(x(j).lt.x1) goto 20
if(x(j).ge.x2) goto 20
if(y(j).lt.y1) goto 20
if(y(j).ge.y2) goto 20
goto 21
20  continue
    if(j-1.eq.m) goto 12
21  nb=nb+1
12  continue
11  continue
    write(2,*) -dlog10(delta),dlog10(dfloating(nb))
10  continue
    close(unit=2)
    stop
    end

```

PROGRAMA CONTAGEM DE CAIXAS 3

```

implicit double precision (a-h,o-z)
dimension x(50000),y(50000)
c  write(*,*)'numero de pontos da serie'
c  read(*,*)nmax
    open (1, file='DADOS.dat')
    read(1,*) (y(i),i=1,nmax)
    open (2, file='RESULTADO.dat')
    m =nmax
    mm=30
c  dp=2.d0*dasin(1.d0)/dfloating(m)
    do 2 j=1,m-3,4

```

```

ii=1+(j-1)/4
x(ii)=dfloat(j)/dfloat(m)
y(ii)=(y(j)+y(j+1)+y(j+2)+y(j+3))/4.d0
write(3,*) x(ii),y(ii)
2  continue
ymax=-1.0d20
ymin=1.0d20
do i=1,nmax/4
ymax=dmax1(ymax,y(i))
ymin=dmin1(ymin,y(i))
enddo
rmax=ymax-ymin
do i=1,nmax/4
y(i)=(y(i)-ymin)/rmax
c  write (2,*) y(i)
enddo
do 10 i=1,mm
delta=1.d0/dfloat(5*i)
n1=5*i
nb=0
do 11 ii=1,n1
x1=dfloat(ii-1)*delta
x2=dfloat(ii)*delta
do 12 jj=1,n1
y1=dfloat(jj-1)*delta
y2=dfloat(jj)*delta
do 20 j=1,m
if(x(j).lt.x1) goto 20
if(x(j).ge.x2) goto 20
if(y(j).lt.y1) goto 20
if(y(j).ge.y2) goto 20
goto 21
20  continue
if(j-1.eq.m) goto 12

```

```
21  nb=nb+1
12  continue
11  continue
    write(2,*) -dlog10(delta),dlog10(dfloat(nb))
10  continue
    close(unit=2)
    stop
    end
```