

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

**CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS DE SOLDAGEM POR ANÁLISE  
FRACTAL UTILIZANDO EMISSÃO ACÚSTICA EM ENSAIOS DE TRAÇÃO**

**Juliano Accioly Tesser**

Fortaleza, CE – Brasil

Fevereiro de 2004

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

**CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS DE SOLDAGEM POR ANÁLISE  
FRACTAL UTILIZANDO EMISSÃO ACÚSTICA EM ENSAIOS DE TRAÇÃO**

**Eng. Juliano Accioly Tesser**

**ORIENTADOR: Prof. Lindberg Lima Gonçalves, D.Phil.**  
**CO-ORIENTADOR: Prof. José Maurício Oliveira Matos, PhD.**

Fortaleza, CE – Brasil

Fevereiro de 2004

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

**CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS DE SOLDAGEM POR ANÁLISE  
FRACTAL UTILIZANDO EMISSÃO ACÚSTICA EM ENSAIOS DE TRAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais.

**Eng. Juliano Accioly Tesser**

**ORIENTADOR: Prof. Lindberg Lima Gonçalves, D.Phil.**

**CO-ORIENTADOR: Prof. José Maurício Oliveira Matos, PhD.**

Fortaleza, CE – Brasil

Fevereiro de 2004



TESSER, Juliano Accioly

Caracterização de Defeitos de Soldagem Por Análise Fractal Utilizando Emissão Acústica em Ensaios de Tração. Fortaleza, CE: CT/DEMP/UFC, 2004.

x, 110 p. 29,7 cm (DEMP/CT/UFC, M.Sc., Engenharia e Ciência de Materiais, 2004).

Dissertação – Universidade Federal do Ceará, UFC.

1. Emissão Acústica
2. Análise Fractal de Sinais de Emissão Acústica
3. Defeitos de Soldagem
4. Ensaios de Tração
5. Ensaios Não-Destrutivos

I. DEMP/CT/UFC II. Título

*Dedico este trabalho aos meus pais, pelo incentivo, apoio e principalmente carinho e amor que me proporcionaram durante estes anos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores Lindberg Lima Gonçalves e José Maurício Oliveira Matos, pela ajuda e orientação da dissertação.

À CAPES pela bolsa de estudo concedida durante o período de desenvolvimento da pesquisa.

Ao LABOEND/COPPE/UFRJ, em especial ao professor João Marcos Alcoforado Rebello e o pesquisador Márcio H. S. Siqueira, pelo apoio e ensinamentos que me foram oferecidos.

Ao CENPES/PETROBRÁS, pela iniciativa do programa em parceria com a UFRJ e UFC, sugestões e conselhos durante a realização dos ensaios.

Ao colega, Juliano de Aguiar, pelo companheirismo e convivência durante o curso de mestrado.

Aos colegas do Programa de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais, pela amizade e colaboração durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais colegas do DEMP (professores, funcionários e alunos) pela amizade e ajuda no decorrer deste trabalho e a todos aqueles que de alguma forma prestaram suas contribuições.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar e correlacionar formas de onda de sinais de emissão acústica, utilizando métodos de análise espectral e fractal, em corpos de prova previamente soldados com seus respectivos defeitos, avaliando assim a integridade estrutural do material aço carbono ASTM 516 Grau 60, utilizado em vasos de pressão, tubulações, esferas de armazenamento, etc. Os sinais de emissão acústica foram gerados submetendo os corpos de prova a ensaios de tração. Para análise dos sinais no domínio dos tempos, foram utilizados o método de contagem de caixas, que fornece a dimensão fractal, e o de intervalo re-escalado de Hurst, e no domínio das frequências o método espectral de Fourier. Através das relações previstas pelas leis de escala, concluiu-se que os expoentes calculados pelos métodos espectral de Fourier e re-escalado de Hurst, correlacionam-se entre si, bem como com a dimensão fractal obtida pelo método de contagem de caixas. Mostrou-se também a existência de duas regiões de escala distintas que caracterizam a mudança do regime elástico para o regime plástico quando as amostras foram submetidas ao carregamento de tração. Verificou-se ainda que este comportamento foi característico tanto para os materiais soldados como para o metal de base.

## **ABSTRACT**

The present work aims at characterizing and correlating waveforms of acoustic emission signals from welded test samples, with defects, of ASTM 516 - Grade 60 steel used in pressure vessels, pipes, storage spheres, etc., by using fractal analysis and spectral analysis, in order to evaluate their structural integrity. The signals were generated by submitting the samples to tensile tests, and were analyzed in the time domain by using the box counting method, which gives the fractal dimension, and the rescaled range Hurst technique, and, in the frequency domain, the spectral method of Fourier. From the relations predicted by the scaling laws, it can be concluded that the exponents obtained from the spectral analysis and rescaled range Hurst analysis are correlated between themselves and to the fractal dimension obtained by the box counting method. It was also shown that there are two distinct regions which characterize the transition between the elastic and plastic regimes for the samples submitted to the tensile loading. It has also been verified that this behaviour was characteristic of the welded materials as well as of the base metal.

# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1. CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
1.1 – INTRODUÇÃO À TECNOLOGIA DA EMISSÃO ACÚSTICA.....	4
1.1.1 – <i>Vantagens Do Ensaio De Emissão Acústica</i> .....	6
1.1.2 – <i>Equipamentos Usados No Ensaio De Emissão Acústica</i> .....	8
1.2 – EFEITO KAISER.....	9
1.3 – EFEITO FELICITY.....	11
1.4 – EFEITO DO RUÍDO NOS ENSAIOS DE EMISSÃO ACÚSTICA.....	11
1.5 – CARACTERIZAÇÃO DOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA.....	12
1.6 – ORIGENS MACROSCÓPICAS DA EMISSÃO ACÚSTICA.....	15
1.7 – ORIGENS MICROSCÓPICAS DA EMISSÃO ACÚSTICA.....	18
1.7.1 – <i>Fontes de Fraturas Microscópicas</i> .....	19
1.8 – PRINCÍPIOS FÍSICOS.....	20
1.8.1 – <i>Ondas Acústicas</i> .....	21
1.8.1.1 – <i>Impedância Acústica</i> .....	22
1.9 – ENSAIO DE TRAÇÃO PARA MATERIAIS METÁLICOS.....	24
1.10 – DEFEITOS DE SOLDAGEM.....	26
1.11 – GEOMETRIA FRACTAL.....	29
1.11.1 – <i>Dimensão fractal</i> .....	30
1.11.1.2 – <i>Método da Contagem de Caixas</i> .....	30
1.11.1.3 – <i>Método da Análise de Hurst – Análise R/S</i> .....	34
1.11.1.4 – <i>Método Espectral de Fourier</i> .....	38
<b>2. MATERIAL E MÉTODO</b> .....	<b>40</b>
2.1 – MATERIAL.....	40
2.2 – CORPOS-DE-PROVA.....	44
2.3 – MÁQUINA DE ENSAIO DE TRAÇÃO.....	46
2.4 – APARELHAGEM DE EMISSÃO ACÚSTICA.....	47
2.5 – MÉTODO PARA A REALIZAÇÃO DOS TESTES.....	48
2.6 – TRATAMENTO DOS SINAIS.....	50
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>54</b>
3.1 – PROCESSAMENTO DOS SINAIS.....	56
3.2 – TRATAMENTO DOS SINAIS.....	64

3.2.1 - Amaciamento .....	65
3.2.2 – Filtros .....	70
3.2.3 – Outros Métodos .....	75
3.2.3.1 – Retificação dos Sinais .....	75
3.2.3.2 – Eliminação dos Picos e Normalização dos Sinais .....	78
3.3 – VALIDAÇÃO DA DIMENSÃO FRACTAL .....	91
<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>100</b>
<b>SUGESTÕES .....</b>	<b>102</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>106</b>

## INTRODUÇÃO

O ensaio de emissão acústica é um dos métodos de ensaio não-destrutivo que vem sendo utilizado com cada vez mais frequência em inspeção/manutenção de equipamentos de indústrias, tornando-se assim uma ferramenta indispensável para a análise do tipo de descontinuidade presente na estrutura e sua criticidade em relação ao carregamento imposto nos equipamentos. O fenômeno da emissão acústica surge quando uma descontinuidade é submetida à solicitação térmica ou mecânica. Concentração de tensões, presente nos defeitos, quando estimulada emite ondas mecânicas que são captadas por transdutores piezoelétricos instalados sobre a estrutura, transformando assim energia mecânica em elétrica, sendo os sinais digitalizados e arquivados para sua posterior análise. As pequenas alterações que ocorrem nos materiais quando estes iniciam os processos de fratura (como deformação plástica, movimentação de discordâncias, quebra de inclusões, delaminações, propagações de trinca, etc.) geram em maior ou menor grau, uma quantidade de ondas de natureza acústica, originadas pela liberação de energia que está associada a estes mecanismos. Estes sinais são captados pelos sensores que são acoplados ao equipamento.

A técnica por emissão acústica se diferencia das outras técnicas convencionais como raios X, ultra-som, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, etc. pelo fato de detectar os sinais emitidos pela estrutura sem nada introduzir nela, como feixes de radiação eletromagnética ou pulsos de ondas, sendo assim uma técnica de caráter passivo. Outra vantagem é a análise do ensaio em tempo real, sem ter a necessidade de parar a produção. Porém, como em todos os ensaios, o ensaio de emissão acústica apresenta suas desvantagens, por exemplo, nem todos os defeitos são detectados, e a interpretação dos resultados necessita de grande experiência.

Seguem alguns exemplos de áreas onde a técnica vem sendo empregada:

- Uso de emissão acústica em materiais fibrosos;
- Detecção de vazamentos em dutos e tubulações; [FERES, 2001].
- Controle de qualidade de soldas, como, feixe de elétrons, penetração no passe da raiz e arco submerso;
- Monitoração nos processos corrosivos e de corrosão sob tensão;
- Controle de componentes de máquinas, peças de aeronave durante o voo, cilindros de transportes de gases, pistões hidráulicos, etc.

Em alguns casos, citados acima, a técnica atingiu o seu objetivo, consolidando-se assim como um ensaio não-destrutivo que avalia a integridade estrutural do equipamento. Porém, em outros casos, a técnica encontrou barreiras para poder identificar a presença de defeitos, o que gerou uma certa dúvida quanto ao grau de confiabilidade do ensaio, já que para os ensaios convencionais não-destrutivos o alto nível de sensibilidade aliado ao alto critério de aceitação garante uma avaliação segura do equipamento. Daí entra o objetivo desse trabalho de analisar a confiabilidade do ensaio através da caracterização de defeitos previamente definidos na soldagem por um método estatístico de análise fractal com uma solicitação de tensões pelo ensaio de tração. Existem trabalhos que utilizaram essa técnica de correlacionar sinais com o tipo de material ensaiado utilizando o conceito da geometria fractal, com sinais provenientes de ensaios de ultra-som e emissão acústica. Métodos utilizados em materiais policristalinos [BARAT *et al.*, 1995], ferro fundido [MATOS *et al.*, 2003] e compósitos de matriz polimérica com fibra de vidro [SILVA, 2002] obtiveram resultados significantes.

O processamento e análise dos sinais começaram em meados dos anos 60. Com o avanço tecnológico e conseqüentemente a evolução dos processadores digitais, as aplicações de análise de sinais vem sendo cada vez mais freqüente. Os sinais podem se classificar como: determinísticos e aleatórios,

periódicos e transientes, analógicos e digitais. O processamento digital dos sinais trabalha em tempos discretos, onde a sua ferramenta de utilização pode ser por: análise fractal, filtros digitais, transformada de Fourier, etc. A utilização dessas ferramentas podem ser comprovadas no trabalho de Ferreira [FERREIRA, 2000] utilizando a técnica de emissão acústica em plásticos reforçados por fibra.

As técnicas utilizadas para caracterizar os sinais de emissão acústica em aços no geral ainda são limitadas comprometendo assim a confiabilidade do ensaio. A caracterização fractal do espectro utilizando a estatística de Hurst e/ou análise fractal surge como uma possível solução para podermos identificar o tipo de defeito como também a sua criticidade. Neste sentido serão estudados corpos de prova submetidos a um ensaio de tração conforme a norma ASTM A370, onde esses corpos de prova, aço carbono ASTM 516 Grau 60, estarão soldados com seus respectivos defeitos previamente definidos. A monitoração por emissão acústica no momento em que o corpo de prova estará sujeito a um carregamento por tração, ajudará a identificar os sinais pela análise fractal e avaliar a integridade do material e compará-los com os supostos defeitos inseridos na soldagem, definindo assim a confiabilidade do ensaio. Este método pode ser comprovado no trabalho de Silva [SILVA, 2002] que utilizou os sinais de Ferreira para avaliar a integridade física do material compósito de matriz polimérica com fibra de vidro.

## 1. CONCEITOS BÁSICOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 – INTRODUÇÃO À TECNOLOGIA DA EMISSÃO ACÚSTICA

A emissão acústica é uma energia elástica que se liberta espontaneamente através de materiais que sofrem algum tipo de deformação, conforme figura 1.1. Nos anos 60 nascia uma nova tecnologia de ensaios não-destrutivos que, através do monitoramento dos sinais de emissão acústica, podia reconhecer o crescimento de trincas e descontinuidades em vasos de pressão. A definição mais formal para emissão acústica é: “Um fenômeno clássico onde ondas elásticas transientes são geradas por energias libertadas de fontes localizadas dentro do material”. [ASNT, 1987].

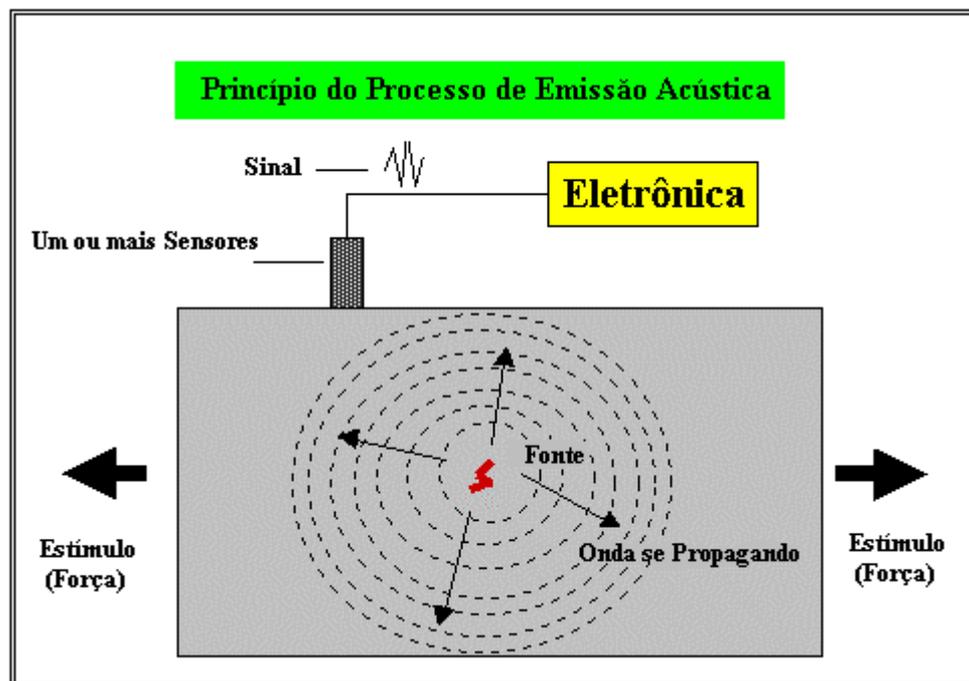


Figura 1.1. Princípio da Emissão Acústica

As fontes de emissão acústica incluem diferentes tipos de mecanismo de deformação e fratura. Terremotos e rompimento de rochas em minas são al-

gumas das maiores fontes de emissão acústica que ocorrem naturalmente. As fontes identificadas em metais incluem crescimento de trincas, movimento de discordância, deslizamento, maclagem, deslizamento de contornos de grãos e a fratura da coesão das inclusões. Outras falhas mecânicas que estão dentro da definição e são detectáveis com os equipamentos da emissão acústica, são: Vazamento e cavitação; fricção em eixos giratórios; liquefação e solidificação e transformações de fases sólido-sólido.

O exame de emissão acústica representa um rápido avanço e amadurecimento em métodos de ensaios não-destrutivos. Tem demonstrado a capacidade de monitorar a integridade de estruturas, como por exemplo, detectar vazamentos e início de falhas em equipamentos mecânicos, e, enfim, de caracterizar o comportamento dos materiais.

O ensaio de emissão acústica difere dos demais ensaios não-destrutivos em dois significantes aspectos. Primeiro, a energia que é detectada é libertada no interior do objeto em teste antes mesmo de ter sido identificada por outro ensaio não-destrutivo, como ultra-sônico ou radiográfico. Segundo, o ensaio de emissão acústica é capaz de detectar o processo dinâmico associado com a degradação da integridade estrutural. O crescimento de trinca e a deformação plástica são considerados as maiores fontes de emissão acústica.

Certas áreas, dentro de sistemas estruturais, desenvolvem instabilidades locais antes mesmo da falha estrutural. Esta instabilidade resulta de um movimento dinâmico como, por exemplo, a deformação plástica, escorregamento ou iniciação e propagação de uma trinca. Embora a tensão sofrida por parte de um metal possa estar bem abaixo do limite de elasticidade, a região perto do topo da trinca pode sofrer uma deformação plástica devido ao alto nível de tensão local. Nessa situação, o ato de descontinuidade se propaga como uma fonte de ondas de tensão e se torna uma fonte de emissão acústica ativa.

### 1.1.1 – VANTAGENS DO ENSAIO DE EMISSÃO ACÚSTICA

O ensaio de emissão acústica oferece as seguintes vantagens sobre outros ensaios não-destrutivos:

- a) A emissão acústica é um método de inspeção dinâmico que identifica o crescimento de descontinuidade em materiais submetidos a uma tensão estrutural; descontinuidades estáticas não geram sinais de emissão acústica.
- b) A emissão acústica pode detectar e identificar, durante um simples ensaio, o significado das descontinuidades ao longo de toda uma estrutura.
- c) Pode ter acesso a locais onde as descontinuidades podem ser detectadas e que são inacessíveis através de outros ensaios não-destrutivos convencionais.
- d) Permite o monitoramento e a inspeção de vasos e outros sistemas de pressão em serviço sem interrupção da produção.
- e) O método de emissão acústica pode ser usado para prevenir falhas catastróficas em sistemas com descontinuidades desconhecidas.

Emissão acústica é um fenômeno de onda e o ensaio de emissão acústica usa atributos particulares de onda para ajudar na caracterização do material no qual as ondas estão viajando. Freqüência e amplitude são exemplos de parâmetros utilizados na monitoração dos ensaios de emissão acústica. A tabela 1.1 fornece uma avaliação da maneira como várias propriedades de materiais e condições de ensaio influenciam na resposta da amplitude das ondas da emissão acústica. [ASNT, 1987].

Fatores que tendem a aumentar a amplitude da Emissão Acústica	Fatores que tendem a diminuir a amplitude da Emissão Acústica
Alta Resistência	Baixa Resistência
Alta taxa de deformação	Baixa taxa de deformação
Baixa temperatura	Alta temperatura
Anisotropia	Isotropia
Heterogeneidade	Homogeneidade
Seção Espessa	Seção Estreita
Falhas frágeis	Falhas dúcteis
Material com descontinuidade	Material sem descontinuidade
Transformação de fase Martensítica	Transformação de fases difusão controlada
Propagação de trincas	Deformação plástica
Materiais fundidos	Materiais forjados
Tamanho de grão grande	Tamanho de grão pequeno
Maclagem induzida mecanicamente	Maclagem induzida termicamente

*Tabela 1.1. Fatores que afetam a relação da amplitude na resposta da emissão acústica.*

Os ensaios de emissão acústica podem ser classificados por diversos tipos de aplicação, são eles:

1. Propriedades mecânicas e caracterização nos ensaios
2. Ensaios de prova pré-serviço
3. Ensaios em serviço
4. Monitoramento on-line
5. Monitoramento de soldas em processo
6. Análise da assinatura mecânica
7. Detecção de vazamento e localização
8. Aplicações geológicas

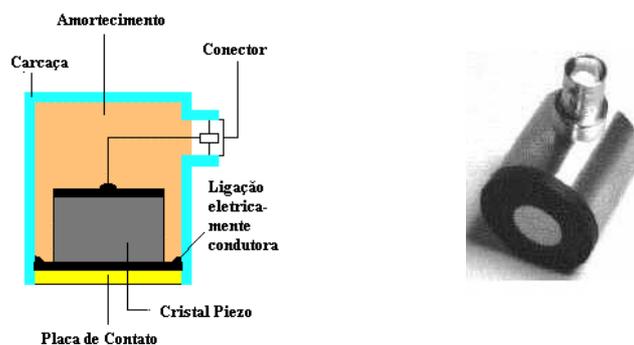
Por definição, o monitoramento on-line pode ser contínuo ou intermitente, e pode envolver estruturas inteiras ou zonas limitadas. Uma vasta variedade de estruturas e materiais (metais, não-metais e uma variedade de combinações entre eles) pode ser monitorada pela técnica de emissão acústica durante a aplicação externa de um carregamento. O mecanismo primário de emissão acústica varia conforme os diferentes tipos de materiais e pode ser caracterizado antes da aplicação da técnica de emissão acústica.

### 1.1.2 – EQUIPAMENTOS USADOS NO ENSAIO DE EMISSÃO ACÚSTICA

Os principais componentes do equipamento de emissão acústica são: sensores de emissão acústica, linha de conexão sensor/aparelho, unidade de discriminação, microprocessador de sinais, software e periféricos. Ao ser detectado o sinal, o microprocessador apresenta os principais parâmetros para poder caracterizá-lo: amplitude, energia, contagem, tempo de subida, duração. Através desses parâmetros pode-se definir o tipo e a gravidade de uma determinada atividade acústica.

O equipamento de ensaio de emissão acústica foi um dos primeiros ensaios não-destrutivos a utilizar computadores em meados dos anos 60. O equipamento utilizado para processar os sinais de emissão acústica está disponível numa variedade de formas, desde instrumentos portáteis até sistemas de multicanais.

**Sensores:** Têm como função detectar os movimentos mecânicos e convertê-los em sinais elétricos. Geralmente são utilizados transdutores piezelétricos como conversores eletromecânicos. As principais considerações feitas para selecionar um sensor são: Freqüência de operação; Sensibilidade; Características físicas e ambientais. Para altas temperaturas utilizam-se guias para isolar os sensores do ambiente que está sendo analisado. Ver figura 1.2.



*Figura 1.2. Sensores de Emissão Acústica*

*Pré-amplificadores e frequência:* Os pré-amplificadores são geralmente localizados dentro dos sensores. Os sensores são compostos por filtros, ganhos e cabos. Os filtros têm como função monitorar as frequências nos ensaios de emissão acústica. A escolha da frequência de operação é uma função do operador. A frequência utilizada para ensaios de emissão acústica está em torno de 100 a 300 kHz.

*Sistema do computador:* Os elementos principais para ajustar a sensibilidade do ensaio são os amplificadores principais e seus limiares. Os ganhos de amplitude são geralmente utilizados entre 20 e 60 dB.

*Outros acessórios:* Itens que podem ser encontrados nos trabalhos de emissão acústica incluem osciloscópios, registros transientes e analisadores espectrais, fita com registros magnéticos, voltímetros, instrumentos de calibração, e aparelhos para simulação de emissão acústica.

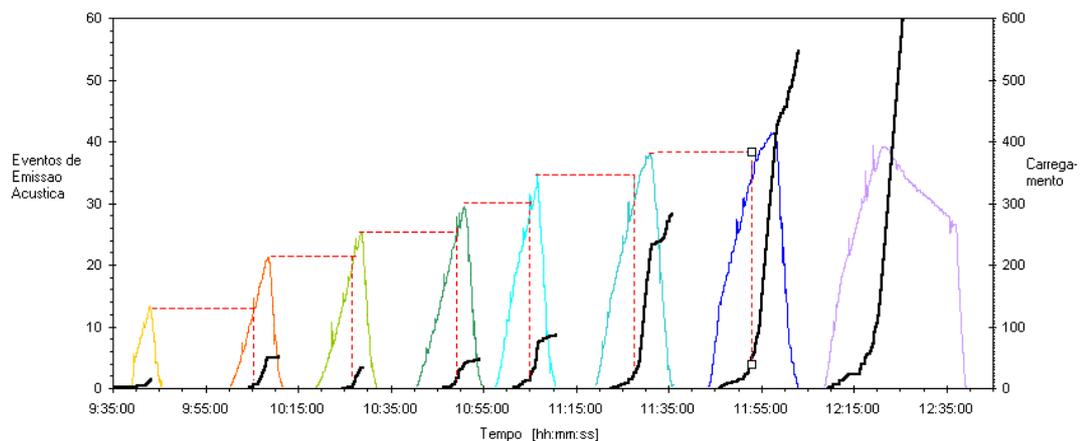
O ensaio de emissão acústica é um método passivo que monitora a redistribuição dinâmica das tensões dentro de um material ou componente. O monitoramento da emissão acústica é somente efetivado enquanto um material ou estrutura estiver sujeito a algum tipo de tensão.

## **1.2 – EFEITO KAISER**

Uma característica importante que influi na aplicação da emissão acústica é a resposta irreversível da maioria dos metais. Na prática, quando algum tipo de carregamento é aplicado em um material, a emissão acústica detecta algum tipo de atividade de tensão aplicada. Caso reinicie um segundo carregamento no mesmo material, a emissão acústica só detectará algum tipo de atividade se o nível de tensão atingir ao menos o do primeiro carregamento.

Emissão acústica é gerada na formação ou propagação de algum tipo de defeito submetido a alguma tensão. Caso não se atinja a tensão necessária para formação ou propagação desse defeito no primeiro carregamento não haverá emissão acústica, o mesmo não ocorrerá no segundo carregamento caso atinja também o mesmo valor de tensão. Tomando por base essa definição do efeito Kaiser, a emissão acústica fica em desvantagem com relação aos outros ensaios não-destrutivos quando comparado a técnicas que podem ser aplicadas repetidamente por diferentes operadores ou diferentes equipamentos, sem afetar a estrutura do material.

Embora a emissão acústica seja muito sensível quando comparada com os outros métodos de ensaios não-destrutivos como ultra-sônicos ou radiográficos, a sensibilidade decresce com o aumento da distância entre as fontes de emissão acústica e seus sensores. A sensibilidade nos ensaios de emissão acústica é limitada pelas considerações dos ruídos do ambiente para materiais de engenharia com boas características de transmissão acústica. Materiais com alta atenuação acústica certamente impõem limites com relação as distâncias entre os sensores que poderão ser usadas. A escolha dos sensores e seu posicionamento, para a maioria das estruturas de engenharia, baseia-se no conhecimento detalhado das propriedades acústicas do material e das condições geométricas que serão encontradas.



**Figura 1.3.** Exemplo do efeito Kaiser em um carregamento cíclico numa amostra de concreto. As linhas pretas representam atividades da emissão acústica. As linhas coloridas são o carregamento e as tracejadas indicam o efeito Kaiser.

### **1.3 – EFEITO FELICITY**

Para materiais plásticos reforçados com fibra, a definição do efeito Kaiser não se aplica. Isso se explica pelo fato de que atividades acústicas significativas nesses materiais podem ser detectadas em níveis inferiores aos anteriormente aplicados. Para isso deu-se o nome de efeito Felicity, quando a emissão acústica se reinicia a uma fração específica da tensão máxima previamente aplicada. Esta fração é denominada razão Felicity, que é o quociente da menor tensão de aparecimento do sinal e a tensão máxima previamente aplicada.

O efeito Felicity permite que, nos testes com materiais fibrosos, o componente não seja necessariamente sobrecarregado, já que a atividade acontece em níveis de tensão inferiores.

### **1.4 – EFEITO DO RUÍDO NOS ENSAIOS DE EMISSÃO ACÚSTICA**

O monitoramento da emissão acústica deve sempre reconhecer a presença de ruídos. O ruído dos sinais pode ser tanto contínuo como intermitente, e a fonte pode ter origem tanto externa como internamente no objeto testado. Essas fontes emitidas devem ser examinadas e separadas conforme forem ruídos ou sinais de emissão acústica relevantes. A melhor forma de prevenir-se de ruídos é identificá-los e removê-los ou simplesmente impedir seu processo.

É importante a identificação e a separação dos ruídos com os sinais relevantes da emissão acústica para melhor interpretação do monitoramento do ensaio de emissão acústica. A grande maioria desses monitoramentos se faz utilizando uma frequência acima de 100 kHz o que ajuda a diminuir o nível de ruído existente.

Existe uma gama imensa de fontes de ruídos associados com o monitoramento da emissão acústica. Antes do início dos ensaios de emissão acústica, é essencial verificar a presença de ruídos e estímulos de emissão acústica, e seus efeitos nos resultados dos testes. Esta verificação deve incluir o exame de todos os tipos de equipamentos elétricos e maquinarias que operam durante os ensaios de emissão acústica.

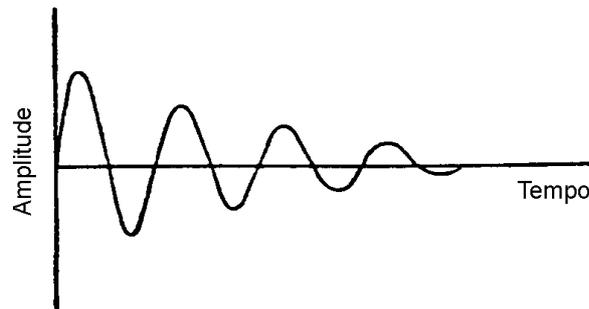
## **1.5 – CARACTERIZAÇÃO DOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA**

O objetivo do ensaio de emissão acústica é detectar a presença de fontes de emissão e fornecer o máximo de informação possível a respeito dessa fonte. A tecnologia utilizada para detectar e localizar fontes é bem sólida e os sinais de emissão acústica podem fornecer uma ampla quantidade de informações sobre a fonte de emissão, o material e a estrutura a serem examinados.

O propósito da caracterização das fontes é usar o sensor de saída das formas de ondas para identificar as fontes e validar sua importância. Existe portanto um aspecto qualitativo (identificação das fontes) e quantitativo (Intensidade e severidade) para caracterização. Existe um critério para analisar a integridade estrutural de um equipamento, mais especificamente vasos de pressão, chamado Sistema MONPAC, o qual se baseia nos parâmetros severidade e índice histórico do ensaio para poder classificar a integridade física do equipamento. Esta tecnologia é a única, junto com outras técnicas e ensaios não-destrutivos, usada para examinar áreas específicas do equipamento. [FOWLER *et al.*, 1989].

O sinal da onda é afetado por: características da fonte, a trajetória tomada da fonte para o sensor, características dos sensores e medidas do sistema. Emissões acústicas discretas ou repentinas podem ser descritas por parâmetros relativamente simples. Em curtas durações, a amplitude do sinal é bem mais alta do que o do ruído. Casos de sinais individuais são bem separados no

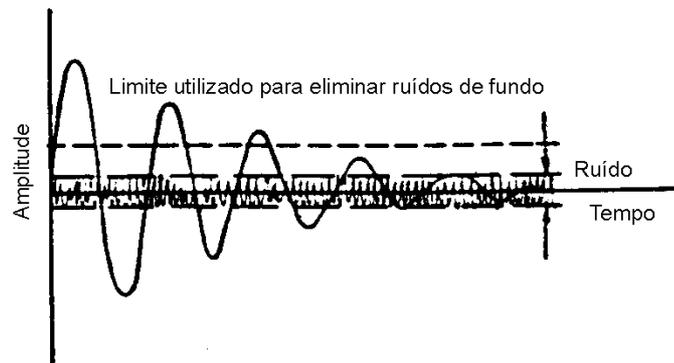
tempo. Embora os sinais raramente se apresentem em forma de ondas simples, geralmente levantam rapidamente em amplitude máxima e decaem gradativamente para o nível do ruído. O amortecimento senoidal mostrado na figura 1.4 é freqüentemente usado para representar um sinal de emissão acústica.



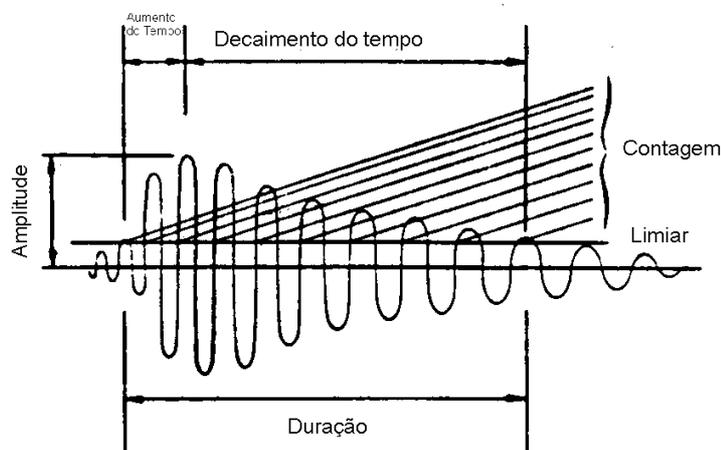
*Figura 1.4. Representação ideal para um sinal de emissão acústica.*

O monitoramento da emissão acústica é comumente acompanhado da presença de ruídos contínuos. A detecção do nível do limiar é geralmente algo acima do nível do ruído (fig. 1.5) e serve como referência para várias propriedades da forma das ondas. Conforme a figura 1.6, os parâmetros das ondas podem ser definidos, como:

- Eventos
- Contagem
- Energia
- Amplitude
- Duração
- Tempo



**Figura 1.5.** Configuração do limiar para evitar os sinais emitidos pelos ruídos de fundo contínuos.



**Figura 1.6.** Definição dos parâmetros da forma de uma onda simples.

Os eventos de emissão acústica são sinais que se manifestam quando se operam modificações na estrutura do material. Estes sinais podem ser detectados por sensores. A contagem da emissão é o número de vezes que o sinal cruza o limiar determinado. Eventos de amplitude alta de longa duração tendem a ter vários cruzamentos no seu limiar. O número de cruzamentos no limiar pelo tempo depende: da frequência do sensor, das características do amortecimento do sensor, das características do amortecimento da estrutura e do nível do limiar.

Um simples evento de emissão acústica pode produzir várias contagens. Um evento largo requer mais ciclos para passar pelo nível de acionamento e

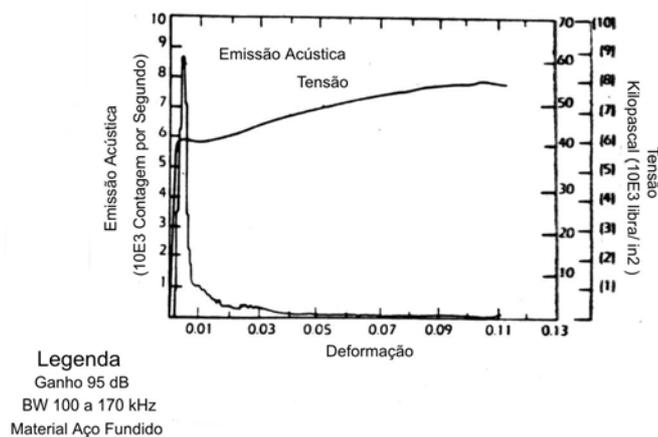
produzirá mais contagens que um evento menor. A medida da energia pode ser diretamente relacionada com importantes parâmetros da física (como a energia mecânica de um evento, taxa de deformação ou mecanismos de deformação) sem obter a forma do sinal de emissão acústica. A medição de energia também melhora as medidas da emissão acústica quando a amplitude dos sinais é baixa, como nos casos de emissão contínua. A amplitude máxima do sinal pode ser relacionado com a intensidade da fonte de emissão acústica.

No geral, as medidas de eventos, contagens e energia fornecem uma indicação da intensidade ou severidade da fonte. São informações úteis para determinar se o objeto do ensaio é um acumulador de danos, para então decidir se o ensaio deve continuar ou se a estrutura deve permanecer em serviço. O objetivo da caracterização da fonte em uma aplicação específica é classificar cada sinal que chega no sensor.

## **1.6 – ORIGENS MACROSCÓPICAS DA EMISSÃO ACÚSTICA**

Os dados para análise da emissão acústica são verificados em tempo real tanto em ensaios permanentes como em ensaios temporários e pontuais. Para o último caso, tabelas ou gráficos são gerados para ilustrar a relação entre os parâmetros da emissão acústica convencional e o carregamento aplicado. Esta relação fornece uma avaliação quantitativa dos danos causados na estrutura relacionando-os com sua localização e a severidade das discontinuidades. A maioria dos outros ensaios não-destrutivos fornece uma excitação local (energia) para uma dada estrutura e a informação sobre a estrutura é dada após a resposta local da excitação. A técnica da emissão acústica detecta a resposta de uma estrutura, que sofre um carregamento externo com um propósito de criar uma tensão sobre toda a estrutura, causando discontinuidades acusticamente significantes. Por causa dessa diferença, a emissão acústica é capaz de monitorar grandes áreas da estrutura com um número relativamente pequeno de sensores.

A deformação plástica é uma das primeiras fontes a serem observadas em materiais metálicos. O início da plasticidade, particularmente perto da tensão de escoamento, contribui para um alto nível de atividades acústicas observadas em uma curva Tensão X Deformação. A plasticidade também contribui para o alto nível de atividade para parâmetros da Amplitude X Deformação. A figura 1.7 mostra um exemplo de uma curva típica para um aço fundido. Observa-se que o nível de atividades de emissão acústica depende primeiramente do tipo de material. Em menor grau, o nível de atividade também depende: do posicionamento do sensor com relação a região de escoamento, do nível de ganho do sistema e do limiar do sistema.



**Figura 1.7.** Emissão Acústica e Tensão em função da deformação em amostras de Aços Fundidos.

A maioria dos casos de emissão acústica acontece em tensão de escoamento de um material. [CAMERINI, 1990]. Contudo, cabe saber que em alguns casos altos níveis de atividades de emissão acústica se formam antes da tensão de escoamento. Isto é atribuído ao escoamento plástico e demonstra que a emissão acústica fornece uma boa técnica para detecção de sinais de microescoamentos em certos materiais.

Aços fundidos ou aços de baixo carbono são cada vez mais utilizados na indústria de tubulações, vasos de pressão, etc. Esses aços geralmente têm baixa atividade de emissão acústica. Além disso, em alguns desses aços, o nível de emissão acústica varia dependendo da orientação da amostra (se é em direção longitudinal ou transversal).

A detecção prévia do crescimento de trincas é fundamental para a prevenção de falhas catastróficas, especialmente em estruturas metálicas sujeitas a carregamentos cíclicos. Já na inspeção, a tecnologia em emissão acústica tem sido usada com cada vez mais aplicação.

O fenômeno da emissão acústica era originalmente usado em técnicas de pesquisa para estudar o comportamento mecânico dos materiais. Grandes esforços têm sido direcionados para a caracterização dos comportamentos dos sinais ou descontinuidades em amostra sobre carregamento. Este tipo de análise conduz a uma relação entre a emissão acústica e parâmetros de caracterização do estado de tensão do topo de uma trinca. Estes parâmetros incluem: comprimento da trinca, fator de intensidade de tensão  $K$ , deformação da fratura em pontas de trincas e a zona plástica próxima à trinca. O desenvolvimento dessa correlação cresceu com a ciência da mecânica da fratura e com o detalhamento da análise das tensões e do estado de deformação de uma ponta de trinca. [BASTIAN *et al.*, 1987].

Os tipos de sinais observados durante o crescimento da trinca em um ensaio têm sido classificados. Em ligas de alumínio existe crescimento de amplitude marcado em pontos de instabilidade de crescimento de trincas em deformações planas. Em materiais mais dúcteis o nível de emissão acústica no ponto  $K_{IC}$  é mal detectável. Resistência da fratura  $K_{IC}$  em planos de deformação é medido em pontos de crescimento de trincas instáveis. [ASNT, 1987].

Os resultados em ligas de aço e alumínio indicam que mecanismos de propagação em trincas dúcteis têm baixa atividade de emissão acústica. No

entanto, a emissão suficiente para detecção é produzida pelo processo de deformação plástica e escoamento geral em picos de trincas. Em materiais dúcteis, a emissão acústica detecta a deformação plástica no início da contração de uma ponta de trinca.

A presença de anomalias estruturais ou defeitos de fabricação são algumas das causas para o início de um trincamento em uma estrutura como vasos de pressão. Tais descontinuidades incluem fragilização devido a tratamentos térmicos incorretos, a segregação de compostos intermetálicos, deformações envelhecidas ou fragilização por hidrogênio. O crescimento de tais trincas durante o tempo de vida de serviço da estrutura depende do tempo, porque o carregamento aplicado é normalmente constante. Dessa maneira o fator de intensidade de tensão da trinca aumenta com o tempo, como o crescimento do comprimento da trinca, até que um valor crítico seja finalmente alcançado.

A emissão acústica é muito utilizada para detectar a iniciação e a propagação de trincas em materiais que sofreram processo de fadiga. Também pode ser usado para monitorar baixos ciclos de fadiga.

Corrosão e fadiga são responsáveis pela maioria das falhas em estruturas e componentes industriais. A emissão acústica tem potencial para monitorar e detectar a iniciação e propagação de trincas resultantes de diferentes formas de corrosão. Várias formas de corrosão, particularmente trincas de corrosão sob tensão, tem sido estudadas com a emissão acústica. A fragilização por hidrogênio também pode ser monitorada com as técnicas de emissão acústica.

## **1.7 – ORIGENS MICROSCÓPICAS DA EMISSÃO ACÚSTICA**

Em um dado material, que sofreu algum tipo de carregamento no passado e que agora está em equilíbrio elástico, pode surgir uma pequena trinca distante do local onde surgiu o carregamento. A superfície desta trinca é capaz de se

mover de tal maneira que se criem tensões livres, liberando assim alguma energia elástica armazenada no objeto. Esta liberação de energia se dá em forma de ondas elásticas que se propagam livremente através do objeto. O transdutor acoplado no objeto se torna um sensor capaz de detectar o movimento da superfície com o qual está em contato. A resposta do transdutor é a emissão acústica que observamos nas experiências ou testes.

Entender a origem microscópica da emissão acústica permite ao usuário detectar importantes eventos e distinguir a natureza deles. O propósito desta discussão é apresentar a relação entre instabilidade local mecânica e o resultado da emissão acústica. Em particular, expressões são desenvolvidas para movimento de superfícies produzidas por fontes microscópicas de emissão acústica tais como discordância, microtrincas e transformações de fases, particularmente aquelas envolvidas na formação ou aniquilação de martensitas. Usando os resultados da teoria da propagação das ondas, modelos micromecânicos são usados para desenvolver o critério de detectabilidade para fontes microscópicas.

Finalmente, estes critérios são usados para identificar a origem da emissão acústica em materiais que estão sofrendo algum tipo de deformação por fratura e mudanças de fases.

### **1.7.1 – FONTES DE FRATURAS MICROSCÓPICAS**

Ambientes de alta tensão, trincas de grandes raios de e rápida velocidade de propagação são fatores que favorecem a detectabilidade de fontes emissão acústica. Sabe-se que microtrincas frágeis propagam-se com velocidade próxima do limite de velocidade das ondas de cisalhamento.

A amplitude da emissão acústica é proporcional ao deslocamento da trinca  $w$ . Assumindo que o  $w$  ocorre somente por deformação elástica e não por

deformação plástica. Na prática, sempre que uma fratura frágil tiver alguma associação com o deslocamento da emissão na ponta de uma trinca, esta deformação plástica é capaz de permitir que  $w$  cresça além do valor atenuado elasticamente. De fato, é quase comum que  $w$  cresça em uma das três ordens de magnitude em materiais de baixa resistência pelo processo do fluxo das pontas de trincas. [ASNT, 1987].

Se a deformação plástica ocorre toda durante o período do crescimento da trinca, o sinal acústico pode potencialmente ser amplificado em razão de deslocamento da trinca elástico-plástico.

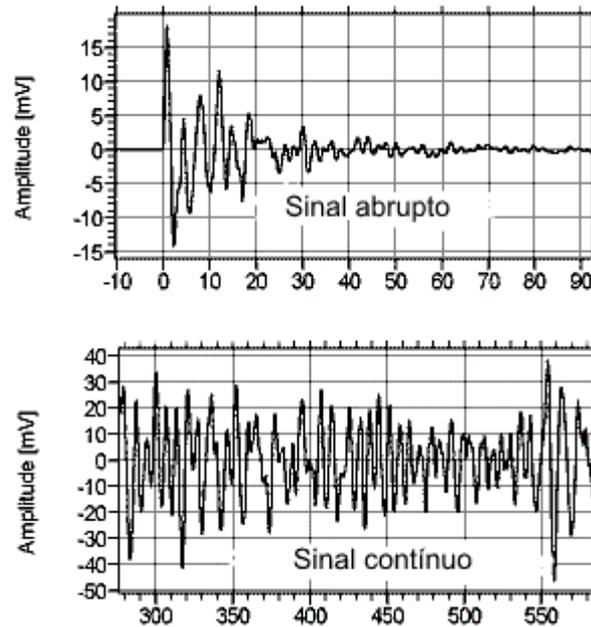
## 1.8 – PRINCÍPIOS FÍSICOS

Como já sabemos, o ensaio por emissão acústica fundamenta-se na detecção de ondas de natureza mecânica, emitidas pelas descontinuidades durante a solicitação dos materiais e equipamentos. Quando uma estrutura é submetida a um carregamento e se inicia um processo de fratura nos materiais, uma quantidade de ondas de natureza acústica é gerada, originada da liberação de energia decorrente das pequenas alterações.

Os sinais de emissão acústica são respostas dos sensores geradas pelo som das ondas em um sólido. Estas ondas são bastante similares com as ondas de som que se propagam no ar e em outros fluidos, mas são mais complexas porque o sólido é capaz de resistir a forças de cisalhamento. [ASNT, 1987].

Os sinais de emissão acústica podem ser classificados genericamente em dois tipos, contínuos e abruptos, representados na figura 1.8. Os sinais contínuos são originados nos deslocamentos de discordâncias e deslizamentos que ocorrem no material e se caracterizam por apresentarem um longo tempo de atividade. Os sinais isolados e abruptos possuem tempo de ocorrência bem definido e apresentam maiores amplitudes do que os sinais contínuos. Estes

sinais estão associados a grandes deslocamentos de grupos de discordâncias, microfissuramentos, quebra de inclusões e outros mecanismos que envolvem grandes taxas de deformação.



*Figura 1.8. Sinais típicos de emissão acústica.*

### 1.8.1 – ONDAS ACÚSTICAS

A acústica é uma ciência que pode ser definida como a geração, transmissão e recepção da energia como ondas vibrando em matéria. Quando as moléculas de um fluido ou sólido são deslocadas das suas configurações normais, surge uma força interna elástica. É esta força elástica, junto com a inércia do sistema, que é capaz de originar na matéria as vibrações oscilatórias e assim gerar e transmitir ondas acústicas. [KINSLER *et al.*, 2000].

A parte da física que estuda o som, assim como as vibrações mecânicas, denomina-se acústica. Ela descreve suas leis e características ondulatórias. Os

sons produzidos em um ambiente qualquer se refletem ou reverberam nas paredes do mesmo, podendo ainda ser transmitidos a outros ambientes.

Os meios em que a onda se propaga são formados de partículas ligadas entre si, que podem vibrar numa posição. Compreendemos, no entanto, que o meio no qual a onda se propaga não apresenta alteração permanente com a passagem da perturbação. Ocorre apenas um deslocamento da porção infinitesimal, atingida pelo pulso. Isto significa que a propagação da perturbação, ou onda sônica, de um ponto para outro não implica em transporte de matéria entre esses pontos, mas somente transmissão de energia. Em outras palavras, a onda transmite energia sem transportar matéria. É evidente a impossibilidade da transmissão no vácuo, pela ausência de matéria.

A onda sônica, ao se transmitir de um meio para outro com características acústicas diferentes, sofre uma mudança na sua velocidade e no comprimento de onda. Entretanto o único parâmetro que permanece constante é a frequência. Outro parâmetro que se altera é a energia ou intensidade sônica. A energia sônica ao ser transmitida de um meio ao outro, com características acústicas diferentes, diminui em virtude da reflexão sofrida pela onda neste meio. O plano ou seção da mudança das características acústicas (velocidade, densidade), denomina-se interface. Para cada interface que a onda encontra em sua propagação, existe a perda da sua intensidade sônica e conseqüente reflexão.

#### *1.8.1.1 – IMPEDÂNCIA ACÚSTICA*

Quando uma onda se propaga no meio, com características acústicas bem definidas, incide numa interface, parte da energia acústica será transmitida e parte refletida. A energia transmitida ou refletida depende exclusivamente da impedância acústica dos meios em questão. A impedância acústica é definida como sendo o produto da velocidade de propagação pela densidade específica do mesmo. Assim;

$$Z = \rho \times v \quad (1.1)$$

onde,  $\rho$  é a densidade específica.

O conhecimento dos fatores de transmissão e reflexão é de grande importância, pois justifica o uso de líquidos acoplantes para o contato entre os transdutores e a peça examinada. Ao acoplarmos o transdutor sobre a peça a ser inspecionada, imediatamente estabelece uma camada de ar entre a sapata do transdutor e a superfície da peça. Esta camada de ar impede que as vibrações mecânicas produzidas pelo transdutor se propaguem para a peça em razão das características acústicas (impedância acústica) muito diferente do material a ser inspecionado. [BLITZ *et al.*, 1996].

Por esta razão deve-se utilizar um líquido acoplante, com um valor de impedância intermediário entre o do sensor e o do material [BLITZ *et al.*, 1996], para que estabeleça uma redução da perda de energia da onda transmitida, e permita a passagem das vibrações para a peça. Tais líquidos, líquidos acoplantes, são escolhidos em função do acabamento superficial da peça, condições técnicas, tipo da peça, etc. A tabela 1.2 descreve alguns acoplantes mais utilizados. [ANDREUCCI, 2002].

Acoplante	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Velocidade da onda long. (m/s)	Impedância Acústica x 10 <sup>5</sup> (g/cm <sup>2</sup> *s)
Óleo (SAE 30)	0,9	1700	1,5
Água	1,0	1480	1,48
Glicerina	1,26	1920	2,4
Carbox Metil Celulose (15g/l)	1,20	2300	2,76
Aço	7,8	5900	46
Ar ou gás	0,0013	330	0,00043
Aço inoxidável	7,8	5800	45,4
Alumínio	2,7	6300	17,1
Acrílico	1,18	2700	3,1

**Tabela 1.2.** Impedância Acústica de Alguns Materiais e Acoplantes. [Fonte: Andreucci, 2002].

## 1.9 – ENSAIO DE TRAÇÃO PARA MATERIAIS METÁLICOS

Um dos ensaios mecânicos mais importantes para determinar a resistência dos materiais é o ensaio de tração. O ensaio de tração serve para determinar propriedades mecânicas dos metais, de grande importância para aplicações da engenharia, visto que o projeto e a fabricação dos produtos se baseiam principalmente no comportamento destas propriedades. [CALLISTER, 2002].

O ensaio de tração consiste em submeter o material a um esforço que tende a alongá-lo até a ruptura. Os esforços ou cargas são medidos na própria máquina de ensaio. Os ensaios de tração permitem conhecer como os materiais reagem aos esforços de tração, quais os limites de tração que suportam e a partir de que momento se rompem. Durante o ensaio de tração determina-se um gráfico que relaciona a tensão aplicada sobre o material e sua deformação. Através do gráfico Tensão X Deformação, conforme figura 1.9, é possível obter as principais propriedades mecânicas dos materiais: limite elástico, limite de escoamento, limite de resistência, limite de ruptura e estrição [CALLISTER, 2002]:

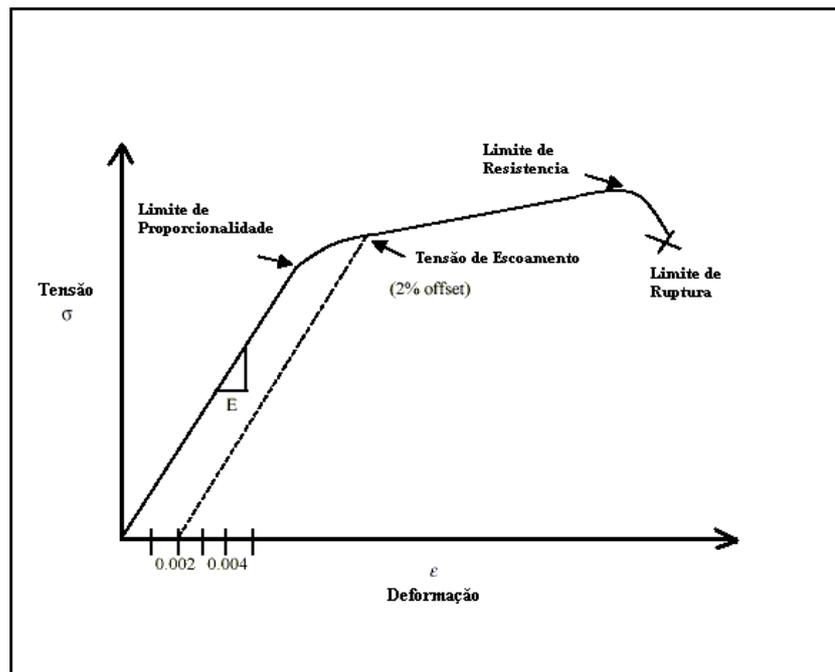


Figura 1.9. Gráfico Tensão x Deformação.

- **Limite Elástico:** É o limite de deformação atingido pelo material submetido a uma tensão que lhe permite voltar a sua forma original uma vez suprimida a tensão. Obedecendo a lei de Hooke, as deformações são diretamente proporcionais às tensões aplicadas.
- **Módulo de Elasticidade:** É a medida da rigidez do material. É a divisão da tensão pela deformação. Quanto maior for o módulo, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma tensão e mais rígido será o material.
- **Limite de Proporcionalidade:** É o limite no qual a deformação deixa de ser proporcional à carga aplicada. É até onde se aplica a lei de Hooke. Na prática, considera-se que o limite de elasticidade e o limite de proporcionalidade são coincidentes.
- **Escoamento:** O escoamento caracteriza-se por uma deformação permanente do material sem que haja aumento de carga, mas com o aumento da velocidade de deformação. É onde surge o início da fase plástica.

- *Limite de Resistência*: Após o escoamento ocorre o encruamento, que é um endurecimento causado pela quebra dos grãos que compõem o material quando deformados a frio. O material resiste cada vez mais à tração externa, exigindo uma tensão cada vez maior para se deformar. Nesta fase, a tensão começa a subir até atingir um valor máximo denominado limite de resistência.
- *Limite de Ruptura*: É o ponto no qual determina a ruptura do material. A tensão no limite de ruptura é menor que no limite de resistência, isto se deve à diminuição da área que ocorre no corpo de prova depois que se atinge a carga máxima.
- *Estricção*: É a redução percentual da área da seção transversal do corpo de prova na região onde vai se localizar a ruptura. A estricção determina a ductilidade do material. Quanto maior for a porcentagem de estricção do material, mais dúctil será o material.

Geralmente existem dois tipos de carregamento para ensaios de tração: o mecânico e o hidráulico. Durante o ensaio o carregamento hidráulico permite variar a tensão aplicada enquanto o mecânico é fixo. Máquinas mecânicas antigas são limitadas por um número pequeno de velocidades de carregamento do cabeçote. [ASTM, 1997].

## 1.10 – DEFEITOS DE SOLDAGEM

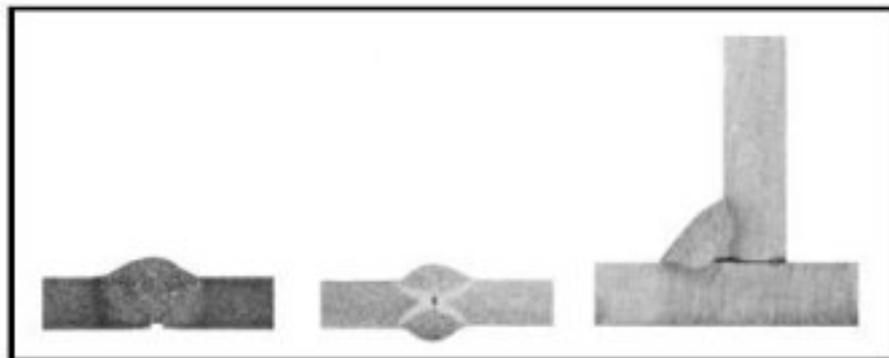
A soldagem é um processo de união dos materiais utilizada extensivamente na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas. Podemos definir a soldagem como uma operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades químicas, físicas e metalúrgicas. Existem diferentes processos de soldagem, sendo utilizado aquele mais adequado para cada aplicação. Os diferentes pro-

cessos de soldagem podem ser classificados em dois principais grupos: [JEF-FUS, 1999].

- Processo de Soldagem por Pressão: por ultra-som, por fricção, por forjamento, por resistência elétrica, por difusão, por explosão, etc.
- Processo de Soldagem por Fusão: por arco elétrico, por eletrodos, etc.

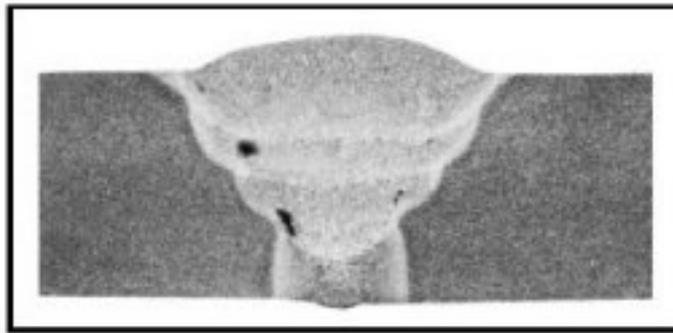
Conhecimentos básicos da tecnologia e fundamentos da soldagem são requisitos importantes para um bom soldador, caso contrário a soldagem mal feita pode afetar a estrutura do material, causando aparecimento de defeitos, influenciando assim o desempenho futuro da peça ou estrutura soldada. É importante ressaltar que uma descontinuidade não necessariamente é um defeito. Vários materiais soldados podem conter descontinuidades, mas nenhum pode ter defeitos. Na realidade, um material soldado ideal seria aquele que não tivesse nenhum tipo de descontinuidade, mas isto é praticamente impossível. Os tipos de defeito podem ser classificados como:

- *Falta de Penetração*: Ocorre quando a profundidade da solda na junta de penetração é menor que o necessário para fundir o material a ser soldado. Normalmente são causados por: técnica de soldagem imprópria, soldagem insuficiente, a não linearidade nas juntas a serem soldadas, etc.



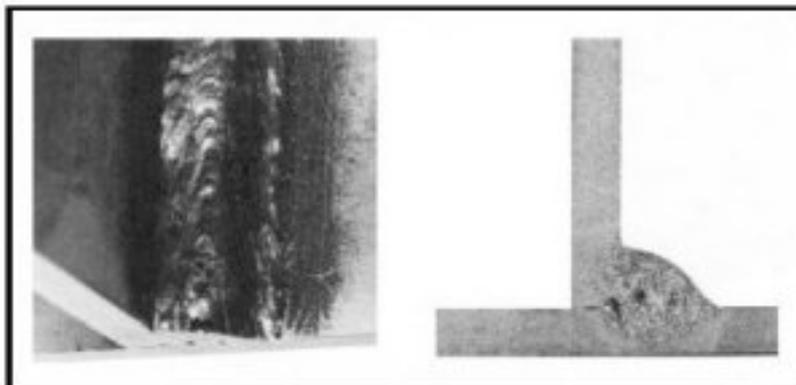
**Figura 1.10.** Defeito de Soldagem – *Falta de Penetração*.

- **Falta de Fusão:** Causado pela falta de junção entre o filete de metal fundido e o filete de metal ou o metal de base previamente depositado. Prováveis causas são: agitação inadequada, técnicas de soldagem impróprias, etc.



**Figura 1.11.** Defeito de Soldagem – Falta de Fusão.

- **Porosidades:** Resultado do acúmulo de gás em um trecho de solda fundida, formando assim bolhas que são presas quando do esfriamento do metal ao se tornar sólido. A maioria das porosidades é causada por técnicas de soldagem impróprias, contaminações, ou um balanço químico impróprio entre o cordão de solda e o metal de base. Quando surgem porosidades, o hidrogênio pode difundir-se na zona termicamente afetada, produzindo gotas abaixo de trincas em alguns aços.



**Figura 1.12.** Defeito de Soldagem – Porosidades.

- *Inclusões*: São materiais não-metálicos, como escórias e óxidos, que estão presos no metal de solda, entre o cordão de solda, ou entre a solda e o metal de base. São normalmente causados pela presença de escórias no momento da soldagem.

## 1.11 – GEOMETRIA FRACTAL

A palavra fractal foi criada por Benoit Mandelbrot, em certas ocasiões sendo citado como o pai da geometria fractal. Segundo Mandelbrot existe exemplos da natureza em que é impossível descrevê-los utilizando somente a geometria Euclidiana, sugerindo assim fractais e geometria fractal para descrever objetos reais como árvores, raios, sinuosidades do rio, etc. Pode-se definir fractal como: *“Um objeto que parece auto-similar debaixo de graus variados de ampliação. De fato, possuindo simetria através da escala utilizada, com cada parte pequena do objeto que reproduz a estrutura do todo”*. Por exemplo, consideremos duas figuras naturais: litoral de uma ilha e uma pessoa. Ao darmos um zoom no litoral observamos a repetição dos contornos da ilha com seu terreno acidentado, e cada vez que aplicarmos um zoom observamos a repetição do contorno da figura. Podemos então concluir que o litoral tem uma curva fractal. Diferentemente do corpo de uma pessoa que não é um objeto de auto-similaridade. Quando se aplica um zoom em várias partes do corpo observamos vários tipos diferentes de forma. [ADDISON, 1997].

Os fractais naturais podem se classificar em dois tipos: de auto-similaridade estatística e de auto-similaridade exata. Trincas em paredes, esboços de nuvens e uma linha do horizonte de uma encosta são figuras que possuem mesmas propriedades estatísticas, ou seja, cada parte pequena contendo as mesmas propriedades estatísticas como o todo, são chamados de fractais randômicos, aqueles que são estatisticamente auto-similares. Figuras como de uma folha de uma samambaia, possuem características iguais, sendo

que cada folhagem de uma samambaia representa uma mini-cópia de um todo da samambaia, caracterizando uma auto-similaridade exata. Fractais que possuem uma auto-similaridade exata são chamados de fractais regulares.

### 1.11.1 – DIMENSÃO FRACTAL

Os fractais possuem suas próprias características dimensionais conhecidas como *Dimensão Fractal*. Geralmente os objetos estudados física ou matemática são contínuos, lineares e homogêneos, mas a natureza mostra que isso não ocorre sempre e que os objetos naturais geralmente são rugosos e descontínuos. Certos objetos fractais, como a curva triática de Von Koch, não pode ser descrito com a 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,  $D$ , 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 que ela pretende apresentar *medida de complexidade* do objeto em estudo. [ADDISON, 1997].

#### 1.11.1.2 – 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 examinar um suspeito objeto fractal através do método da contagem de caixas, cobre o objeto com várias caixas de lado com dimensão  $l$ . Conta-se

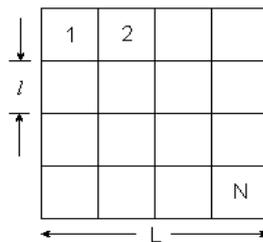
o número  $N(l)$  de quadrados de comprimento  $l$  que tem o quadrado de intersecções com o padrão considerado. Se o objeto tem propriedades fractais, então, repetindo-se esse procedimento para diferentes valores de  $l$  a seguinte relação é obtida: [SILVA, 2002].

$$N(l) \sim l^{-D} \tag{1.2}$$

e estima-se  $D$  da inclinação do crescimento linear de  $\log(N(l))$  contra  $\log(l)$ . 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:

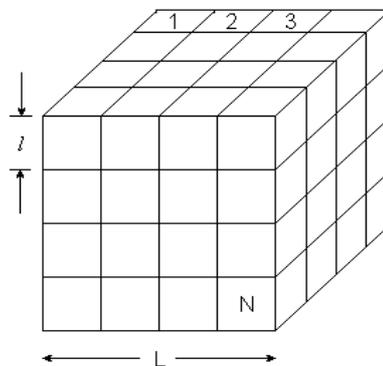
$$Nl^2 = L^2 \tag{1.3}$$



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:

$$Nl^3 = L^3 \tag{1.4}$$



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:

$$Nl^d = L^d \quad (1.5)$$

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 (1.3), (1.4) e (1.5), 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:

$N \sim l^{-3}$  para  $L$  fixo ou  $N \sim L^3$  para  $l$  fixo. Tem-se também observado em muitas estruturas naturais finitas a seguinte relação de escala:

$$N(l, L)l^D \sim L^D \quad (1.6)$$

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 consequência, 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:

$$N(l, L) \sim l^{-D}, \quad L \text{ fixo e } D \text{ fracionário} \quad (1.7)$$

$$N(l, L) \sim L^D, \quad l \text{ fixo e } D \text{ fracionário} \quad (1.8)$$

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 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 1.6, tem-se:

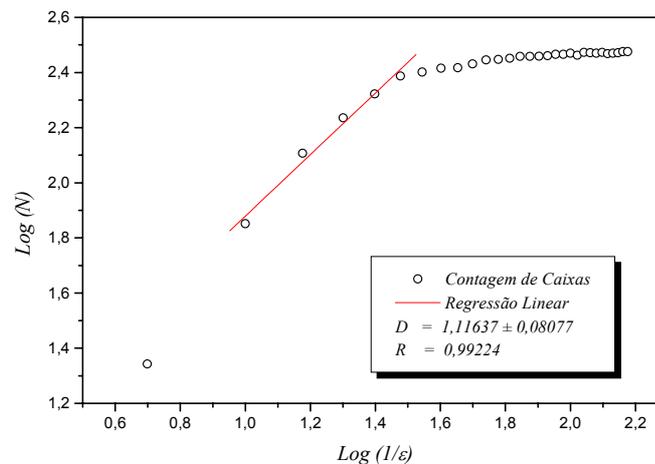
$$\begin{aligned} N(l, L)l^D &= k.L^D, & \varepsilon &= l/L \\ N(\varepsilon).\varepsilon^D &= k \end{aligned} \quad (1.9)$$

onde  $k$  é um número puro. Tomando o logaritmo da equação 1.9, tem-se:

$$\begin{aligned} \log N(\varepsilon) &= D.\log(1/\varepsilon) + \log k \\ D &= \frac{d[\log N]}{d[\log(1/\varepsilon)]} \end{aligned} \quad (1.10)$$

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  $\log (1/\varepsilon)$  que apresentam uma lei de escala e calculando-se a inclinação da mesma, que representa a dimensão fractal – ver figura 1.13. [SILVA, 2002].



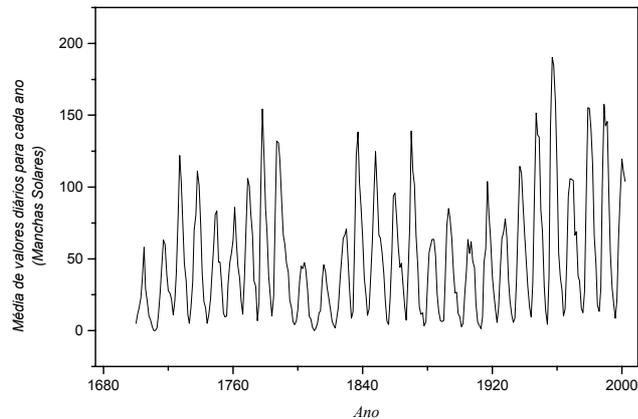
**Figura 1.13.** Contagem de caixas dos dados de Mancha Solar entre os anos 1700 e 2002, baseados em contagens de manchas na superfície do sol. [Fonte: SIDC, 2002].

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  $N(\varepsilon)$  na equação (1.9) 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.

### 1.11.1.3 – Método da Análise de Hurst – Análise R/S

Uma série temporal é uma coleção de observações feitas seqüencialmente no tempo. Os exemplos são vários e os métodos de análise de séries temporais constituem uma importante área da estatística. Dependendo do tipo de observações a serem tomadas com relação ao tempo, pode-se dividir uma série temporal como: contínua ou discreta. As séries temporais podem ser consideradas tanto determinística (série predita exatamente) como aleatória (evolui com o tempo de acordo com as leis probabilísticas). A figura 1.14 mostra um exemplo típico de uma série temporal.



**Figura 1.14.** Mancha Solar entre os anos 1700 e 2002, baseados em contagens de manchas na superfície do sol. [Fonte: SIDC, 2002].

A principal ferramenta de diagnóstico dos modelos de probabilidade para séries temporais é uma função chamada de autocorrelação, o qual ajuda a descrever a evolução de um processo através 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 esta função é chamado de análise espectral e a inferência baseada na função de densidade espectral é freqüentemente chamada de análise no domínio da freqüência (análise espectral de Fourier). [CHATFIELD, 1992].

A variação temporal de quaisquer grandezas pode também ser analisada em termos de intervalos (de tempo) re-escalados de Hurst. Estas séries temporais são caracterizadas por um expoente  $H$  – o expoente de Hurst o qual relaciona-se com a sua dimensão fractal através da seguinte relação: [FEDER, 1988].

$$D = 2 - H \tag{1.11}$$

Hurst desenvolveu um método estatístico para analisar longas séries de grandezas associadas a fenômenos naturais. O método baseia-se na propor-

ção adimensional  $R/S$ , onde  $R$  é um intervalo definido como a diferença entre os valores máximos e mínimos acumulados da soma cumulativa da grandeza  $X(t, \tau)$  do fenômeno natural no tempo inteiro discreto estimado  $t$  sobre um intervalo temporal considerado  $\tau$ . A expressão explícita para  $R$  é: [FEDER, 1988].

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (1.12)$$

onde:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t \{ \xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau} \} \quad (1.13)$$

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

$$S = \left( \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \{ \xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau} \}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.14)$$

onde:

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad (1.15)$$

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

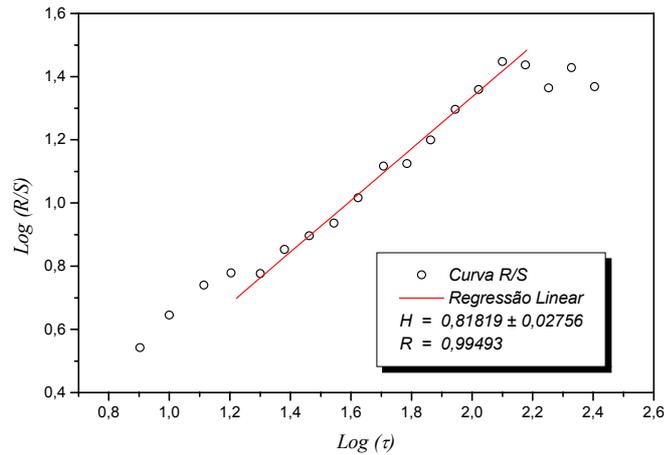
$$R/S = (\tau/2)^H \quad (1.16)$$

onde  $H$  é o expoente de Hurst.

Na ausência de longo período,  $R/S$  deve tornar-se assintoticamente proporcional a  $\tau^{1/2}$  para grandezas geradas por processos estaticamente independentes com variáveis finitas. A relação matemática é dada por:

$$R/S = \left( \frac{\pi \times \tau}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.17)$$

Para procurar as tendências dentro de um conjunto de dados, as séries de  $R/S$  são calculadas do conjunto de dados e são traçadas numa curva  $\log\text{-}\log$ . O coeficiente de Hurst,  $H$ , dos dados é obtido da inclinação da linha reta referente à regressão linear dos  $R/S$  discretos. Segue um exemplo na figura 1.15.



**Figura 1.15.** Análise de Hurst dos dados de Mancha Solar entre os anos 1700 e 2002, baseados em contagens de manchas na superfície do sol. [Fonte: SIDC, 2002].

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 desaparece 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. [FEDER, 1988].

### 1.11.1.4 – Método Espectral de Fourier

A análise das séries temporais no domínio das frequências é feita estudando-se o espectro de potência obtido através da transformada de Fourier.

Para sistemas discretos, 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].

$$F_n = \sum_{t=0}^{N_0-1} f_t \cdot e^{-i \cdot \lambda_n \cdot t} \quad (1.18)$$

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:

$$f_t = \frac{1}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0-1} F_n \cdot e^{i \cdot \lambda_n \cdot t} \quad (1.19)$$

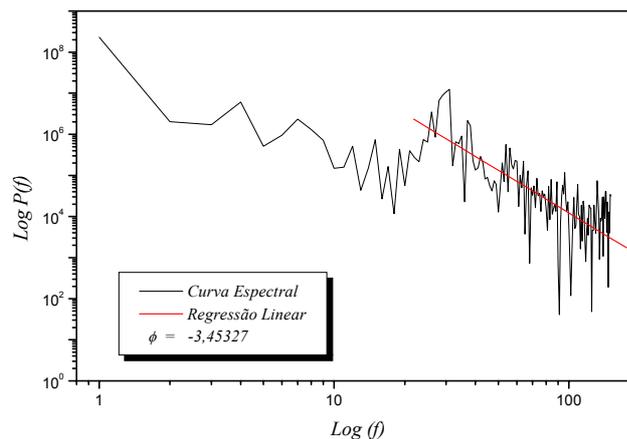
e o teorema de Parseval é:

$$\sum_{t=0}^{N_0-1} |f_t|^2 = \frac{1}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0-1} |F_n|^2 \quad (1.20)$$

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. Considerando que  $P(f)$  satisfaz a relação de escala  $P(f) \propto f^{-\phi}$ , então, a dimensão fractal pode ser calculada pela seguinte equação [ADDISON, 1997]:

$$D = \frac{5 - \phi}{2} \quad (1.21)$$

O expoente de escala de potência,  $\phi$ , é medido da inclinação da curva  $\log P(f)$  versus  $\log(f)$  – ver figura 1.16. O valor de “ $\phi$ ” obtido pela curva espectral será considerado em módulo tanto neste exemplo como nos cálculos futuros.



**Figura 1.16.** Análise Espectral dos dados de Mancha Solar entre os anos 1700 e 2002, baseados em contagens de manchas na superfície do sol. [Fonte: SIDC, 2002].

Combinando as expressões (1.11) e (1.21), obtém-se a seguinte expressão que relaciona os expoentes de Hurst e espectral:

$$\phi = 1 + 2H \quad (1.22)$$

Isto dá expoentes espectrais na faixa de  $1 < \phi < 3$  para movimentos Brownianos fracionários (fBMs). O espectro de potência, portanto, provê um outro método para a classificação de fBMs. [ADDISON, 1997].

## 2. MATERIAL E MÉTODO

### 2.1 – MATERIAL

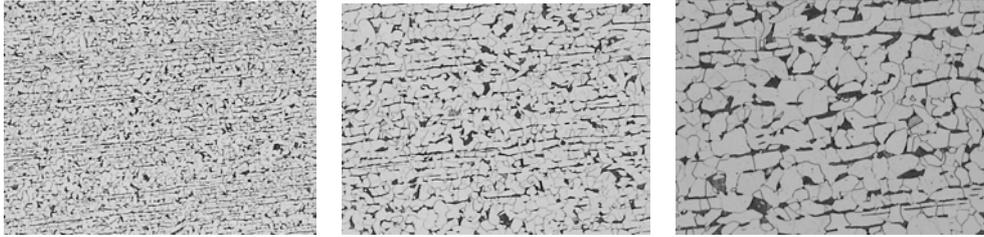
Este trabalho teve como material de pesquisa aço carbono de especificação ASTM A 516 Grau 60, utilizado para fabricação de vasos de pressão. A princípio a espessura a ser trabalhada seria de ½ polegada (12,7 mm), porém, em alguns casos, por problemas técnicos de soldagem a espessura foi reduzida para 6 mm.

Na tabela 2.1, observa-se algumas propriedades do aço e sua composição química segundo a norma ASTM.

Especificações	Norma ASTM A 516 Grau 60
Limite de Resistência a Tração	415 – 550 Mpa
Limite de Escoamento	220 Mpa
Alongamento	21%
Composição do Carbono	0,21%
Composição do Manganês	0,6 – 0,9%
Composição do Fósforo	0,035%
Composição do Enxofre	0,035%

*Tabela 2.1. Algumas propriedades e sua composição química do aço carbono ASTM A 516 Grau 60. [Fonte: ASTM, 1999].*

Foi retirado um pedaço de amostra do aço para analisar e identificar a direção de laminação. Após lixamento, polimento e ataque químico da amostra, foi analisada no microscópio sua microestrutura e concluído que o material é isotrópico, ou seja, exibe os mesmos valores de uma propriedade em diferentes direções cristalográficas. A figura 2.1 com aumento de 50, 100 e 200, respectivamente mostra a análise feita no microscópio.



**Figura 2.1.** Análise no microscópio com aumento de 50x, 100x e 200x.

Foram disponibilizadas através da ENGENHARIA/SL/SEQUI de São José dos Campos – SP junto com o CENPES/PETROBRÁS do Rio de Janeiro – RJ três chapas quadradas, com 1.350 mm de lado, das quais uma foi utilizada para confecção dos cp's metal de base, outra para metal de solda sem defeito e, a terceira para metal de solda com defeito. Todas as chapas antes de serem usinadas foram analisadas por métodos de ensaios não-destrutivos para se certificar da presença ou não de defeitos na estrutura do material. Foram feitos exames por ultra-som, [ABENDE] utilizando métodos como pulso-eco, figura 2.2, técnica da transparência e TOFD – Time of Flight Diffraction, figura 2.3. Além dos exames anteriores, foi também realizado exame radiográfico nas chapas onde foram inseridos defeitos pré-definidos com suas respectivas localizações, figura 2.4.



**Figura 2.2.** Ensaio pulso-eco realizado no LABOEND/COPPE/UFRJ em uma chapa soldada com defeitos.

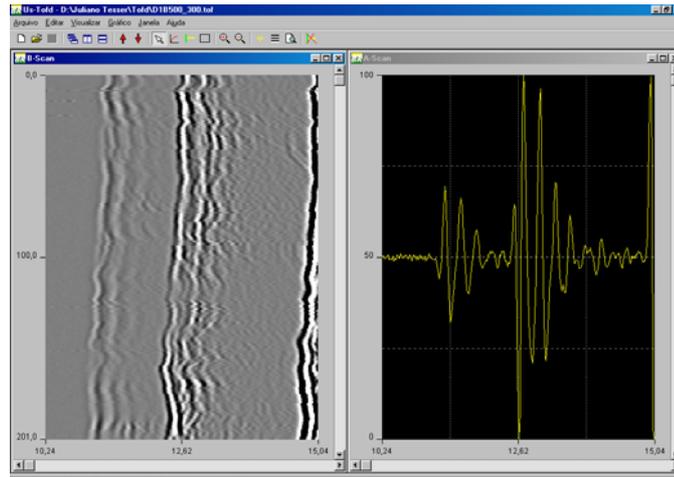


**Figura 2.3.** Inspeção de Ultra-som usando o método TOFD em uma das chapas soldadas com defeito, realizado no LABOEND/COPPE/UFRJ.



**Figura 2.4.** Exame de radiografia realizado no LABOEND/COPPE/UFRJ.

O método TOFD tem como objetivo a inspeção automática de juntas soldadas. O programa utilizado para inspeção foi desenvolvido pelo LABOEND/COPPE/UFRJ em linguagem Delphi permitindo a formação de imagens B-scan obtidas a partir do uso de um sistema automático de varredura, e geração de relatórios, medidas de defeitos, etc. Ver figura 2.5.

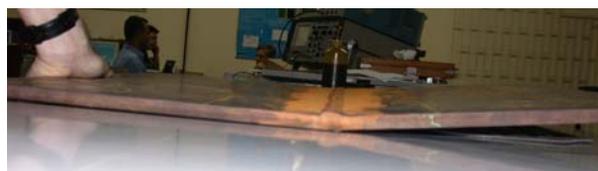


*Figura 2.5. Programa desenvolvido pelo LABOEND/COPPE/UFRJ para inspeção pelo método TOFD.*

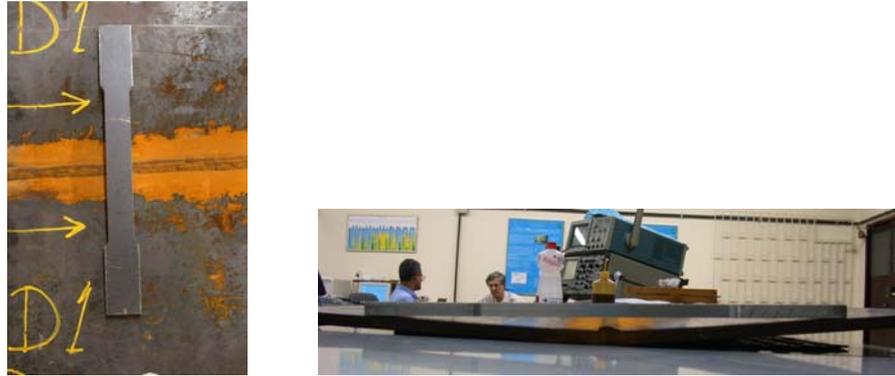
Todas as chapas soldadas vieram com problema de desalinhamento, sendo assim necessário o processo de usinagem para alinhamento alterando as dimensões originais do cp – ver figura 2.6. A redução foi somente na espessura, seguindo o padrão recomendado pela norma ASTM. [ASTM, 1997]. É importante ressaltar que as chapas soldadas com defeito estavam com desalinhamento muito grande sendo necessário passarem por um processo de prensagem para desempenar e logo em seguida serem usinadas para alinhamento – ver figura 2.7 e 2.8.



*Figura 2.6. Detalhe do desalinhamento da chapa na junta soldada.*



*Figura 2.7. Chapa soldada com defeitos (empenada).*



**Figura 2.8.** Detalhe de um cp de tração (metal de base) em cima da chapa soldada com defeito (empenada).

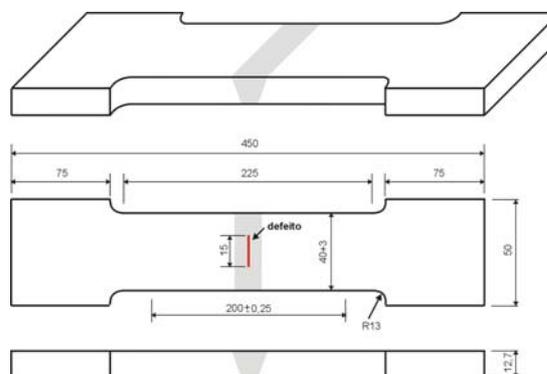
## 2.2 – CORPOS-DE-PROVA

Foram confeccionados copos-de-prova para ensaio de tração com material específico citado anteriormente. Os ensaios de tração foram levados até seu rompimento somente para os metais de base, para os metais de solda foram efetuados os ensaios sem rompimento, levando estes até 70% do seu limite de rompimento. É importante ressaltar que para efeito de emissão acústica o limite de escoamento já fornece dados suficientes para tratamento dos sinais.

Na tabela 2.2 é feito um detalhamento da quantidade de corpos-de-prova confeccionados e a serem ensaiados na máquina de tração. Logo em seguida observa-se, na figura 2.9, as dimensões do cp de tração seguindo a norma ASTM A 370 – 97a. [ASTM, 1997].

<b>Ensaio de tração</b>	
<b>Metal de base</b>	
<i>Sem defeito</i>	
Materiais	1
Tratamentos térmicos (sem TTAT)	1
Temperaturas de ensaio	1
N° de corpos-de-prova	3
<b>Subtotal:</b>	<b>3</b>
<i>Adicionais</i>	
mais 1 corpo-de-prova ensaiado com tratamento térmico de alívio de tensões	1
<b>Total:</b>	<b>4</b>
<b>Junta soldada (CP transversal)</b>	
<i>Sem defeito</i>	
Materiais	1
Materiais de adição	1
Tratamentos térmicos (sem TTAT)	1
Temperaturas de ensaio	1
N° de corpos-de-prova	3
<b>Subtotal:</b>	<b>3</b>
<i>Adicionais</i>	
mais 1 corpo-de-prova ensaiado com tratamento térmico de alívio de tensões	1
<b>Total:</b>	<b>4</b>
<i>Com defeito</i>	
Materiais	1
Materiais de adição	1
Tipos de defeitos	4
Tratamentos térmicos	2
Temperaturas de ensaio	1
Condições de acabamento	1
N° de corpos-de-prova	4
<b>Subtotal:</b>	<b>32</b>
<i>Adicionais</i>	
No caso de trinca superficial, a condição de acabamento com reforço também será avaliada gerando mais 4 cp's	4
<b>Total:</b>	<b>36</b>

*Tabela 2.2. Especificação da quantidade de corpos-de-prova confeccionados.*



*Figura 2.9. Dimensões do corpo-de-prova seguindo a norma ASTM.*

## 2.3 – MÁQUINA DE ENSAIO DE TRAÇÃO

A máquina utilizada para ensaio foi uma servo-hidráulica INSTRON® série 8800 de 25 t (25.000kgf), disponibilizada pelo laboratório de Tecnologia Submarina da COPPE/UFRJ. Como a garra hidráulica da máquina do laboratório era de 10 t, utilizou-se uma garra mecânica de 25 toneladas para o ensaio ser concretizado, figura 2.10, já que o mesmo exigia da máquina uma carga acima de 10 toneladas, conforme especificações da área da seção transversal do corpo de prova ensaiado e seu limite de escoamento. Uma das dificuldades apresentadas durante os ensaios mecânicos foi a presença de ruídos produzidos pela própria máquina. Várias soluções foram tomadas para diminuir o ruído a ponto de não atrapalhar os sinais adquiridos no momento do tracionamento do cp. Como exemplo, instalação de amortecedores na base da máquina e adaptação de um material teflon entre a garra e o cp, haja vista que o teflon é um ótimo atenuador acústico.



*Figura 2.10. Máquina de Ensaio de Tração Servo-hidráulica com a garra hidráulica e mecânica .*

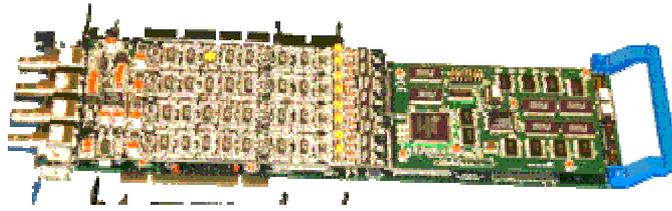
## 2.4 – APARELHAGEM DE EMISSÃO ACÚSTICA

O equipamento de emissão acústica utilizado para coletar os dados foi uma placa PCI-DSP4 da Physical Acoustics Corporation – ver figura 2.11. O aparelho possui as seguintes especificações: [PAC, 2001].

- Saída para 4 canais que processam o sinal digital baseado na aquisição dos dados da emissão acústica;
- Saída para 8 canais de paramétricos;
- Módulo para adquirir a forma da onda (Waveform);
- 4 sensores com pré-amplificador embutido de 40 dB;
- Funcionamento interdependente entre os canais em tempo real com 4 filtros de banda passante alta e baixa variando entre frequências de 100 a 400 KHz;
- Programa DiSP – Digital SPARTAN (Source Position and Real Time Analysis). Software utilizado para gerenciar e analisar gráficos e planilhas, etc;

Para operação da placa são necessários os seguintes componentes:

- Computador com as seguintes especificações mínimas recomendadas: processador de 700Mhz, memória RAM 64Mb, disco rígido de 10Gb, drive de disquete 1.44Mb, cd rom, 2 saídas serial, 1 saída paralela e 1 USB;
- Monitor VGA 15”, teclado e mouse;
- Cabos coaxiais RG-58 de 50 ohm com conectores BNC;
- Sistema operacional WINDOWS 98 ou melhor;



*Figura 2.11. Placa de emissão acústica PCI-DSP4.*



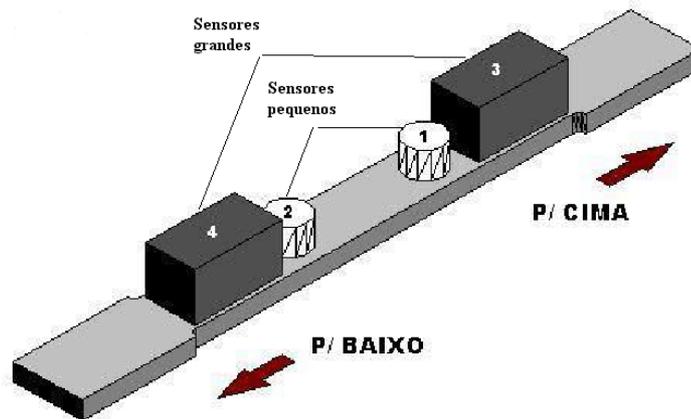
*Figura 2.12. Computador portátil para ensaios em campo.*

Todos os componentes citados anteriormente foram instalados em um computador portátil – LCD-ATX da Bsi computer®, com a finalidade de executar ensaios em campo, facilitando assim seu transporte. Ver figura 2.12.

## **2.5 – MÉTODO PARA A REALIZAÇÃO DOS TESTES**

Antes dos ensaios serem realizados, foram seguidos alguns passos relacionados tanto com o corpo-de-prova como com a placa de emissão acústica:

- Os cp's soldados ou não soldados eram identificados e classificados com seus respectivos defeitos ou sem defeitos;
- Os sensores são fixados no cp através de um fixador magnético, conforme figura 2.13, junto com o acoplante (óleo SAE 30) e o próprio cp é posicionado na máquina de tração. Foram utilizados 4 sensores: 2 do tipo S9220 (sensores 1 e 2) e 2 do tipo R15I-AST (sensores 3 e 4);



*Figura 2.13. Posicionamento dos sensores nos cp's.*

- Calibração dos sensores utilizando o método da grafite e o gerador de pulso;
- O software DiSP é configurado de acordo com as especificações dos dados coletados para tratamento de sinais. Como exemplo, a taxa de amostragem, o hit length, o threshold, pré-trigger, ganho do pré-amplificador, filtro passa baixa e alta, Hit definition time (HDT), peak definition time (PDT) e o hit lockout time (HLT);
- Definição dos gráficos que serão mostrados no computador durante a aquisição dos dados;
- Posicionamento do extensômetro no corpo-de-prova e execução do ensaio;

As identificações dos cp's são feitas através de um lápis-gravador pneumático, onde são possíveis a marcação no metal com suas devidas nomenclaturas criadas para identificar cada tipo de corpo-de-prova. A calibração dos sensores foi feita utilizando duas técnicas diferentes. A primeira através de um gerador de pulso elétrico, que a própria placa de EA disponibiliza através de seu programa DiSP, chamado AST – Automatic Sensor Testing. Esta calibração se tornou mais confiável por ser uma calibração automática e ser possível uma boa repetibilidade do sinal. O segundo método de calibração foi o da quebra de grafite, utilizado mais por ser um método recomendado em algumas

normas, possibilitando a comparação dos resultados da calibração com o esperado pelas normas.

Segundo a Norma ASTM [ASTM, 1988], o grafite deve ser de 0,3 a 0,5 mm diâmetro, com dureza 2H. Daí, a quebra da grafite no material gera uma repetibilidade da onda acústica, dando resultados satisfatórios para determinação das respostas dos sensores.

## 2.6 – TRATAMENTO DOS SINAIS

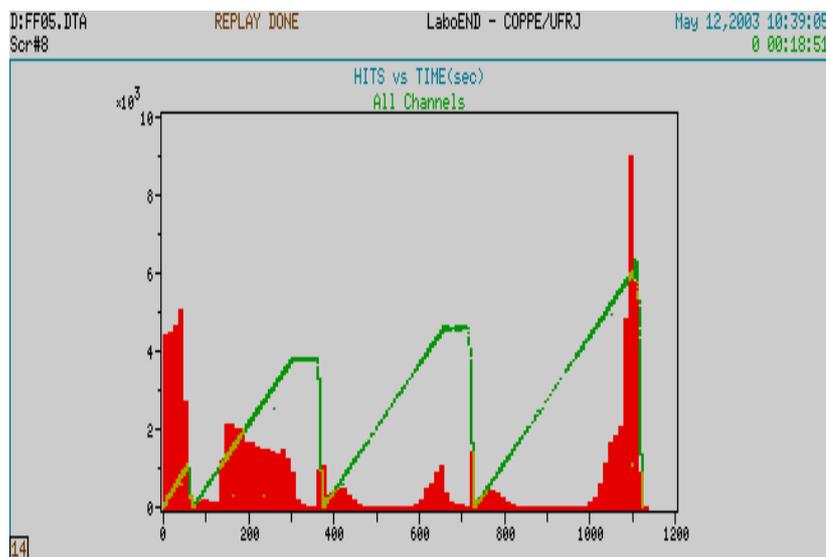
Após a realização dos ensaios de tração utilizando sensores de emissão acústica para captação dos sinais emitidos, a etapa seguinte consiste em digitalizar os sinais de EA e analisar as regiões pertinentes para o processamento. Para este procedimento foram utilizados quatro softwares: DisP-loc®, DisP-tra®, MatLab® e Fortran®. Os sinais foram gravados no disco rígido em arquivos com extensão “\*.dta”, referente a linguagem de máquina gerada pela placa de EA, PCI-DSP4. Os passos para tratamento dos sinais estão descritos logo a seguir:

1. Através do programa DisP-tra®, gera o replay do arquivo criado no ensaio. Manda exportar os eventos de cada canal em ‘ASCII’ para um determinado diretório. Para esse mesmo arquivo exporta em ‘AE data’ onde criará o novo arquivo com extensão \*.dta.
2. Utilizando o programa DisP-loc®, aciona-se o replay do novo arquivo criado com extensão \*.dta para que ele imprima na tela do computador e salve com extensão \*.txt os parâmetros como: amplitude, energia, canal, waveform, etc.
3. O próximo passo é utilizar o executável ATASC que vem junto com o software DisP-loc® para gerar um arquivo com extensão \*.dat, excluindo o cabeçalho e definindo o tempo em segundos.
4. Com a rotina criada no programa MatLab®, utiliza-o para carregar os arquivos criados com extensão \*.dat, \*.txt, \*.001, \*.002, \*.003 e \*.004. Assim, a-

nalisam-se as regiões interessantes para processar o sinal e anota a que intervalo de eventos se refere aquela região desejada. Com outra rotina, concatena o intervalo de eventos, gerando assim um só arquivo.

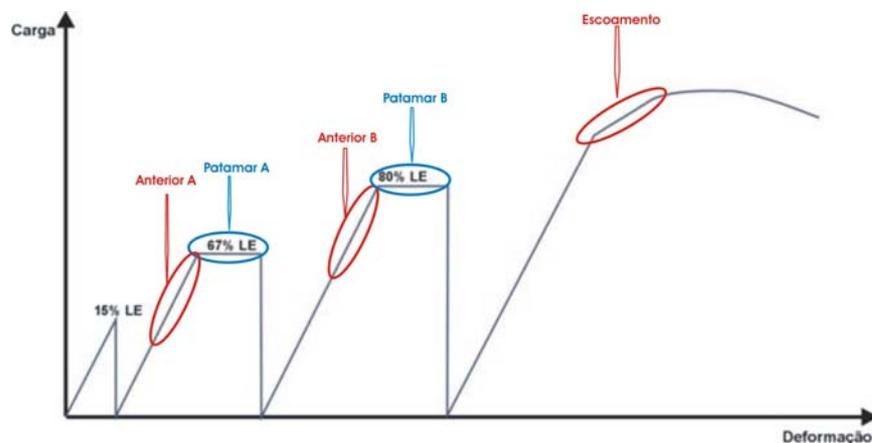
5. Com esse arquivo utiliza-se o programa Fortran® para eliminar todos os zeros indesejáveis deixando apto o sinal para processamento.

Os sinais foram classificados em 5 regiões distintas para cada ensaio referente a um corpo de prova. No ensaio de tração, em todos os casos, apresentaram quatro estágios: o primeiro referente a 15% do limite de escoamento, somente para que as garras se acomodem nos CP's; o segundo estágio atinge 67% do limite de escoamento, representando assim uma situação de pressão de operação de um equipamento; o terceiro chega até 80% do LE, exemplificando um teste hidrostático; e por final, o ensaio atinge 110% do LE. Para cada passagem de estágio nos ensaios de tração, o gráfico apresenta um patamar propositalmente, sendo esta região analisada pelo processamento de sinais. A figura 2.14 mostra o número de eventos gerados no tempo para todos os canais no cp ff05 (vermelho) e sobrepondo este gráfico há o gráfico Carga X Tempo (verde).



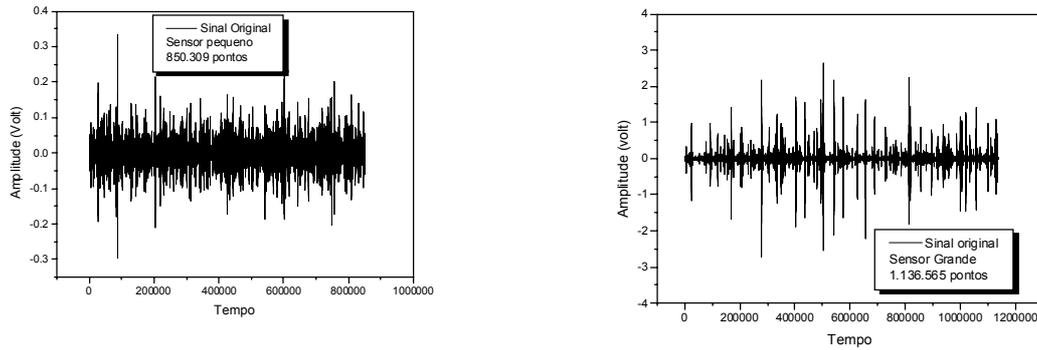
**Figura 2.14.** Gráfico Evento X Tempo sobrepondo o gráfico Carga X Tempo.

As cinco regiões foram escolhidas por representarem pontos significativos para avaliação e análise dos sinais de EA. As regiões receberam os seguintes nomes: AnteriorA, PatamarA, AnteriorB, PatamarB e Escoamento, conforme figura 2.15. Assim, a nomenclatura utilizada nos CP's seguiu o seguinte padrão: caso fosse o CP número 07 com defeito de falta de fusão inserido, canal 01 utilizado para aquisição dos dados, tem: anta01ff07x.dat, pata01ff07x.dat, esc01ff07x.dat, etc. A letra 'x' se refere ao processo de eliminação dos zeros no sinal.

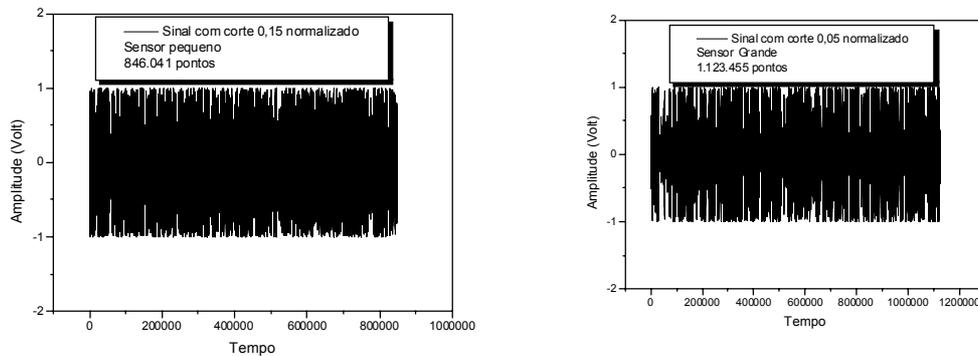


**Figura 2.15.** Gráfico Carga X Deformação implementado em todos os CP's.

Depois da preocupação de eliminar qualquer tipo de ruído no decorrer dos ensaios, observou-se que os sinais provenientes dos quatro sensores ainda apresentaram características de sinais ruidosos, conforme figura 2.16, principalmente nos 2 sensores maiores, tornando inviável o tratamento de sinais. Diante deste problema foi necessário criar uma rotina no FORTRAN® que eliminasse os picos indesejáveis de amplitude que caracterizavam fortemente presença de ruído no sinal, aplicando-se um corte e depois a normalização da amplitude do sinal, conforme figura 2.17.



*Figura 2.16. Sinais originais dos sensores grande e pequeno.*



*Figura 2.17. Sinais com cortes e normalizados dos sensores grande e pequeno.*

Vários procedimentos, que serão mostrados posteriormente, foram utilizados para eliminação de ruídos como: filtro e amaciamento dos sinais, e eliminação de picos extremamente grandes, que mostrou-se o mais indicado. Assim, iniciou-se o processo de tratamento dos sinais utilizando métodos fractais que ajudam na correlação dos sinais com os defeitos de soldagem.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram obtidos através dos sinais provenientes dos seus respectivos corpos de prova. Os cp's foram divididos pelo tipo de defeito inserido junto com sua numeração e a região analisada conforme informado no capítulo anterior. A tabela 3.1 mostra a nomenclatura utilizada no trabalho:

Região analisada	Sensor de EA	Corpo de Prova	Nº corpo de prova
Anterior A ( <b>antA</b> )	<b>01</b>	Trinca Superficial ( <b>tr</b> )	<b>01</b>
Patamar A ( <b>patA</b> )	<b>02</b>	Falta de Fusão ( <b>ff</b> )	<b>02</b>
Anterior B ( <b>antB</b> )	<b>03</b>	Falta de Penetração ( <b>fp</b> )	<b>03</b>
Patamar B ( <b>patB</b> )	<b>04</b>	Defeitos Volumétricos ( <b>vo</b> )	<b>04</b>
Escoamento ( <b>esc</b> )		Metal de Base ( <b>mb</b> )	<b>05</b>
		Metal de Solda ( <b>ms</b> )	<b>06</b>
			<b>07</b>
			<b>08</b>
Ex:	esc02fp01	Região do escoamento; canal 02; com falta de penetração; corpo de prova nº 01.	

*Tabela 3.1. Nomenclatura utilizada para os sinais.*

Na planilha abaixo estão todas as configurações utilizadas referentes ao corpo de prova e ao ensaio de emissão acústica junto com a figura 3.1 que mostra as medidas estabelecidas no corpo de prova.

CP	TTAT	Reforço	Defeito	W(mm)	Tmm)	L(mm)	B(mm)	C(mm)	Modelo equipamento	Cons. Desl/V	Cons. Carga/V	Curva Carga	Param1	Param2	Arquivo DTA	
MB-06	NÃO	NÃO	NÃO	41,1	12,7	450	101,65	49,6	Instron 8800	15	50	A	Carga	Deslocamento	MB06	
MB-08	SIM	NÃO	NÃO	37,75	12,7	450	102,7	49,6	Instron 8800	15	50	A	Carga	Deslocamento	MB08	
VO-05	SIM	NÃO	SIM	39,65	12,7	450	98,45	50,05	Instron 8800	15	50	A	Carga	Deslocamento	VO05	
VO-06	SIM	NÃO	SIM	39,6	12,7	450	99,1	49,9	Instron 8800	15	50	A	Carga	Deslocamento	VO06	
FP-03	NÃO	NÃO	SIM	39,55	12,7	450	99,6	50	Instron 8800	15	50	A	Carga	Deslocamento	FP03	
FP-04	NÃO	NÃO	SIM	39,55	12,75	450	98,3	50	Instron 8800	15	50	A	Carga	Deslocamento	FP04	
FF-05	SIM	NÃO	SIM	39,7	12,7	450	99	50,25	Instron 8800	15	50	A	Carga	Deslocamento	FF05	
FF-06	SIM	NÃO	SIM	39,65	12,8	450	99,45	50	Instron 8800	15	50	A	Carga	Deslocamento	FF06	
TR-01	NÃO	NÃO	SIM	42,05	12,9	450	98,3	50,1	Instron 8800	15	50	A	Carga	Deslocamento	TR01	
TR-07	SIM	NÃO	SIM	41,9	12,95	450	98,35	50	Instron 8800	15	50	A	Carga	Deslocamento	TR07	
Sensores (modelo)																
Sensores (modelo)				Acoplante				Calibração dB(Canais)				Limiar				
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
MB-06	S9220	S9220	R15I-AST	R15I-AST	Óleo	Óleo	Óleo	Óleo	82	82	100	98	45	45	45	45
MB-08	S9220	S9220	R15I-AST	R15I-AST	Óleo	Óleo	Óleo	Óleo	80	80	100	100	45	45	45	45
VO-05	S9220	S9220	R15I-AST	R15I-AST	Óleo	Óleo	Óleo	Óleo	85	82	100	100	45	45	45	45
VO-06	S9220	S9220	R15I-AST	R15I-AST	Óleo	Óleo	Óleo	Óleo	85	85	100	100	45	45	45	45
FP-03	S9220	S9220	R15I-AST	R15I-AST	Óleo	Óleo	Óleo	Óleo	85	85	95	100	45	45	45	45
FP-04	S9220	S9220	R15I-AST	R15I-AST	Óleo	Óleo	Óleo	Óleo	85	80	100	100	45	45	45	45
FF-05	S9220	S9220	R15I-AST	R15I-AST	Óleo	Óleo	Óleo	Óleo	82	80	98	100	45	45	45	45
FF-06	S9220	S9220	R15I-AST	R15I-AST	Óleo	Óleo	Óleo	Óleo	80	80	100	100	45	45	45	45
TR-01	S9220	S9220	R15I-AST	R15I-AST	Óleo	Óleo	Óleo	Óleo	85	85	100	100	45	45	45	45
TR-07	S9220	S9220	R15I-AST	R15I-AST	Óleo	Óleo	Óleo	Óleo	82	82	100	100	45	45	45	45
Amostragem (kS/s)																
Amostragem (kS/s)				Hit Length (kb)				Filtro Low Pass (kHz)				Filtro High Pass (kHz)				
1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
MB-06	1000	1000	1000	1000	15	15	15	15	20	20	20	20	400	400	400	400
MB-08	1000	1000	1000	1000	15	15	15	15	20	20	20	20	400	400	400	400
VO-05	1000	1000	1000	1000	15	15	15	15	20	20	20	20	400	400	400	400
VO-06	1000	1000	1000	1000	15	15	15	15	20	20	20	20	400	400	400	400
FP-03	1000	1000	1000	1000	15	15	15	15	20	20	20	20	400	400	400	400
FP-04	1000	1000	1000	1000	15	15	15	15	20	20	20	20	400	400	400	400
FF-05	1000	1000	1000	1000	10	10	10	10	20	20	20	20	400	400	400	400
FF-06	1000	1000	1000	1000	10	10	10	10	20	20	20	20	400	400	400	400
TR-01	1000	1000	1000	1000	15	15	15	15	20	20	20	20	400	400	400	400
TR-07	1000	1000	1000	1000	15	15	15	15	20	20	20	20	400	400	400	400

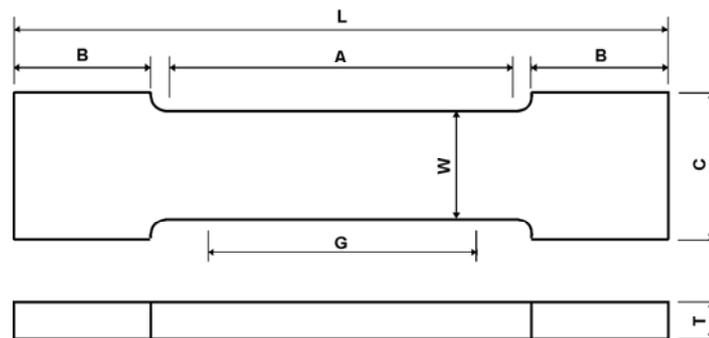
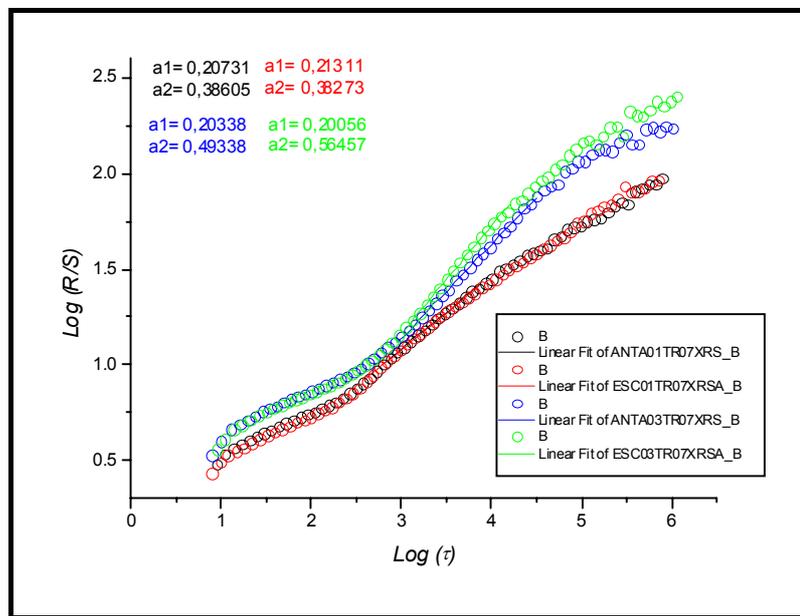


Figura 3.1. Medidas do corpo de prova.

### 3.1 – PROCESSAMENTO DOS SINAIS

Primeiramente foram analisados os sinais originais com o número total de pontos ( $\approx 1.000.000$ ), sem nenhum tratamento, utilizando o método re-escalado de Hurst. Todos os gráficos que representam a análise de Hurst para os sinais originais apresentaram duas regiões. Na primeira, os valores da inclinação da reta são idênticos para todos os casos, independente do tipo de sensor, do defeito e da região do carregamento analisada. Na segunda região, os valores de Hurst (inclinação da reta) se comportaram de forma idêntica independentemente do tipo de defeito inserido no corpo de prova e da região de carregamento analisada, diferenciando-se somente no tipo de sensor utilizado, ou seja, sensores pequenos (canais 1 e 2) tendem a serem menores que os sensores grandes (canais 3 e 4), figuras 3.2 a 3.9. Sendo a primeira região sempre idêntica, a segunda região foi considerada um discriminador significativo, sendo utilizado como referência para o estudo.



**Figura 3.2.** Regiões ‘anta’ e ‘esc’ dos canais 1 e 3 (trinca superficial).

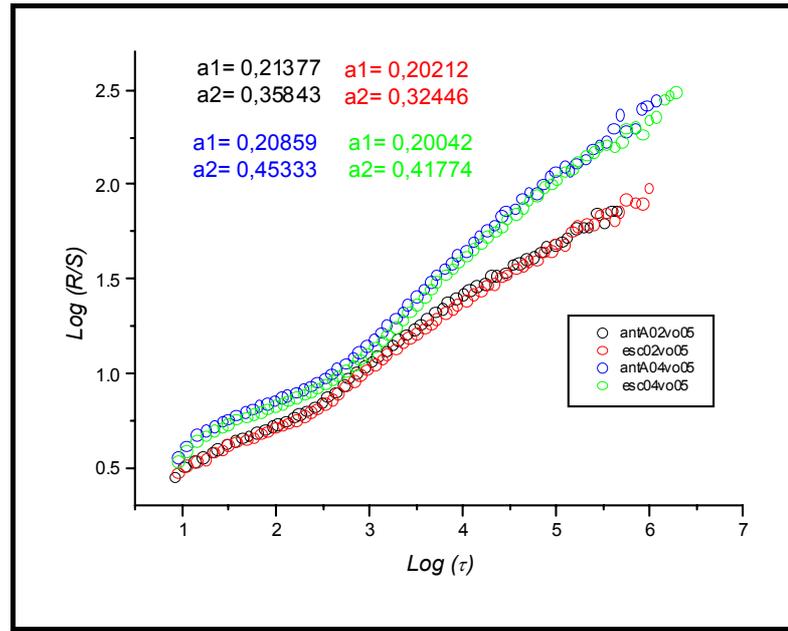


Figura 3.3. Regiões 'antA' e 'esc' dos canais 2 e 4 (defeitos volumétricos).

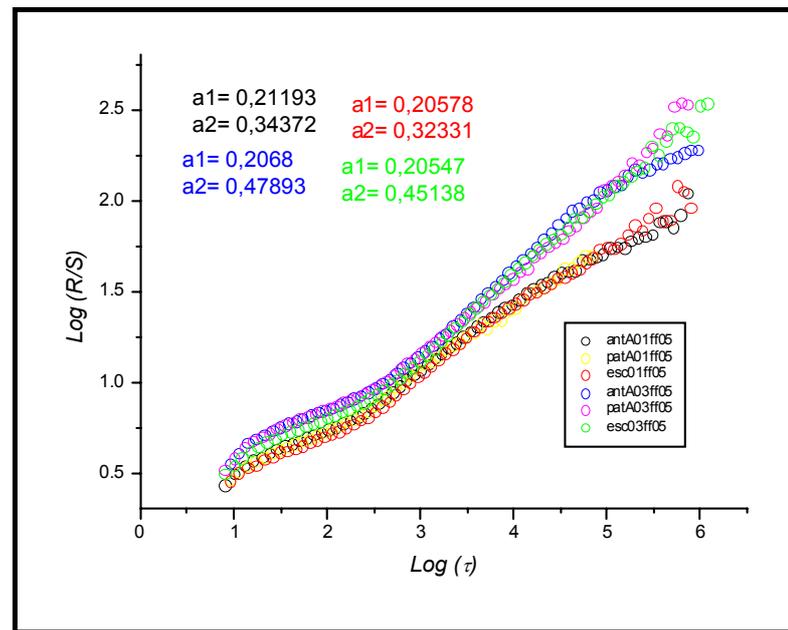


Figura 3.4. Regiões 'antA', 'patA' e 'esc' dos canais 1 e 3 (falta de fusão).

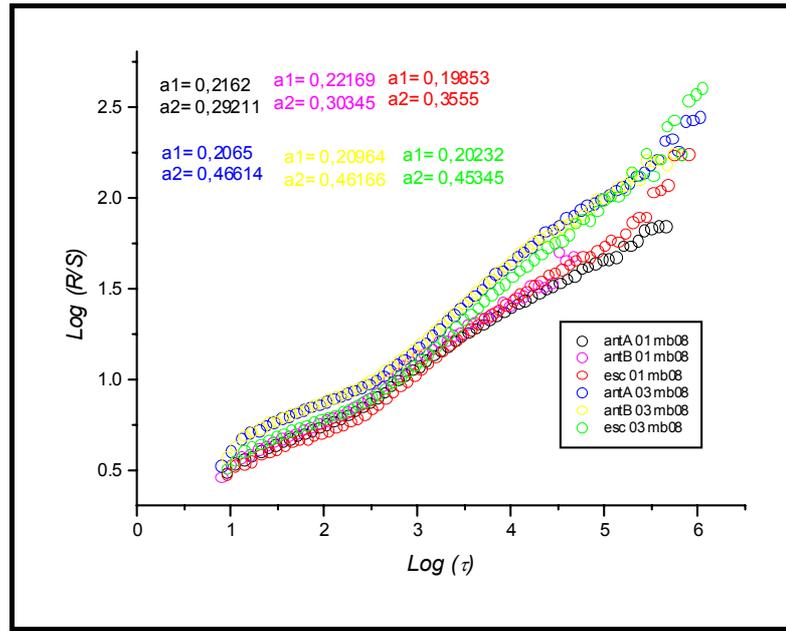


Figura 3.5. Regiões 'antA', 'antB' e 'esc' dos canais 1 e 3 (metal de base).

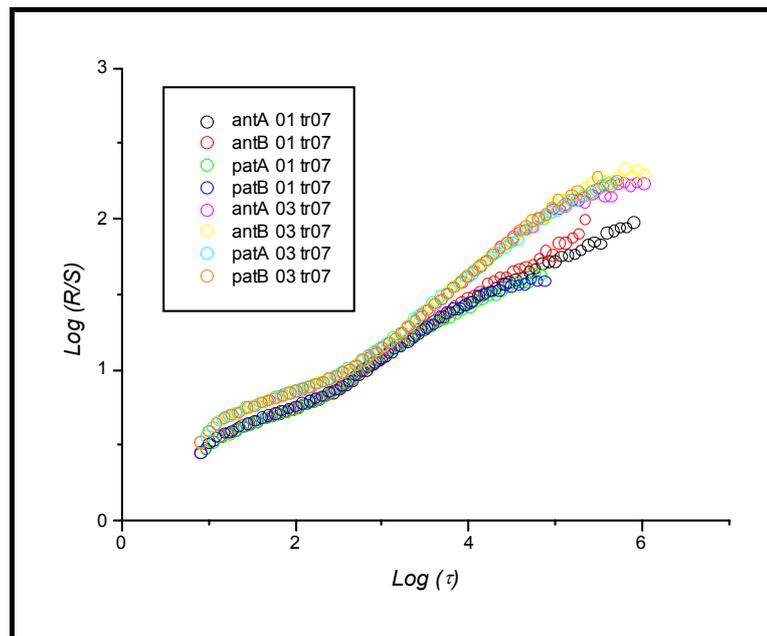
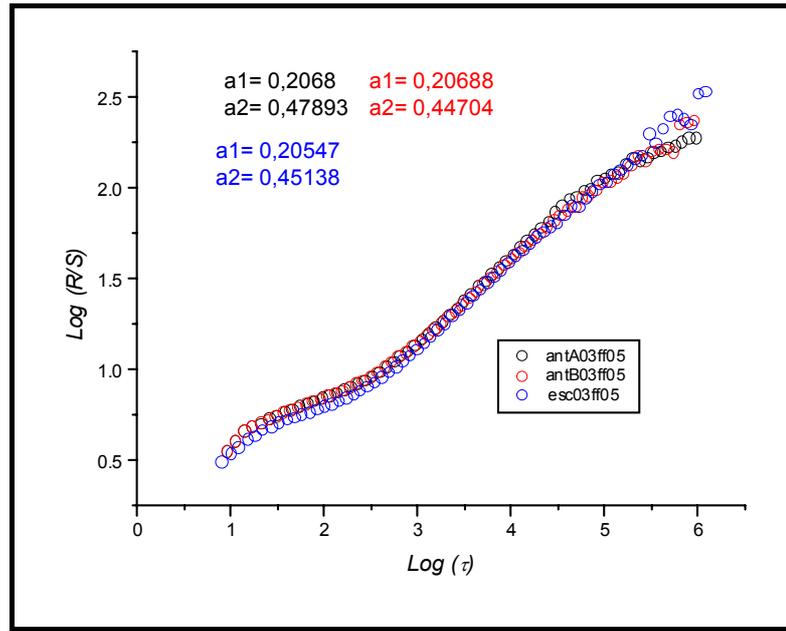
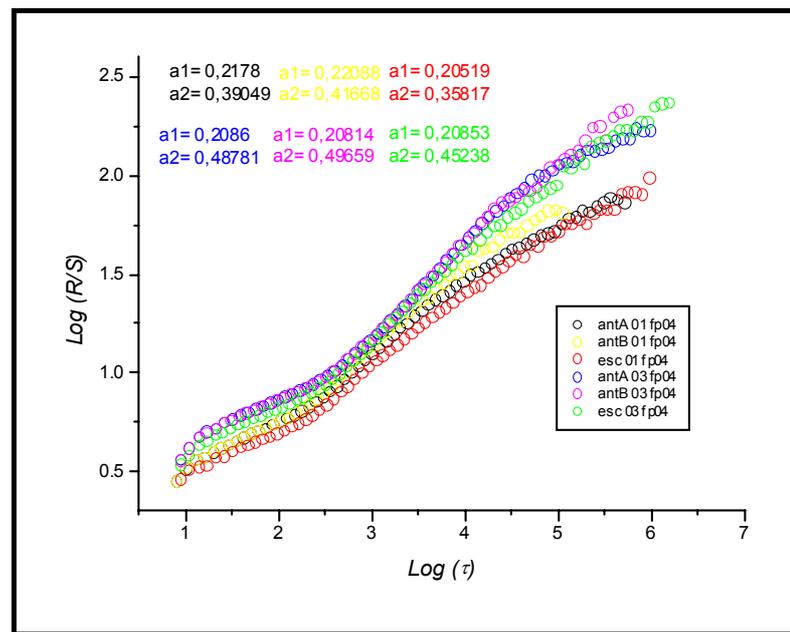


Figura 3.6. Regiões 'antA', 'antB', 'patA' e 'patB' dos canais 1 e 3 (trinca superficial).



**Figura 3.7.** Regiões 'antA', 'antB', 'esc' do canal 3 (falta de fusão).



**Figura 3.8.** Regiões 'antA', 'antB' e 'esc' dos canais 1 e 3 (falta de penetração).

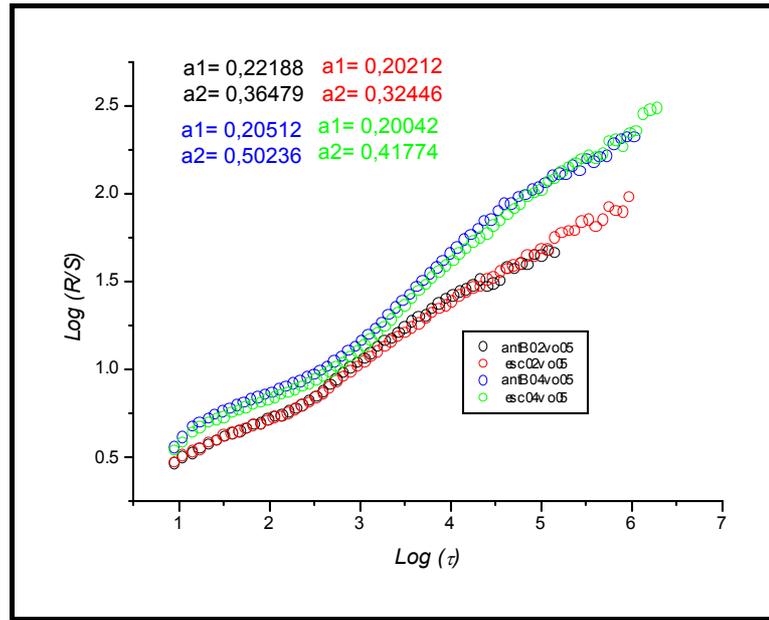


Figura 3.9. Regiões 'antB' e 'esc' dos canais 2 e 4 (volumétrico).

A forma do sinal, mostrada nas figuras 3.10 e 3.11 para os sensores pequenos e grandes respectivamente, justificam esse comportamento da inclinação da regressão linear para segunda região, observadas nas figuras citadas anteriormente. O que provavelmente representa um elevado ruído, principalmente para os canais 3 e 4 que possuem uma área de contato maior que os canais 1 e 2.

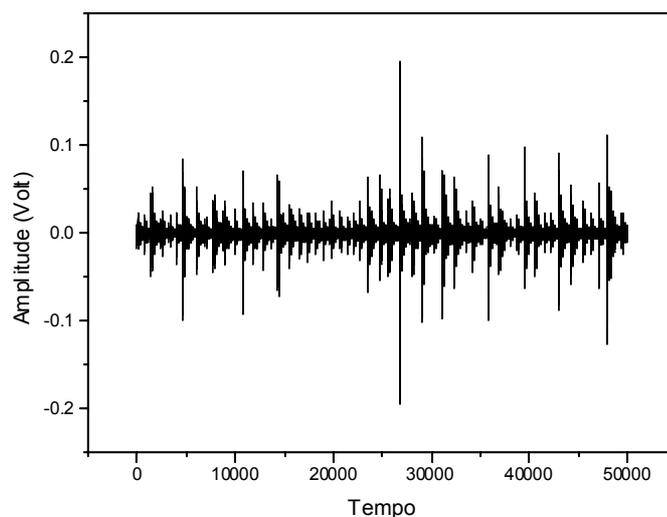
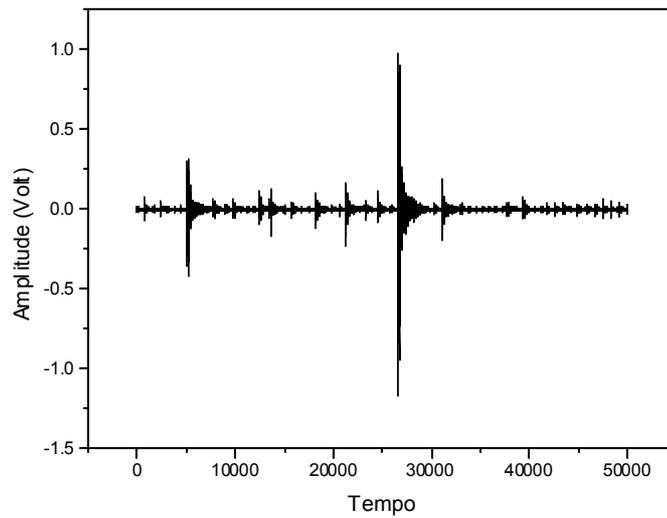
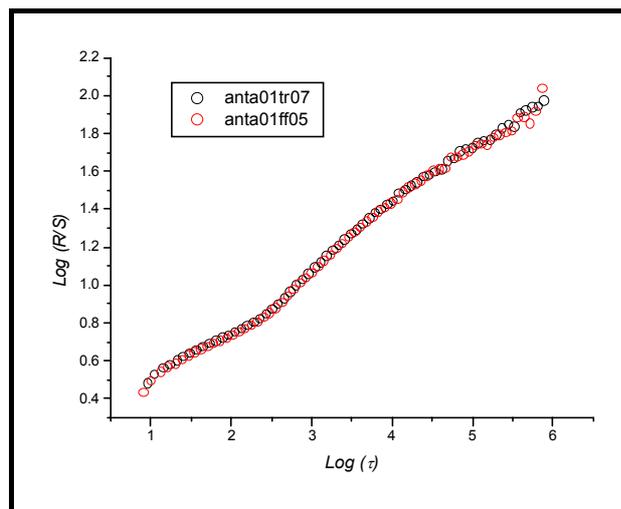


Figura 3.10. A forma do sinal para sensores pequenos com 50.000 pontos (antA01ff05).



**Figura 3.11.** A forma do sinal para sensores grandes com 50.000 pontos (anta03ff05).

Nas figuras 3.12 a 3.17, são mostradas comparações entre regiões analisadas com diversos tipos de corpos de prova com seus respectivos defeitos, para assim tentar analisar alguma correlação do sinal com o tipo de defeito em questão. Nos resultados apresentados verifica-se a semelhança dos sinais para as mesmas regiões com defeitos diferentes, não sendo portanto observada nenhuma correlação entre os sinais e os tipos de defeitos escolhidos.



**Figura 3.12.** Região anterior A do canal 01 nos corpos de prova tr07 e ff05.

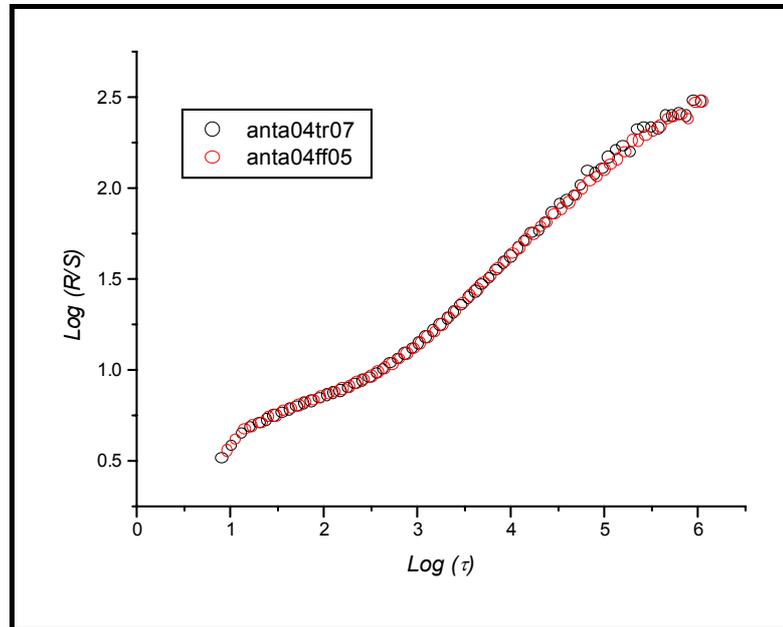


Figura 3.13. Região anteriorA do canal 04 nos corpos de prova tr07 e ff05.

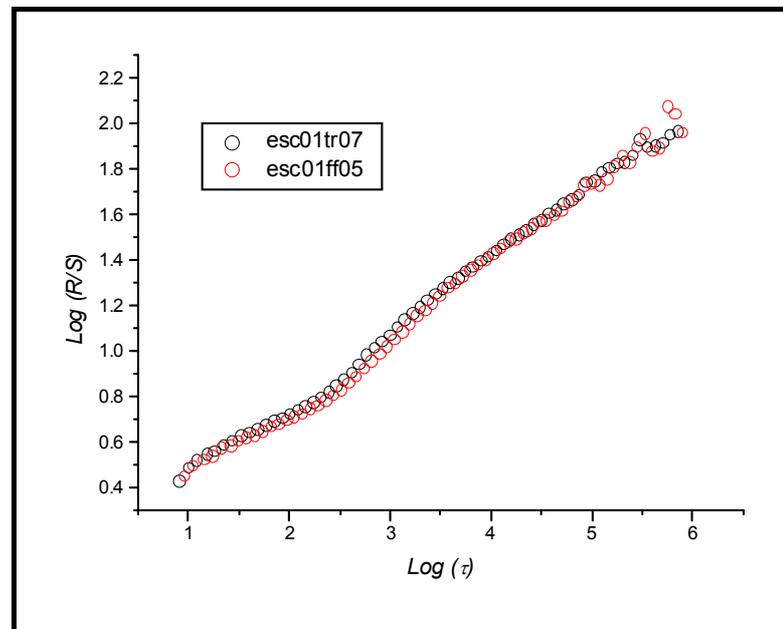


Figura 3.14. Região escoamento do canal 01 nos corpos de prova tr07 e ff05.

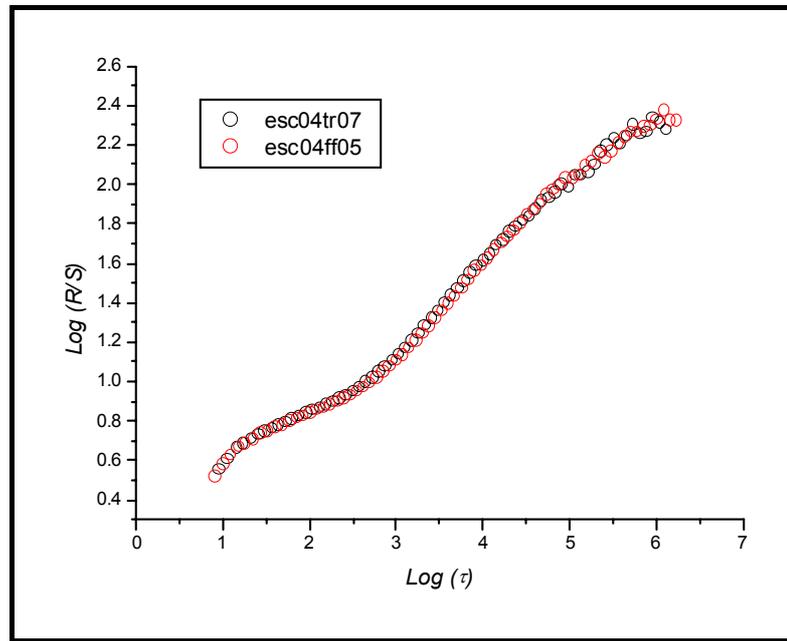


Figura 3.15. Região escoamento do canal 04 nos corpos de prova tr07 e ff05.

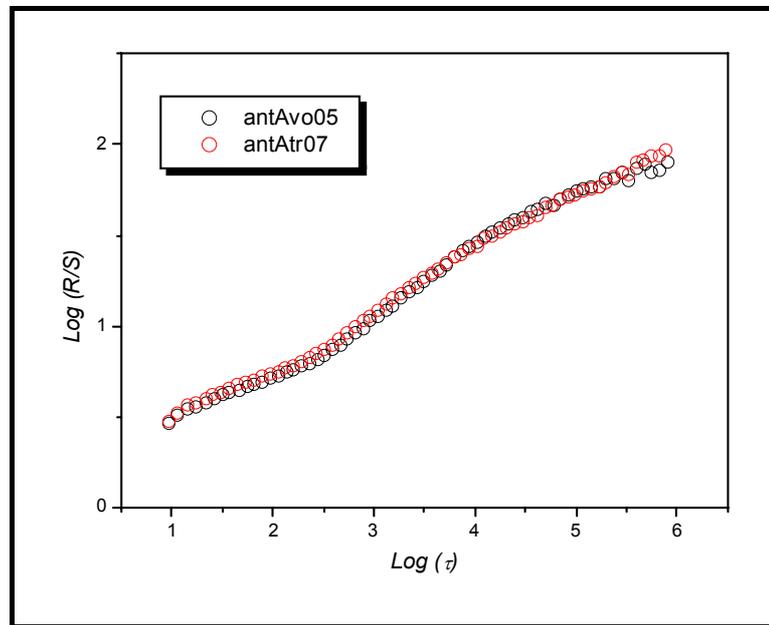
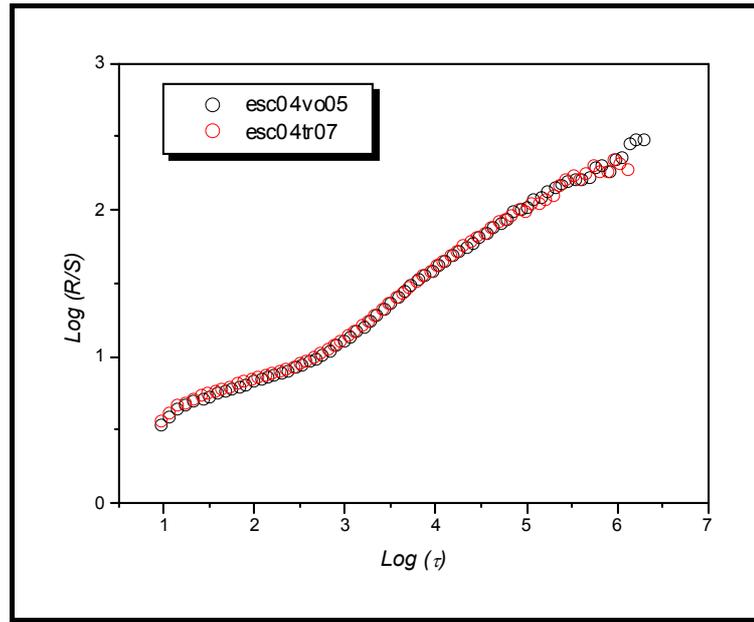


Figura 3.16. Região anterior do canal 01 nos corpos de prova tr07 e vo05.



*Figura 3.17. Região escoamento do canal 04 nos corpos de prova tr07 e vo05.*

Diante deste problema iniciou-se um processo de tratamento dos sinais para eliminar ruídos indesejáveis que comprometiam a avaliação do objetivo a ser alcançado.

### 3.2 – TRATAMENTO DOS SINAIS

Os tipos de ruídos podem ser classificados pelo seu espectro de frequência, por sua distribuição de amplitude e pelo fenômeno que o origina. Alguns desse ruídos podem surgir por diversas causas, como: de vibração térmica dos átomos (ruído Johnson) ou de flutuação da corrente elétrica (ruído Shot), mais popularmente conhecidos como ruído branco; de interferência por ondas eletromagnéticas existentes no meio ambiente. [CERQUEIRA et al., 2000].

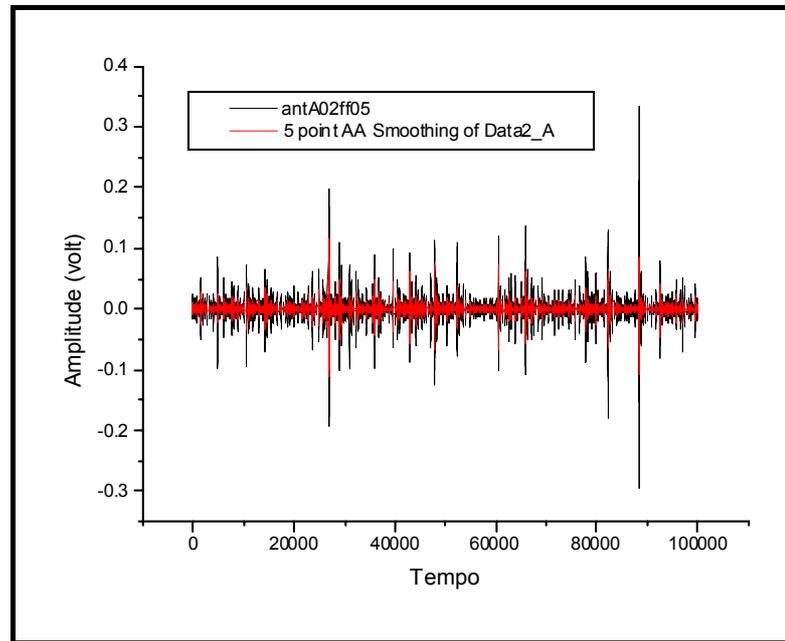
De um modo geral são vários os tipos de ruído, da mesma forma existem vários métodos que possibilitam a remoção dos mesmos, como: filtros, amaci-

amentos, etc. Alguns desses métodos foram utilizados para o trabalho para tentar obter um sinal mais puro, sem ruídos indesejáveis. Os resultados destes métodos podem ser observados a seguir:

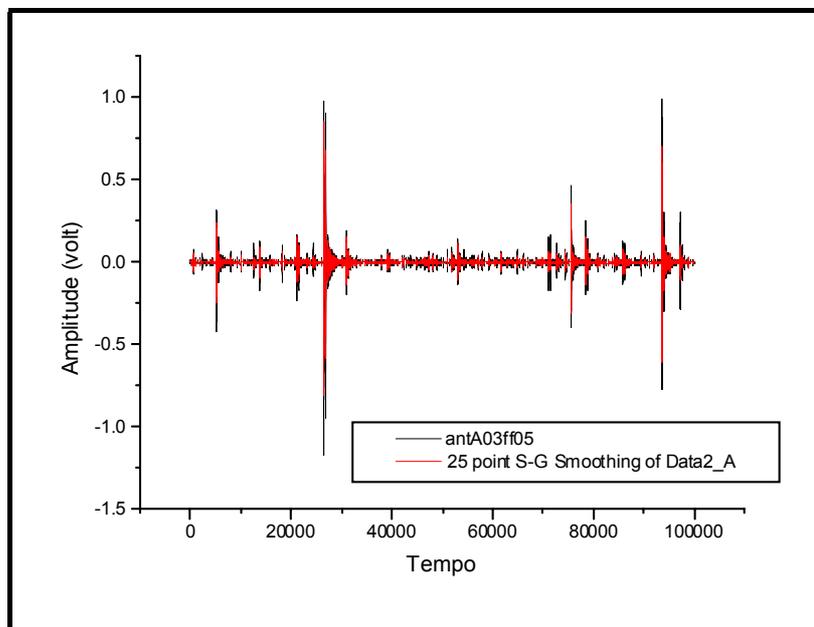
### **3.2.1 - AMACIAMENTO**

Foram utilizados três métodos para alisamento dos sinais: média móvel, Savitzky-Golay e Filtro FFT. Todos os métodos foram utilizados pelo programa Origin®. O primeiro é uma ferramenta para suavização de ruído em sinais onde a idéia básica consiste em dividir o sinal em uma série de intervalos com a mesma largura, seqüencialmente e ponto a ponto, e substituir o valor do ponto central do intervalo pelo valor médio do intervalo. O segundo baseia-se no seguinte procedimento: define-se a largura do intervalo do sinal, define-se o ponto central do intervalo, remove-se o ponto central do conjunto de pontos do intervalo, ajusta-se através do método de mínimos quadrados um polinômio de grau variável aos pontos restantes, utiliza-se o polinômio para estimar o valor do ponto removido, e por fim, desloca-se o intervalo para o ponto seguinte do sinal original e repete-se o processo anterior. O terceiro é o filtro FFT cuja idéia consiste em aplicar a transformada de Fourier e analisar o sinal no domínio da frequência. [OPPENHEIM et al., 1975; ORFANIDIS, 1995].

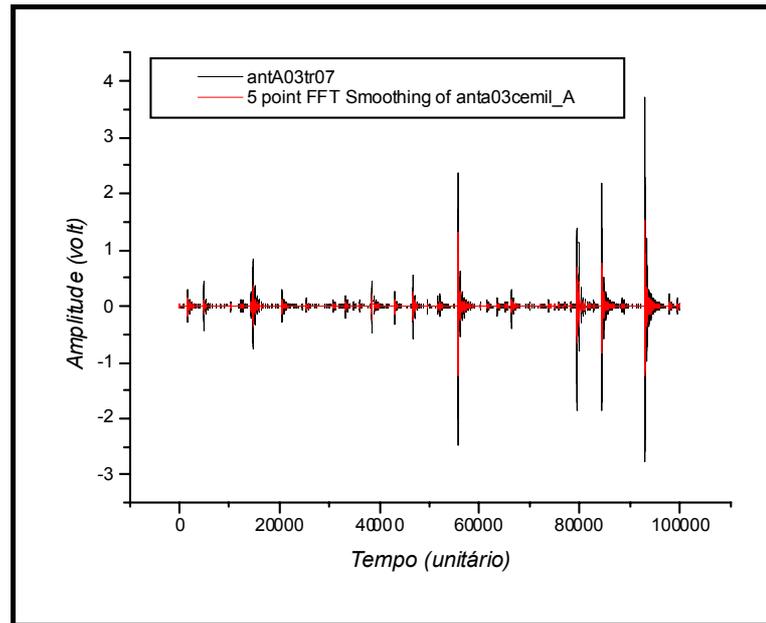
Nos gráficos 3.18 a 3.20 observa-se o sinal original (preto) e o sinal depois do amaciamento (vermelho) nos três casos citados anteriormente.



*Figura 3.18. Sinal original e tratado pelo método da média móvel com 5 pontos (antA02ff05).*



*Figura 3.19. Sinal original e tratado pelo método Savitzky-Golay com 12 pontos e 4º grau. (antA03ff05).*



**Figura 3.20.** Sinal original e tratado pelo método FFT com 5 pontos (antA02ff05).

Após tratamento dos sinais originais pelo método do amaciamento, suavizando os prováveis ruídos existentes, foi utilizado o método re-escalado de Hurst para discriminar os sinais dos corpos de prova e suas regiões analisadas. Primeiramente, nas figuras 3.21 e 3.22 mostra-se que foram utilizadas várias possibilidades de suavização do ruído para cada ferramenta utilizada, e mesmo assim o comportamento da função de Hurst,  $\log(R/S)$  continuou inalterado. Na figura 3.23 mostra-se que mesmo com a suavização dos ruídos do sinal pelo método da transformada rápida de Fourier as regiões analisadas permaneceram idênticas. Na figura 3.24 observa-se a diferença da função de Hurst do sinal original diante daqueles que sofreram tratamento, porém as regiões de escoamento e anterior ao escoamento permanecem semelhantes. Nota-se que há semelhança do comportamento do sinal com a utilização de duas ferramentas para amaciamento.

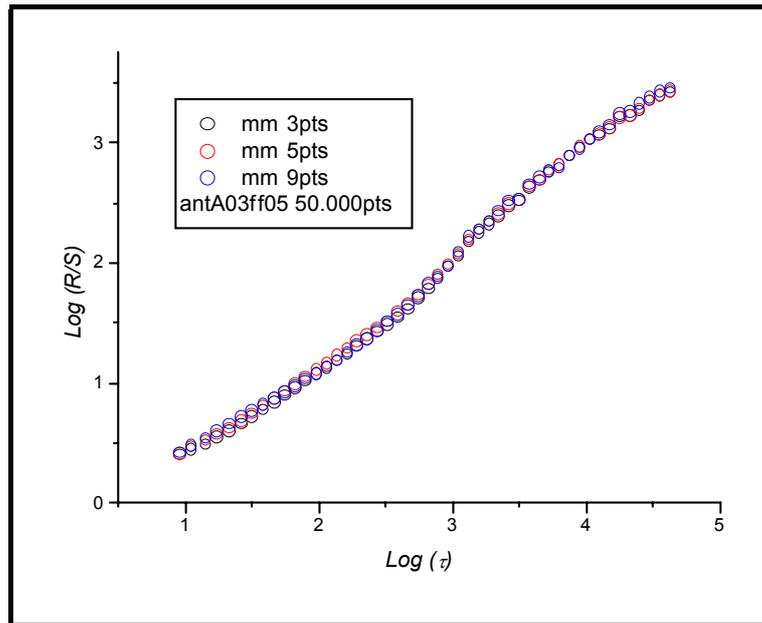


Figura 3.21. Método de amaciamento da Média Móvel utilizando 3, 5 e 9 pontos (antA03ff05).

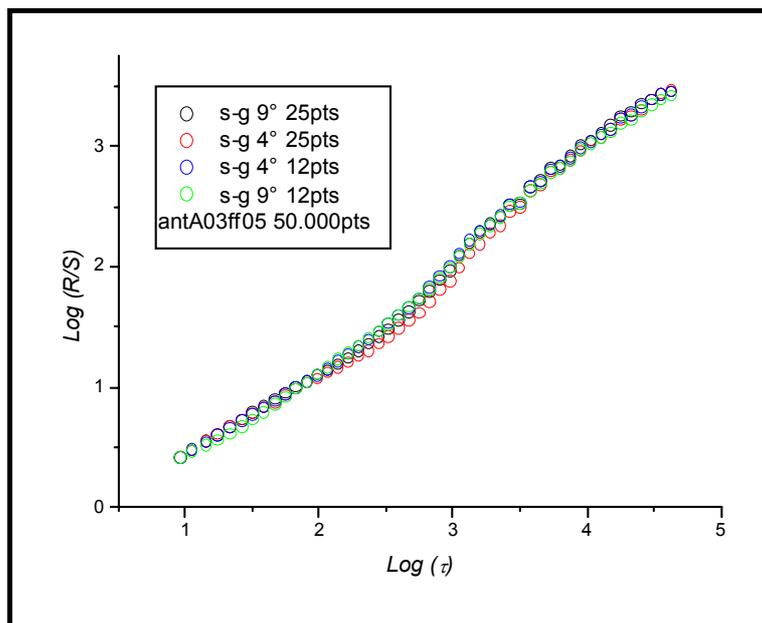


Figura 3.22. Método de amaciamento do Savitzky-Golay com polinômio 9° com 25 e 12 pontos e polinômio 4° com 25 e 12 pontos (antA03ff05).

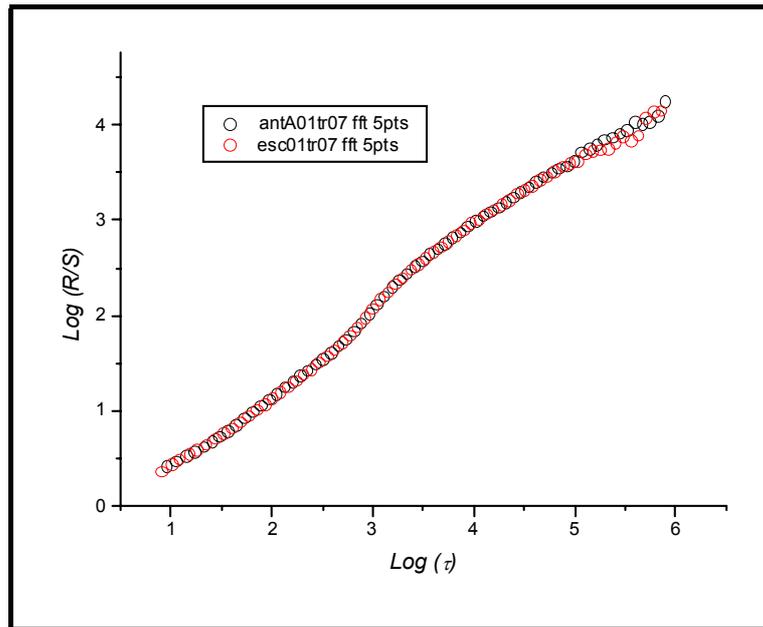


Figura 3.23. Amaciamento pelo método FFT nas regiões antA01tr07 e esc01tr07.

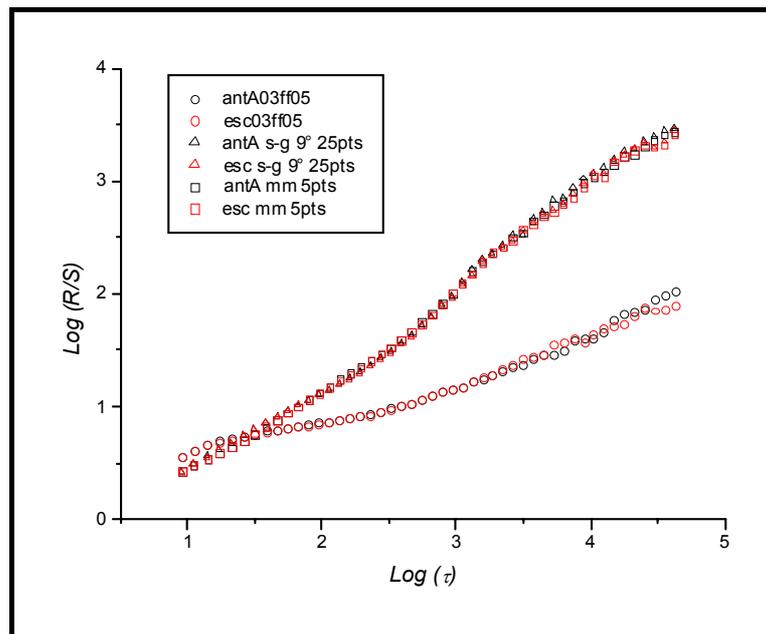
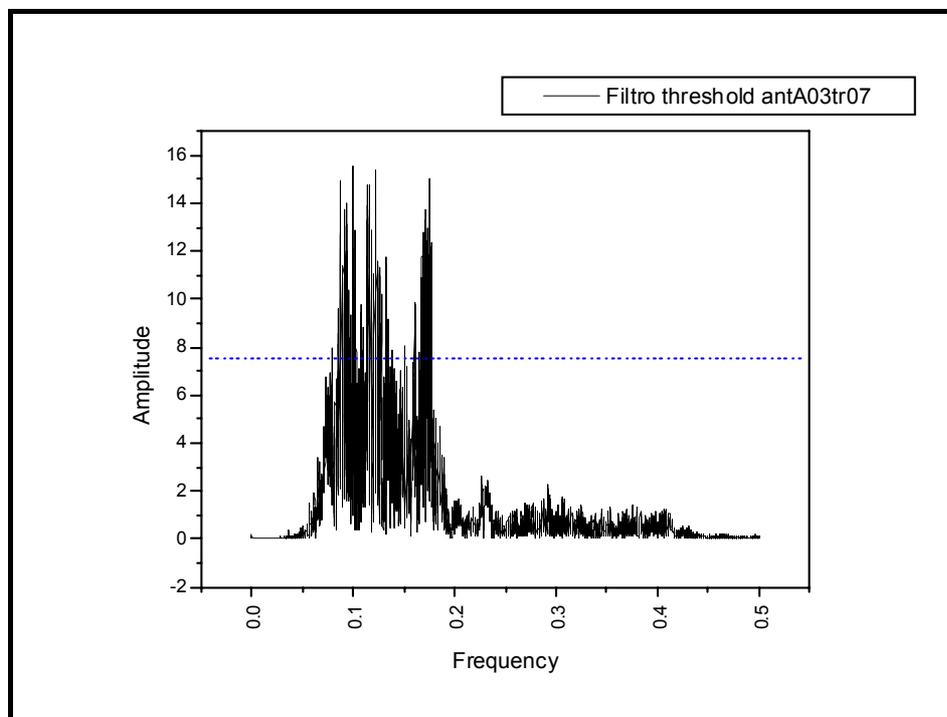


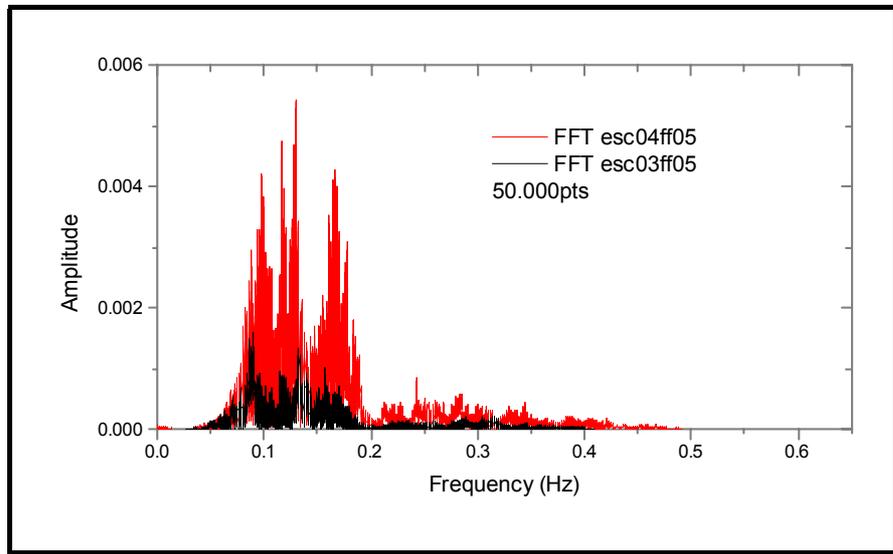
Figura 3.24. Sinal original, e tratado pela Média Móvel e Savitzky-Golay nas regiões antA03ff05 e esc03ff05.

### 3.2.2 – FILTROS

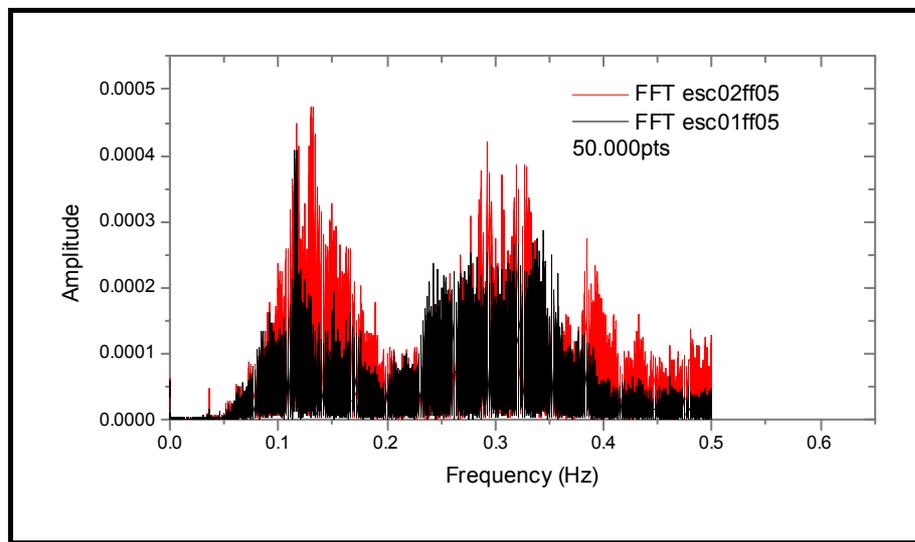
Os filtros foram outra ferramenta utilizada na tentativa de obter um sinal puro, sem ruídos. Foram utilizados métodos como o filtro Passa Baixa e Passa Alta que tem como princípio permitirem a passagem de componentes com frequência abaixo (Passa Baixa) ou acima (Passa Alta), de uma determinada frequência, chamada frequência de corte ou frequência de sintonia, e Passa Banda que permite a passagem de componentes em uma faixa de frequências. Outra ferramenta utilizada como filtro foi o método do limiar (threshold), onde o princípio consiste em eliminar no espectro de Fourier componentes com amplitudes inferiores a um dado valor limite, conforme figura 3.25. As figuras 3.26 a 3.29 mostram o FFT aplicado no sinal e a forma do sinal após o filtro Passa Alta.



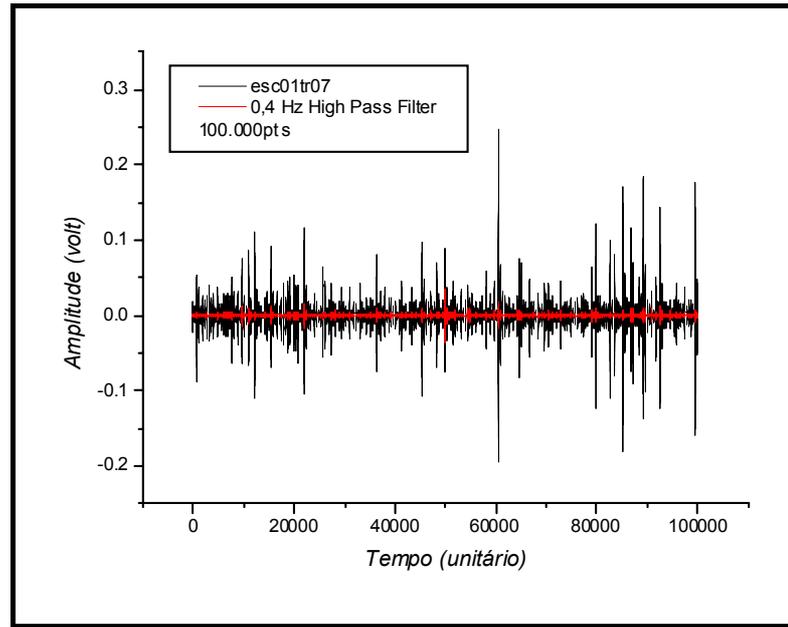
*Figura 3.25. Filtro pelo método limiar no sinal antA03tr07.*



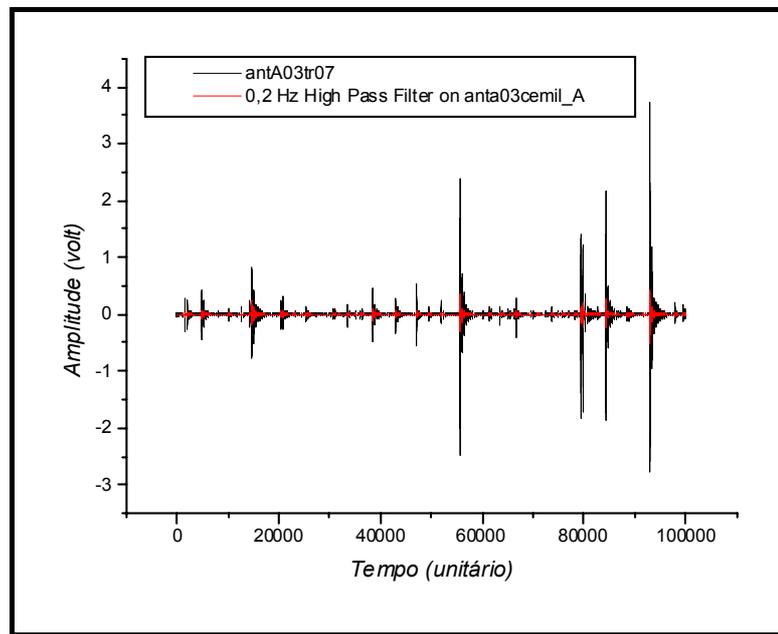
*Figura 3.26. FFT aplicada nos sinais esc03ff05 e esc04ff05.*



*Figura 3.27. FFT aplicada nos sinais esc01ff05 e esc02ff05.*

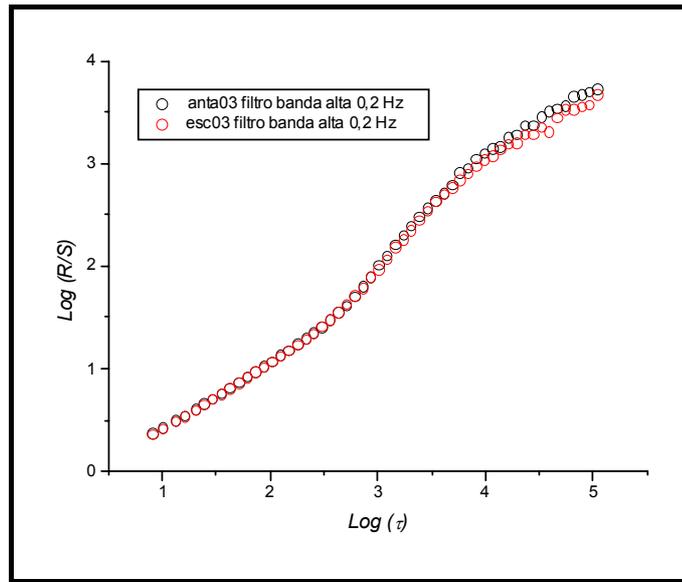


*Figura 3.28. Sinal original (preto) e depois filtrado (vermelho) pelo método Passa Alta no sinal esc01tr07.*

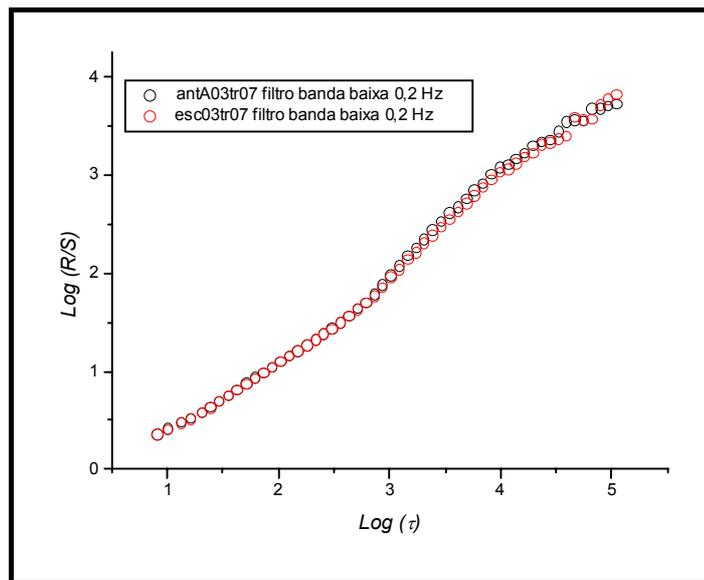


*Figura 3.29. Sinal original (preto) e depois filtrado (vermelho) pelo método Passa Alta no sinal antA03tr07.*

A seguir as figuras 3.30 a 3.33 mostram os sinais tratados pelo filtro sendo analisados pelo método re-escalado de Hurst para suas devidas regiões do ensaio. Observa-se o mesmo comportamento diante dos sinais em regiões diferentes, ou seja, regiões anteriores ao escoamento e durante o escoamento não se distinguem, independente do corpo de prova analisado.



**Figura 3.30.** Filtro Passa Alta nos sinais antA03tr07 e esc03tr07.



**Figura 3.31.** Filtro Passa Baixa nos sinais antA03tr07 e esc03tr07.

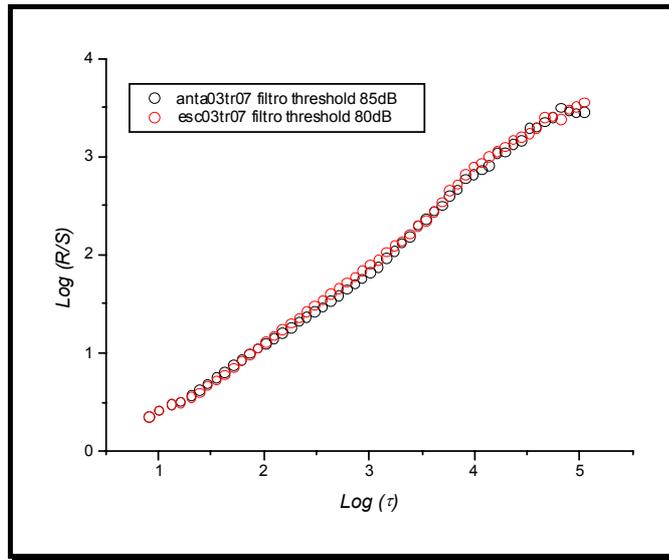


Figura 3.32. Filtro Threshold nos sinais antA03tr07 e esc03tr07.

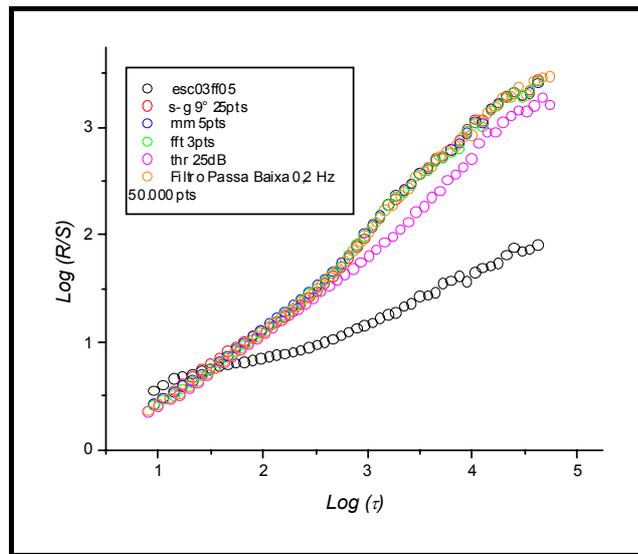


Figura 3.33. Comparação de alguns métodos utilizados para eliminação de ruídos com o sinal original (preto) esc03ff05.

### 3.2.3 – OUTROS MÉTODOS

Diante das tentativas sem sucesso de obter uma resposta significativa do sinal através da eliminação de ruído dos sinais feita anteriormente, foram propostos novos métodos de tratamento que consistiram na retificação dos sinais, na eliminação de picos e normalização dos sinais. Os resultados obtidos são mostrados a seguir:

#### 3.2.3.1 – Retificação dos Sinais

Diversas foram as tentativas de análise dos sinais retificando-os. Dos sinais retificados foram eliminados os picos, normalizando-os e aplicando métodos anteriormente utilizados para a eliminação de ruídos, como amaciamento e filtragem. A figura 3.34 mostra um sinal retificado com corte dos picos de amplitude.

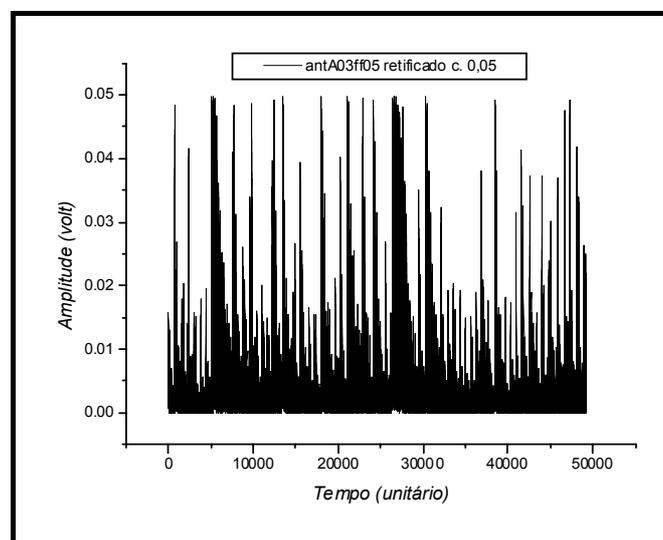


Figura 3.34. Sinal retificado com corte (*antA03ff05*).

As figuras 3.35 a 3.38 mostram o mesmo comportamento já verificado para a função de Hurst dos sinais nas diferentes regiões, independente do tipo de cp e dos tratamentos utilizados em cima dos sinais retificados.

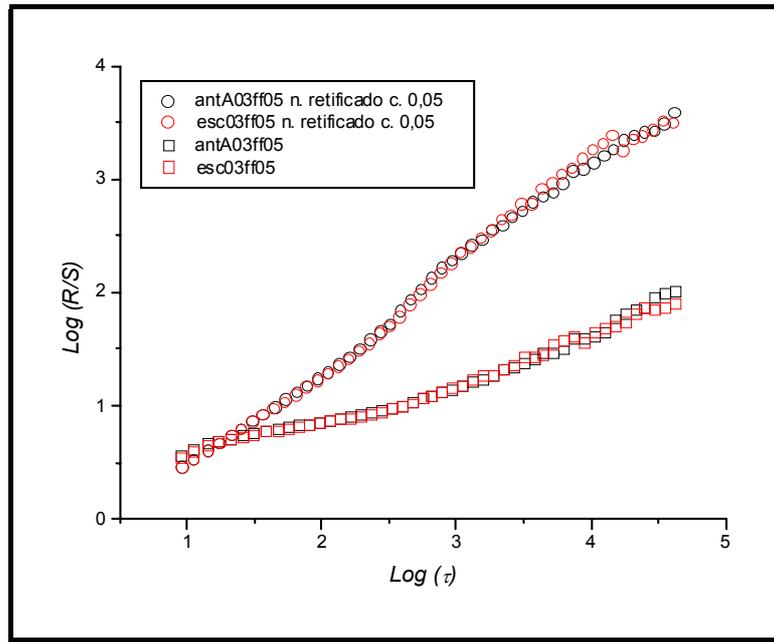


Figura 3.35. Sinal original e retificado com corte (*antA03ff05* e *esc03ff05*).

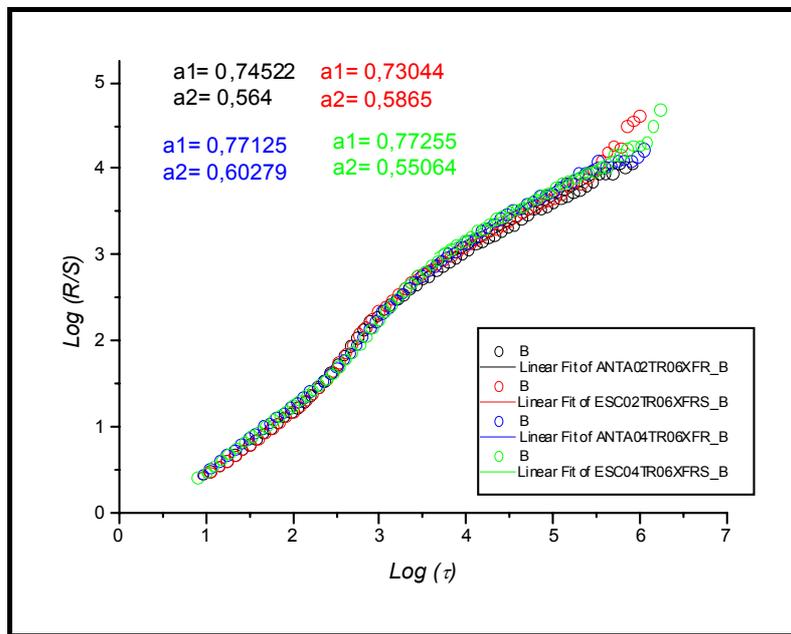


Figura 3.36. Sinais retificados *antA02tr06*, *esc02tr06*, *antA04tr06* e *esc04tr06*.

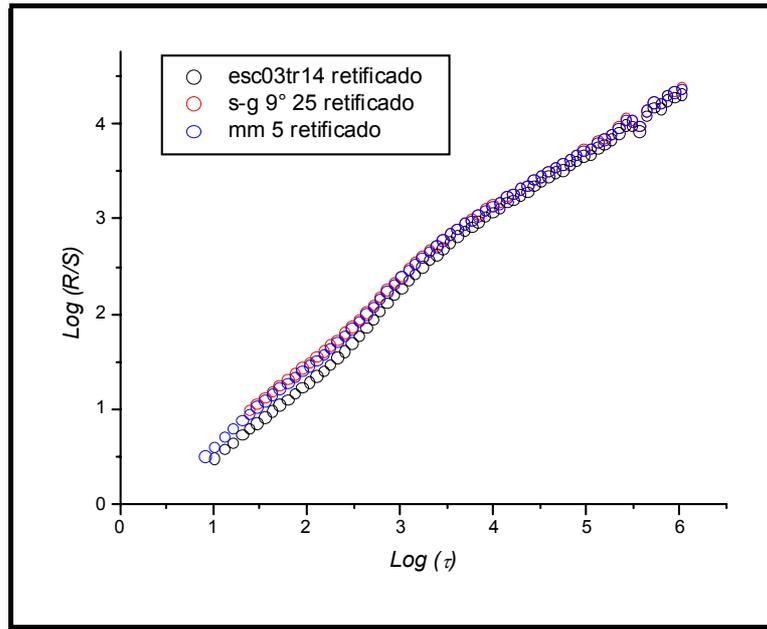


Figura 3.37. Sinal retificado e amaciado pelo método Média Móvel e Savitzky-Golay (esc03tr14).

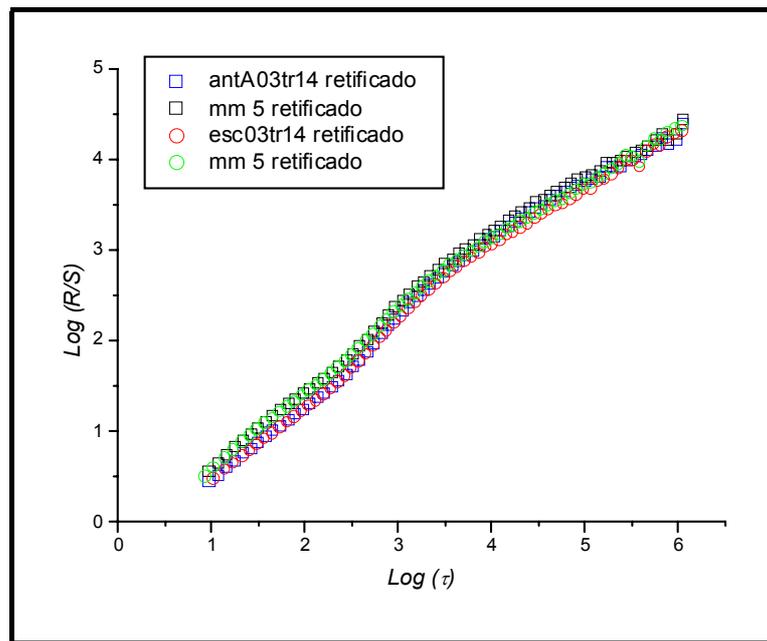
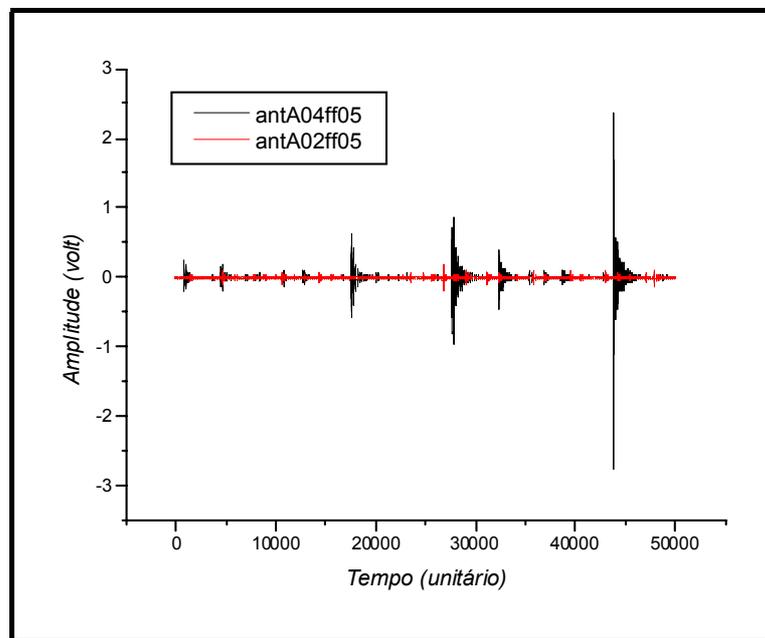


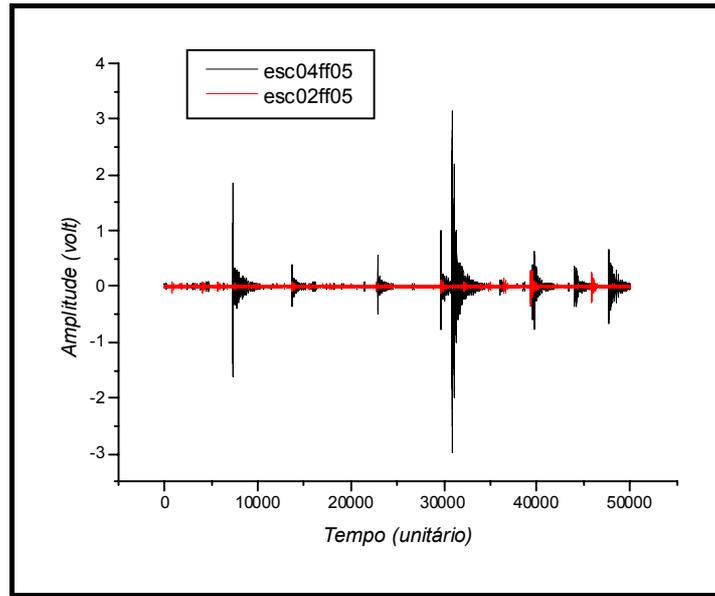
Figura 3.38. Sinal retificado e amaciado pelo método Média Móvel (antA03tr14 e esc03tr14).

### 3.2.3.2 – Eliminação dos Picos e Normalização dos Sinais

Tendo em vista as inúmeras tentativas sem sucesso para conseguir um discriminador dos sinais com a análise de Hurst, partiu-se do pressuposto que os enormes picos observados na escala de amplitude principalmente nos sensores maiores, canais 3 e 4, mascaravam de certa forma o sinal. Criou-se uma rotina que eliminasse os picos de amplitude e normalizasse o sinal. O corte era baseado na fração do maior e/ou menor pico com a amplitude desejada para o sinal, logo estes variando de 0 a 1. Nas figuras 3.39 e 3.40 mostram-se os sinais originais e as diferenças de escala de amplitude entre os sensores pequenos (vermelho) e grandes (preto). São analisados apenas os sinais na região anteriorA, e não nas outras regiões, anteriorB, patamarA e patamarB, pois testes feitos anteriormente comprovam a semelhança na análise de Hurst na região anteriorA com as outras regiões.

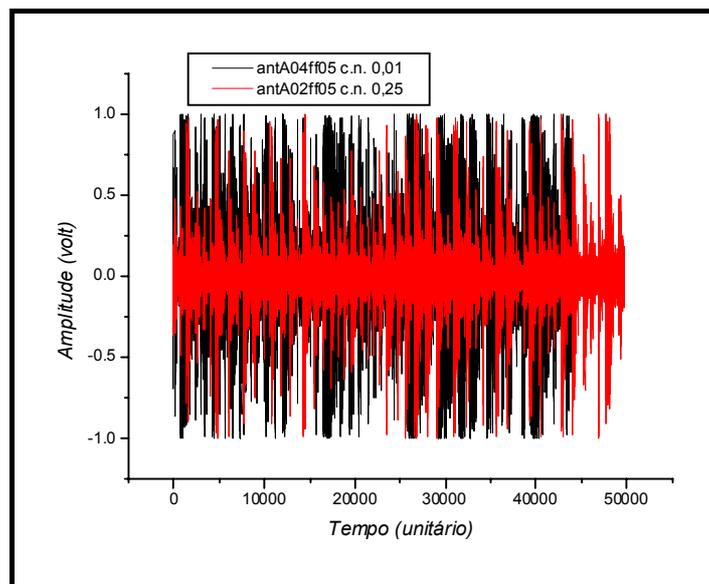


**Figura 3.39.** Sinal original para o sensor pequeno (vermelho, antA02ff05) e grande (preto, antA04ff05).



**Figura 3.40.** Sinal original para o sensor pequeno (vermelho, *esc02ff05*) e grande (preto, *esc04ff05*).

Na figura 3.41 e 3.42 observam-se os sinais com corte dos picos e normalizados para ambos os canais citados acima, em regiões diferentes. Verifica-se então, uma padronização dos sinais após este tratamento, para posterior análise de Hurst.



**Figura 3.41.** Sinal com corte e normalização (*antA02ff05* e *antA04ff05*).

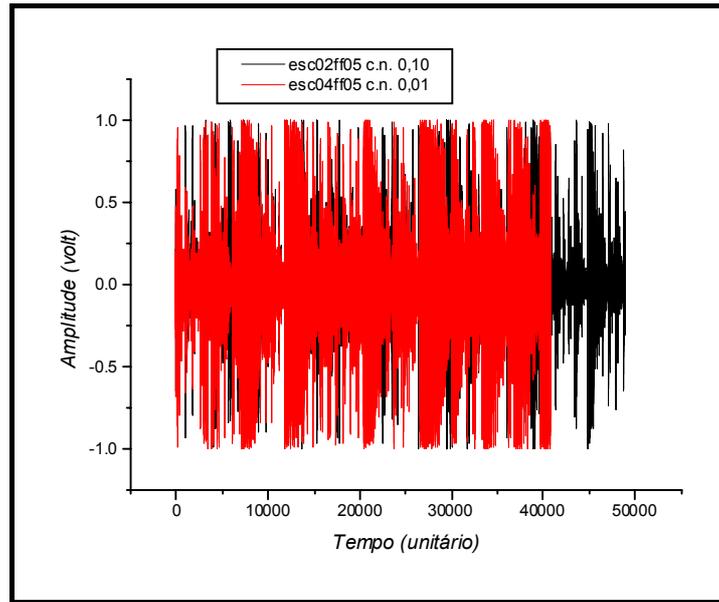


Figura 3.42. Sinal com corte e normalização (esc02ff05 e esc04ff05).

Nas figuras 3.43 e 3.44 observa-se bem uma acentuada diferença na função de Hurst na região anterior ao escoamento e na do escoamento, comportamento que se verifica em todos os tipos de cp, diferentemente do que ocorre nos sinais originais.

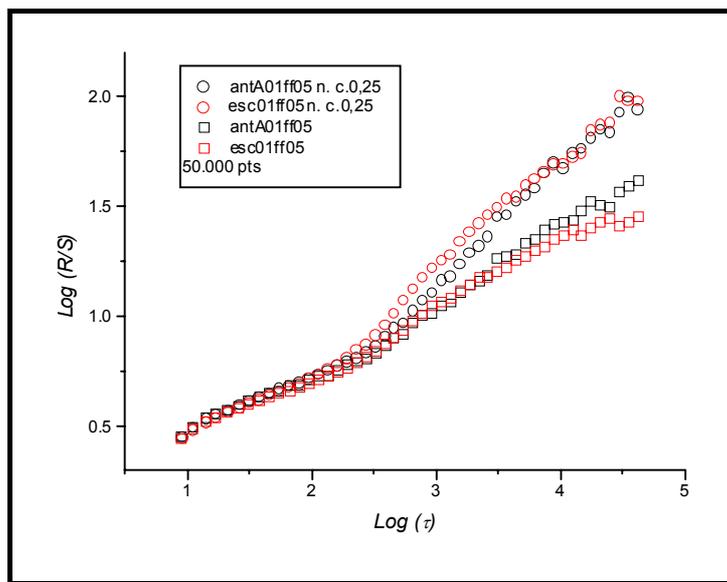
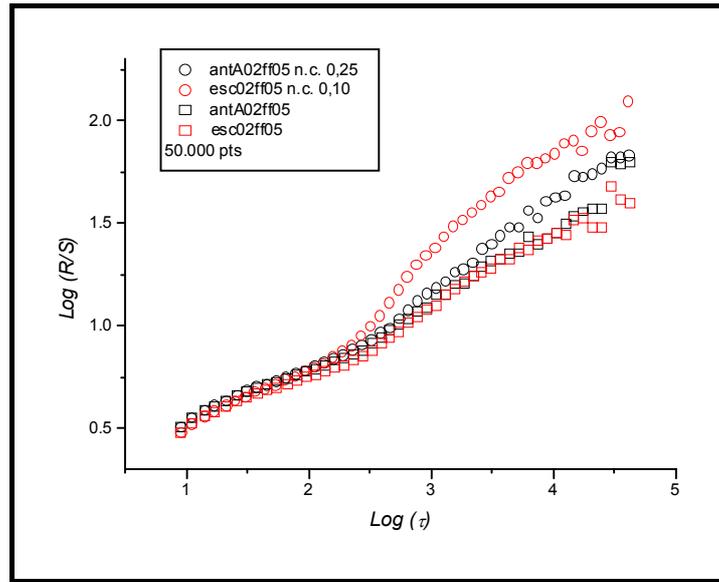
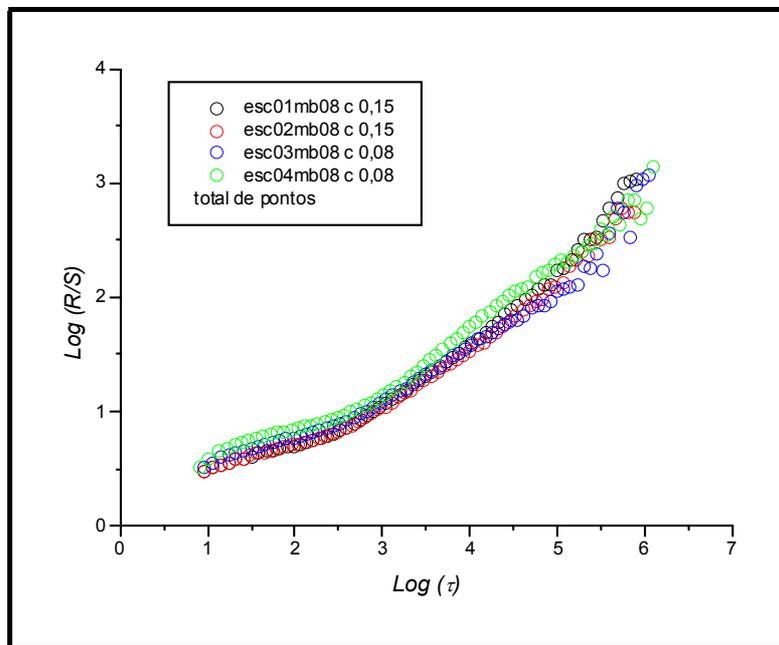


Figura 3.43. Sinal original e normalizado com corte (antA01ff05 e esc01ff05).



*Figura 3.44. Sinal original e normalizado com corte (antA02ff05 e esc02ff05).*

Na figura abaixo, 3.45, nota-se a padronização da função de Hurst para os sinais em todos os canais, o que não era possível nos sinais originais.



*Figura 3.45. Sinal com corte e normalizado (esc01mb08, esc02mb08, esc03mb08 e esc04mb08).*

Nas figuras 3.46 a 3.56 observa-se a diferenciação da função de Hurst na região de escoamento com a região anterior, independente do corpo de prova analisado com ou sem defeito. Para os corpos de prova com defeito o coeficiente de Hurst, na região de separação, foi verificado ser sempre maior na região de escoamento.

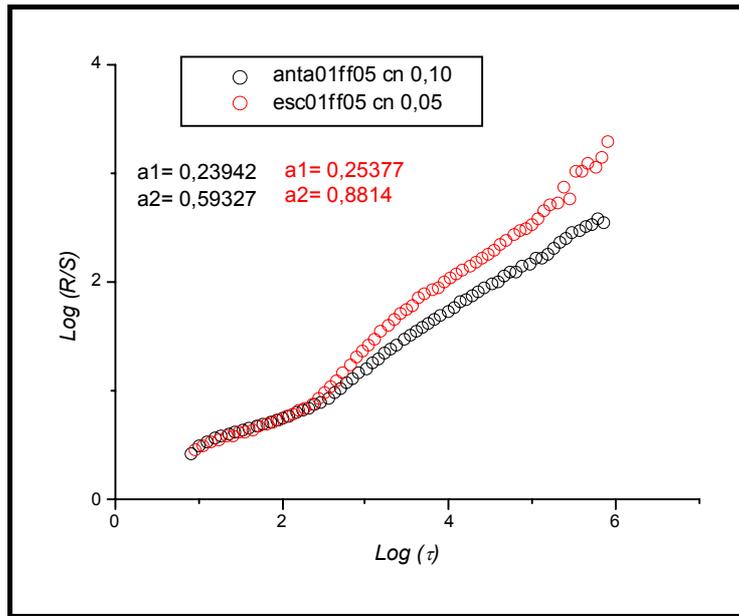


Figura 3.46. Sinal com corte e normalizado (anta01ff05 e esc01ff05).

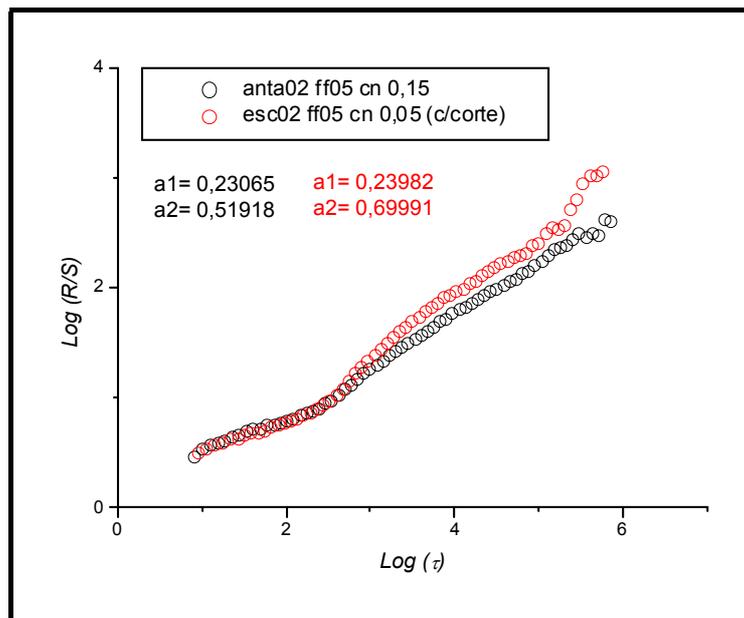


Figura 3.47. Sinal com corte e normalizado (anta02ff05 e esc02ff05)

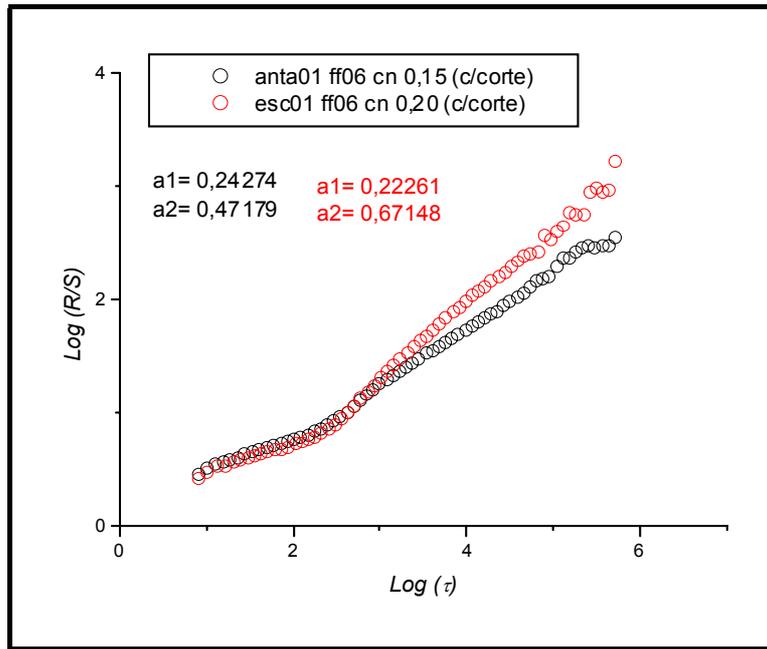


Figura 3.48. Sinal com corte e normalizado (anta01ff06 e esc01ff06).

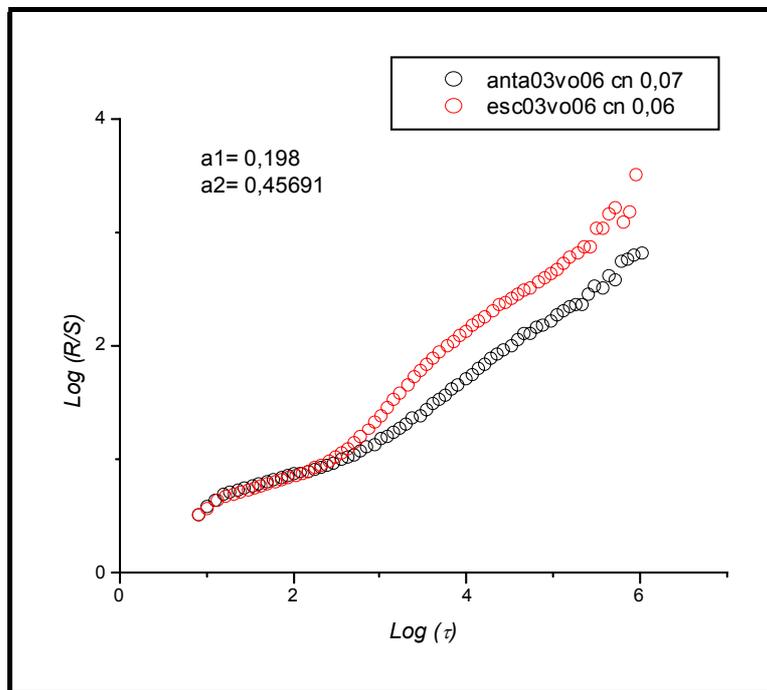


Figura 3.49. Sinal com corte e normalizado (anta03vo06 e esc03vo06).

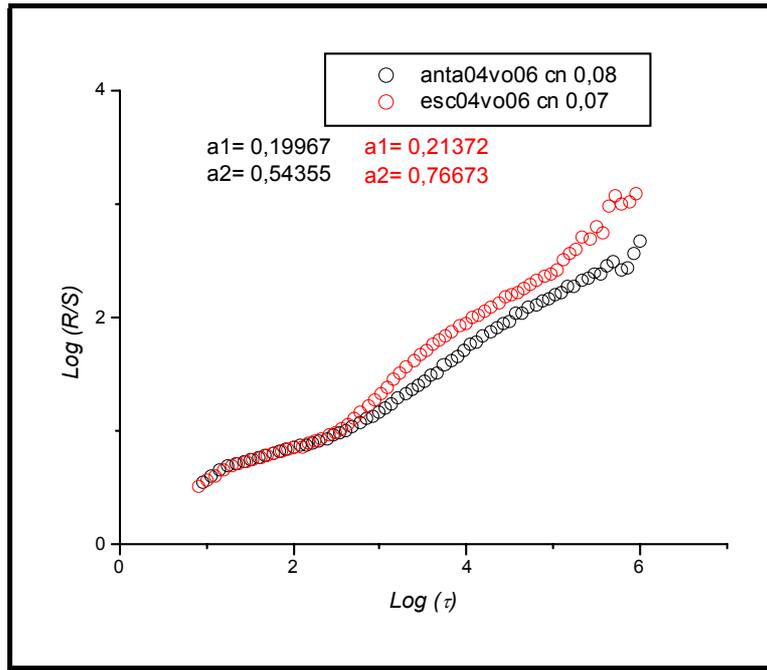


Figura 3.50. Sinal com corte e normalizado (anta04vo06 e esc04vo06).

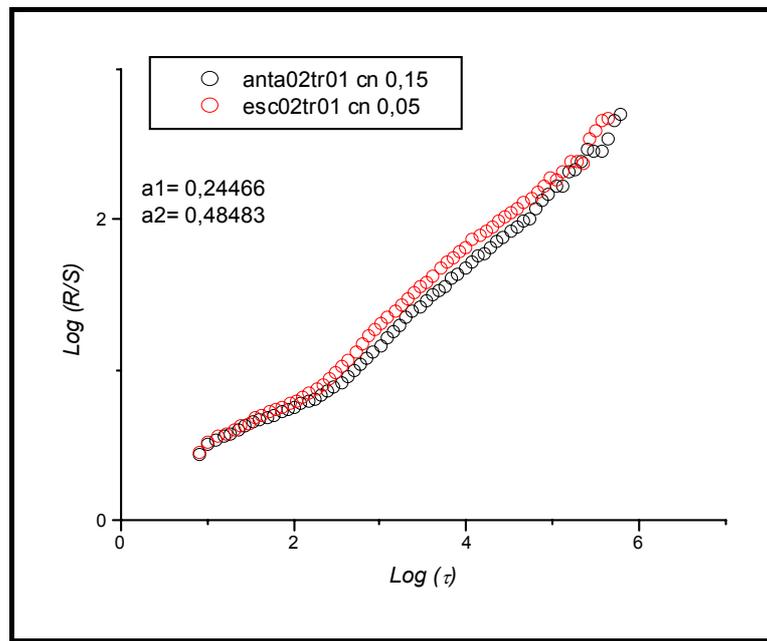
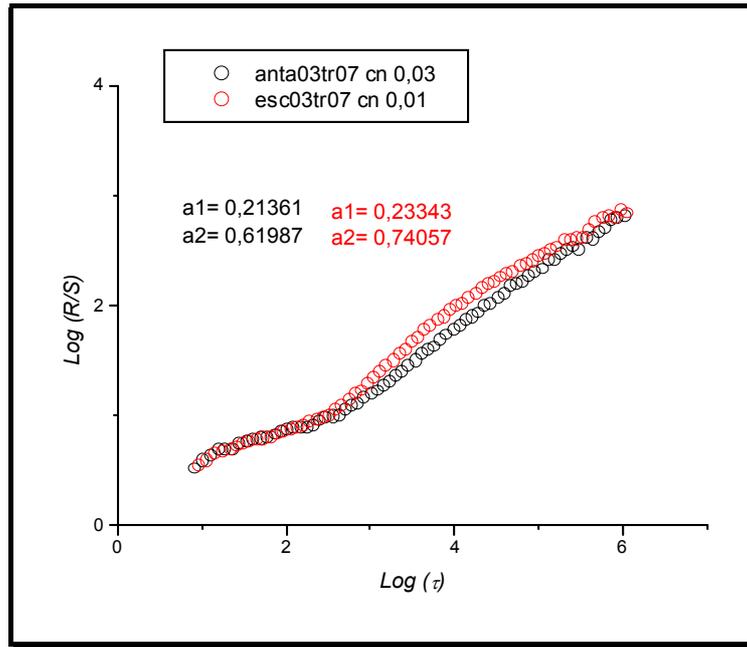
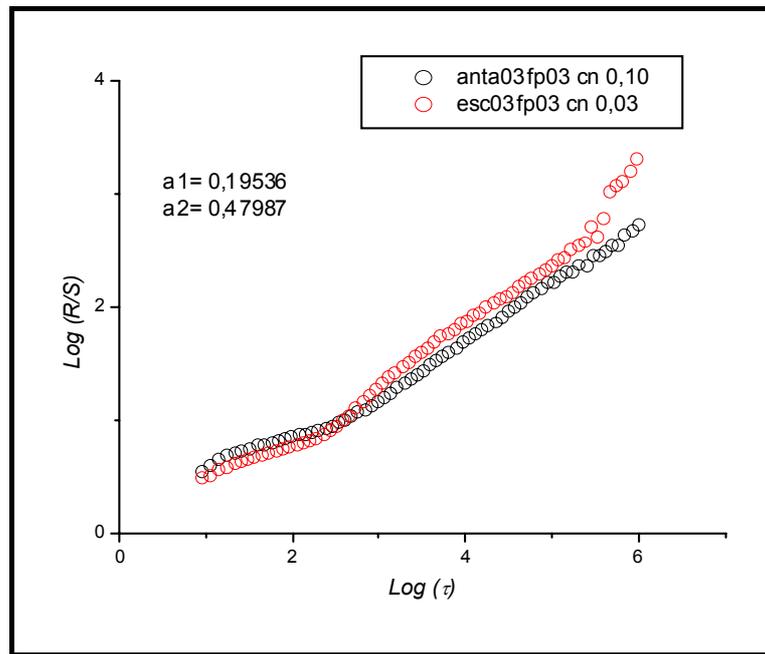


Figura 3.51. Sinal com corte e normalizado (anta02tr01 e esc02tr01).



**Figura 3.52.** Sinal com corte e normalizado (anta03tr07 e esc03tr07).



**Figura 3.53.** Sinal com corte e normalizado (anta03fp03 e esc03fp03).

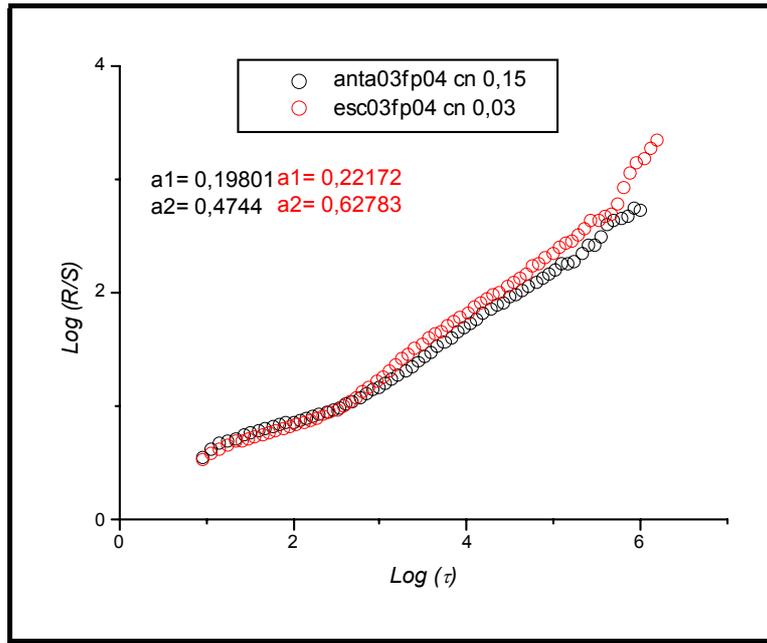


Figura 3.54. Sinal com corte e normalizado (anta03fp04 e esc03fp04).

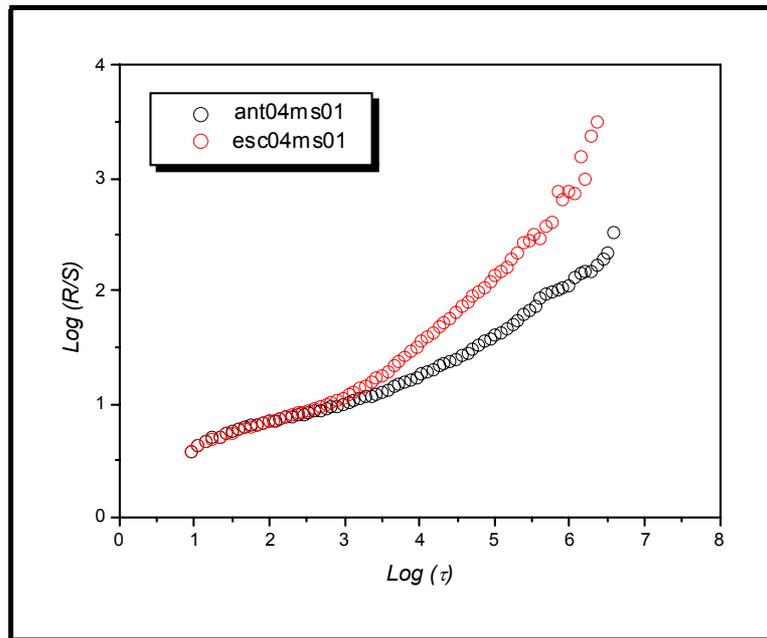


Figura 3.55. Sinal com corte e normalizado (ant04ms01 e esc04ms01).

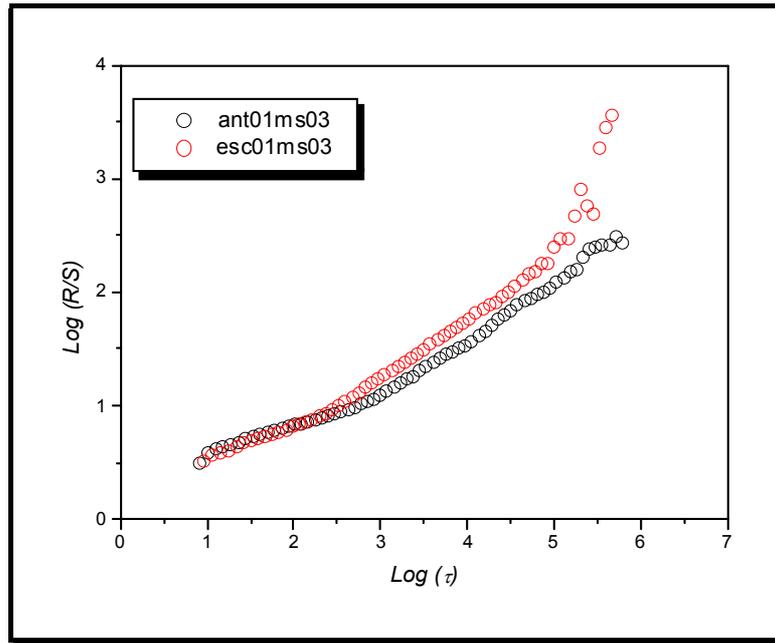


Figura 3.56. Sinal com corte e normalizado (antA01ms03 e esc01ms03).

Já para os corpos de prova sem solda (metal de base), essa relação se inverteu, ou seja, na região de escoamento o coeficiente de Hurst é menor que na região anterior, o que pode ser comprovado nas figuras 3.57 e 3.58.

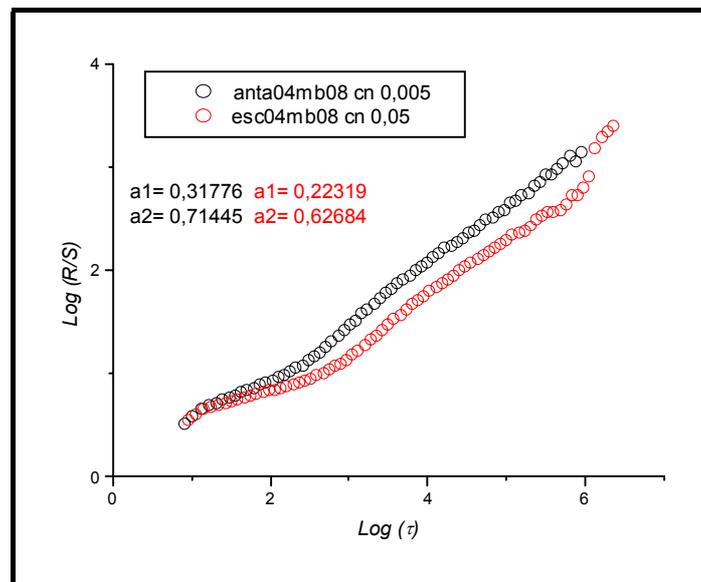
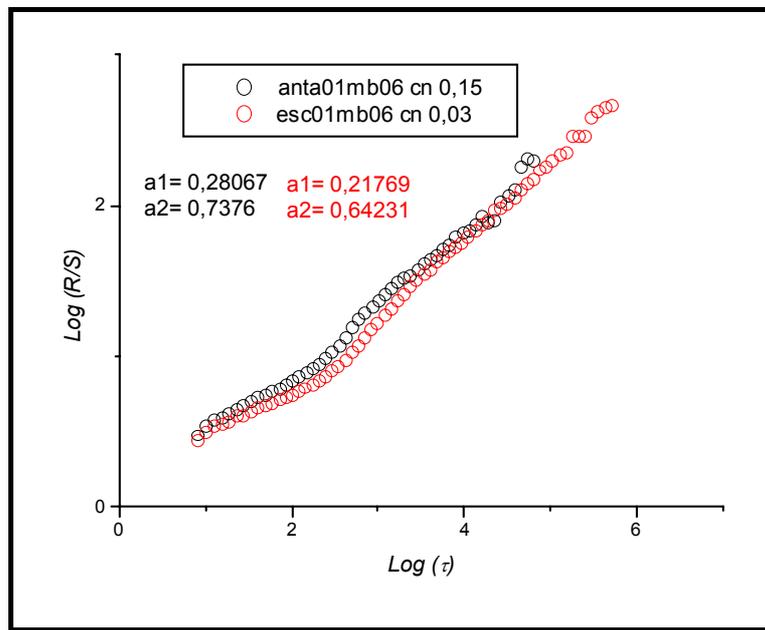


Figura 3.57. Sinal com corte e normalizado (antA04mb08 e esc04mb08).



**Figura 3.58.** Sinal com corte e normalizado (antA01mb06 e esc01mb06).

Depois de analisadas regiões diferentes para os mesmos corpos de prova, foi feito um comparativo das mesmas regiões para cp's diferentes, conforme figuras 3.59 a 3.61. Observa-se que os gráficos da função de Hurst são idênticos para mesmas regiões com tipos de defeitos diferentes. Novamente não sendo observada nenhuma correlação entre os sinais e os tipos de defeitos escolhidos.

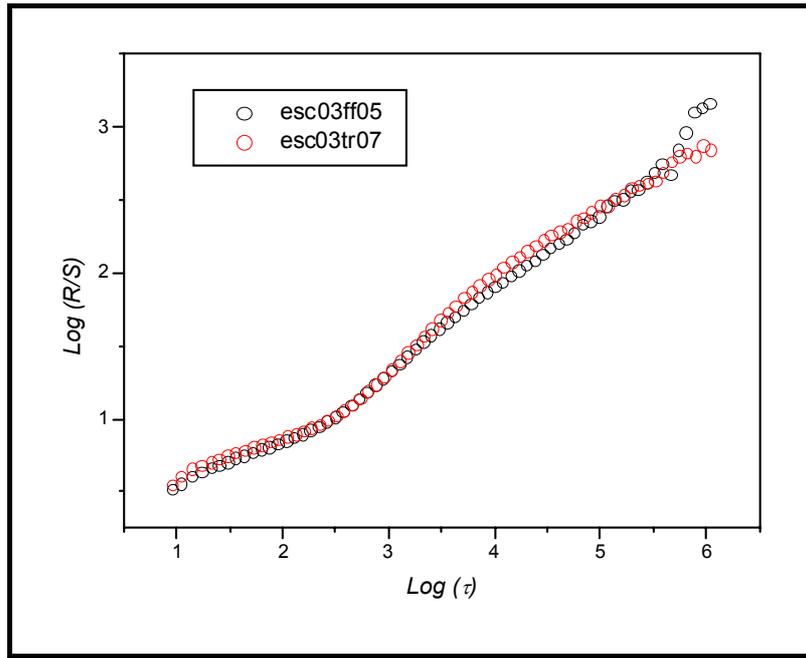


Figura 3.59. Sinal com corte e normalizado (esc03ff05 e esc03tr07).

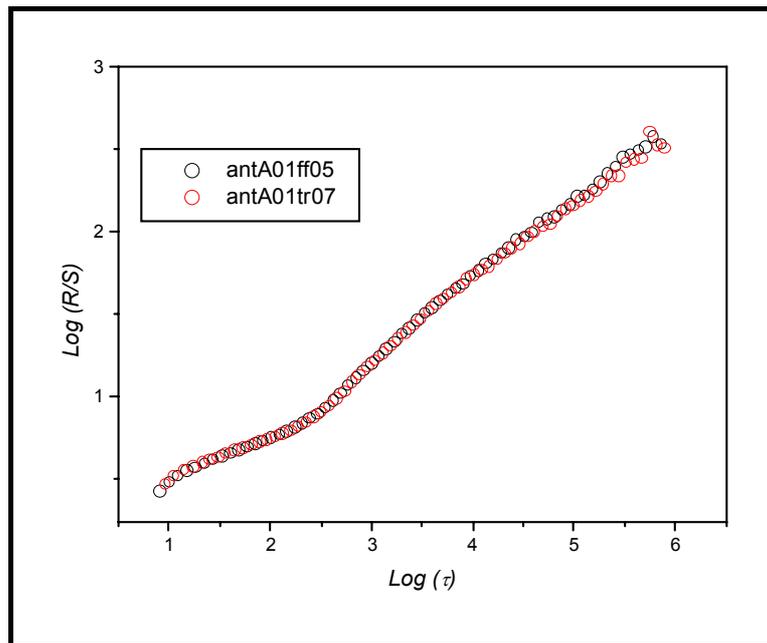
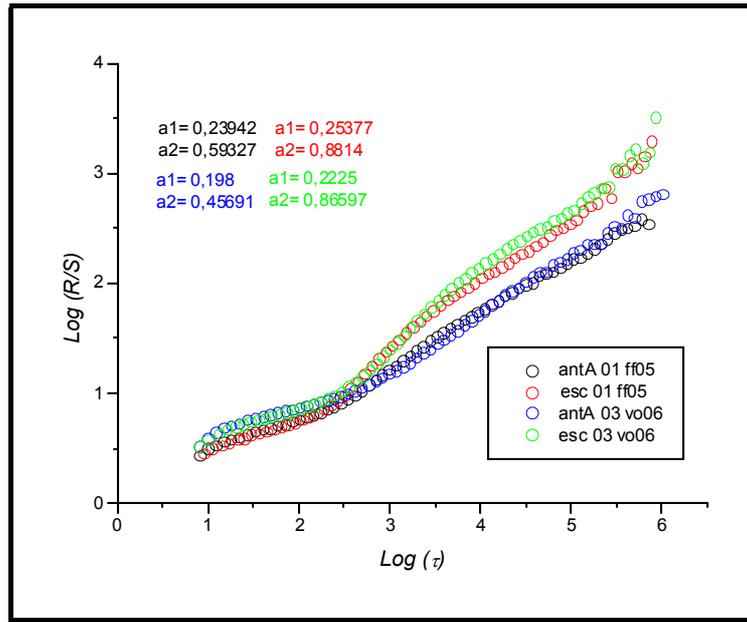
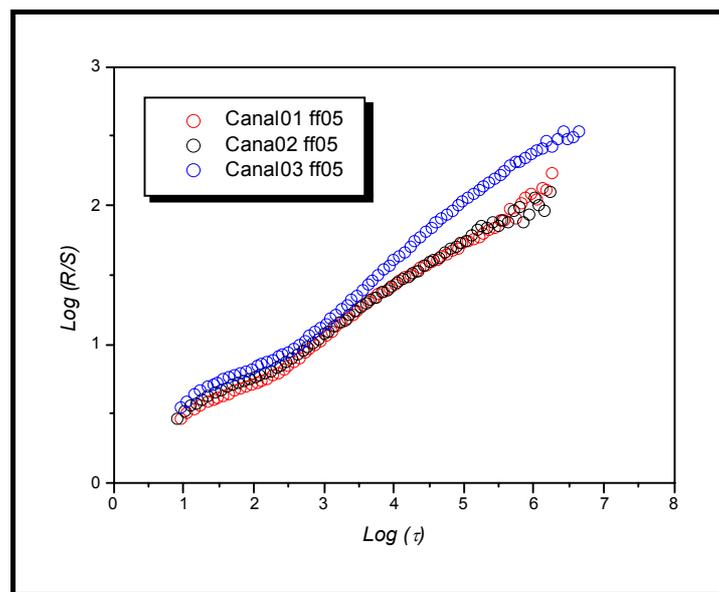


Figura 3.60. Sinal com corte e normalizado (antA01ff05 e antA01tr07).

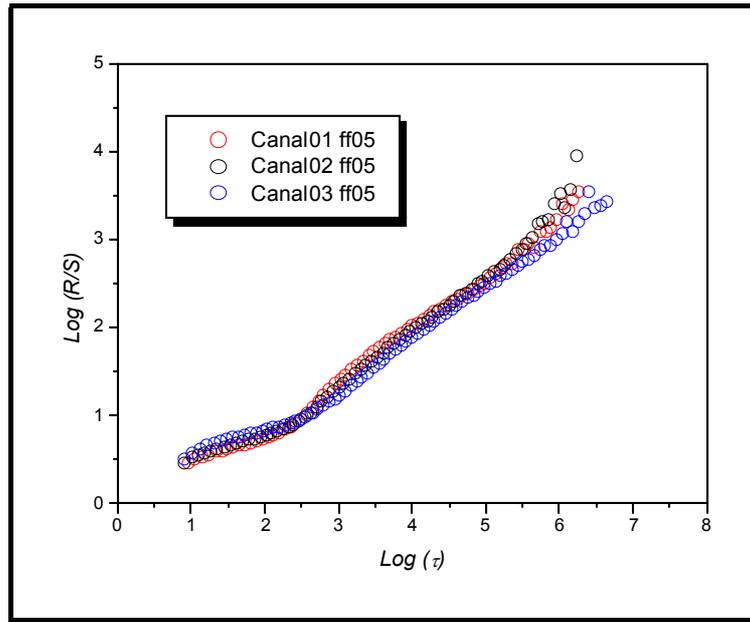


**Figura 3.61.** Sinal com corte e normalizado (antA e esc 01ff05, e antA e esc 03vo06).

Outro teste realizado foi considerar todo o sinal emitido, para os diferentes canais, durante a realização do ensaio, envolvendo todas as regiões observadas, no sentido de verificar o comportamento da função de Hurst. Como pode ser verificado nas figuras 3.62 e 3.63, somente após a eliminação de picos e a normalização o resultado tornou-se idêntico para todos os canais.



**Figura 3.62.** Análise para o mesmo corpo de prova com todas a regiões anexadas (Sinal original).



*Figura 3.63. Análise para o mesmo corpo de prova com todas a regiões anexadas (Sinal com corte e normalizado).*

### 3.3 – VALIDAÇÃO DA DIMENSÃO FRACTAL

Os gráficos apresentados a seguir servem para validar os expoentes calculados pelo método re-escalado de Hurst e espectral de Fourier com a dimensão fractal obtida pelo método da contagem de caixa. Nas figuras 3.64 a 3.66 é mostrada a análise dos sinais pelo método da contagem de caixas, onde os expoentes  $D$  são obtidos através de uma regressão linear. Os gráficos obtidos pelo método da contagem de caixa, independente do tipo de sensor, do defeito de soldagem e da região de carregamento analisada, apresentaram uma única região de inclinação ( $D$ ), em que esta, somada com a segunda região de inclinação do gráfico da função de Hurst, satisfaz a relação mostrada na eq. (2.11). Em alguns casos observou-se duas regiões. Entretanto a segunda região, ou seja, a segunda inclinação linear não satisfaz a relação acima, como esperado.

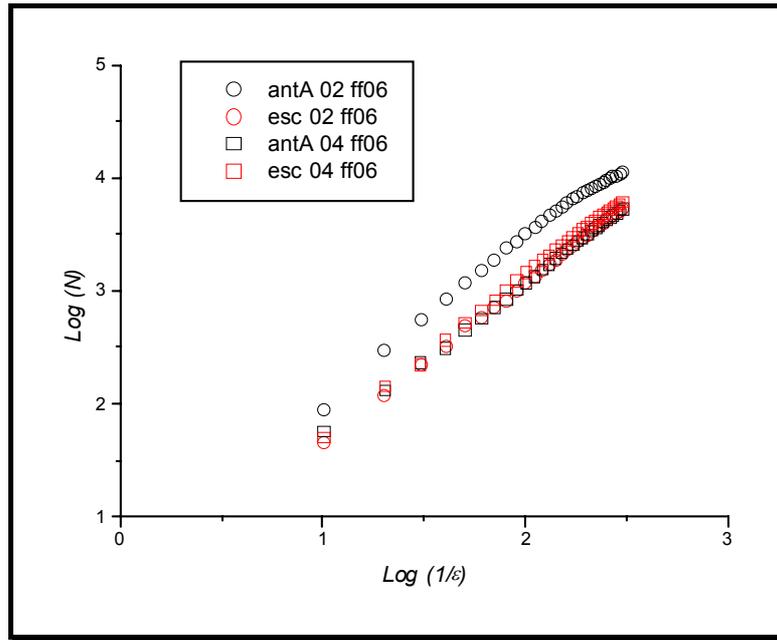


Figura 3.64. Análise pela contagem de caixas em sinais cortados canais 2 e 4(antA e esc ff06).

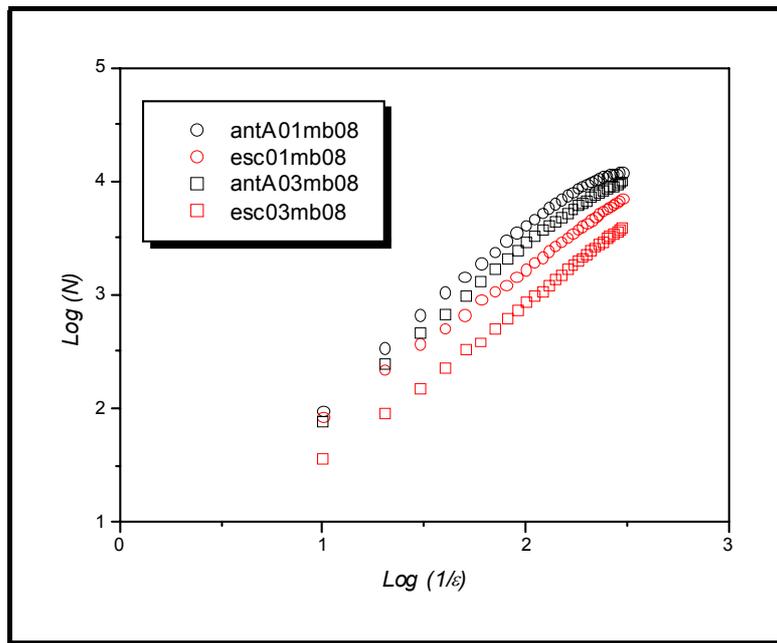
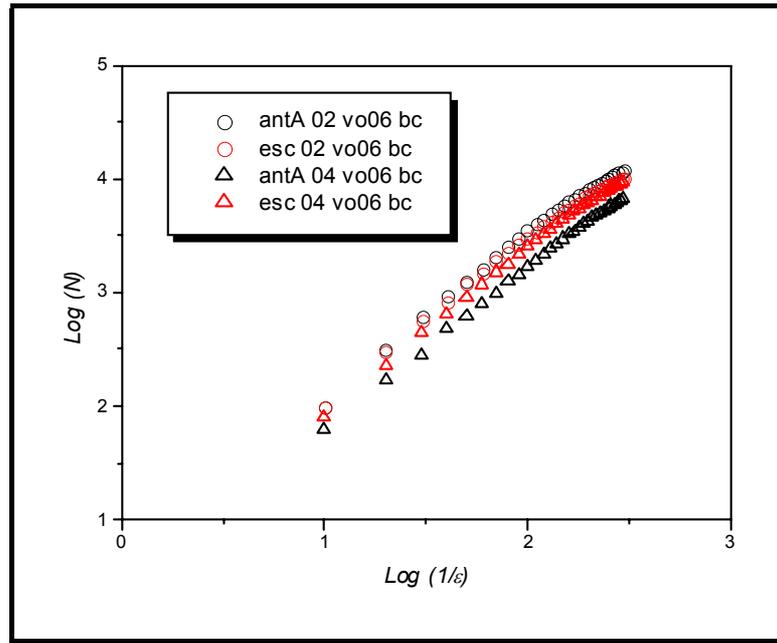
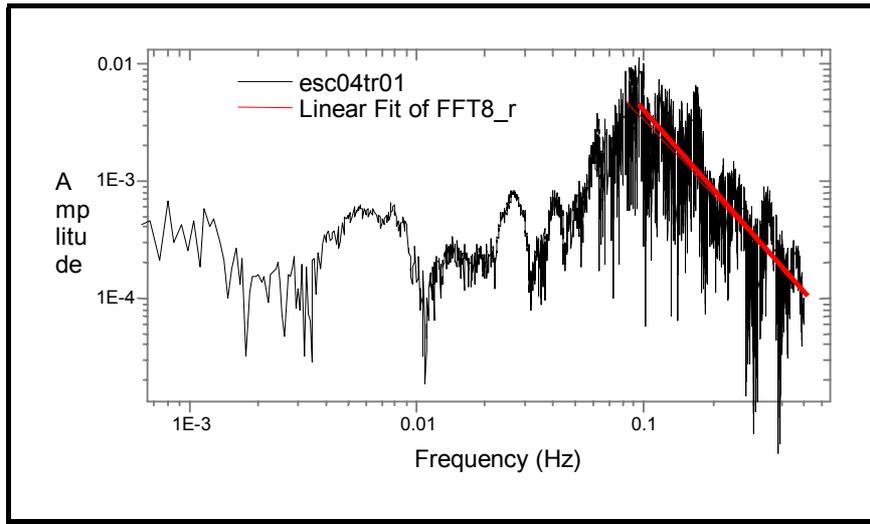


Figura 3.65. Análise pela contagem de caixas em sinais cortados canais 1 e 3(antA e esc mb08).

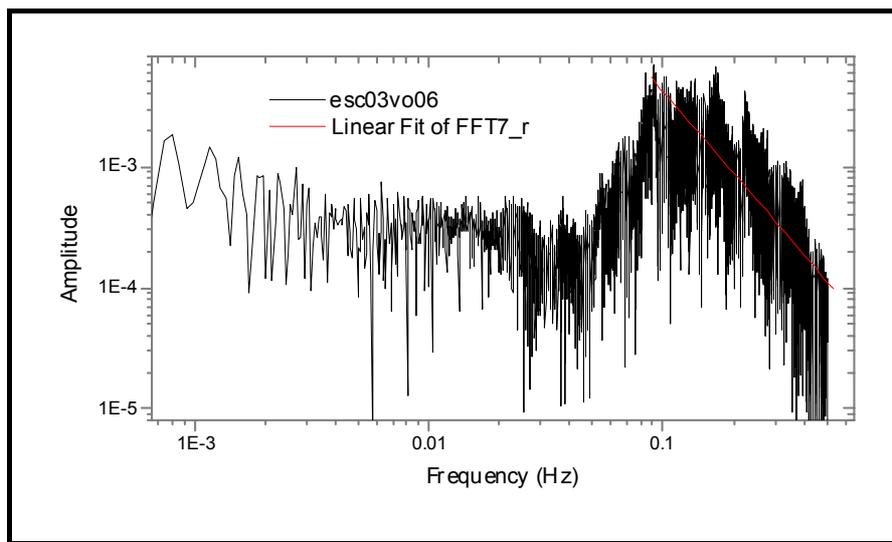


**Figura 3.66.** Análise pela contagem de caixas em sinais cortados canais 2 e 4(antA e esc vo06).

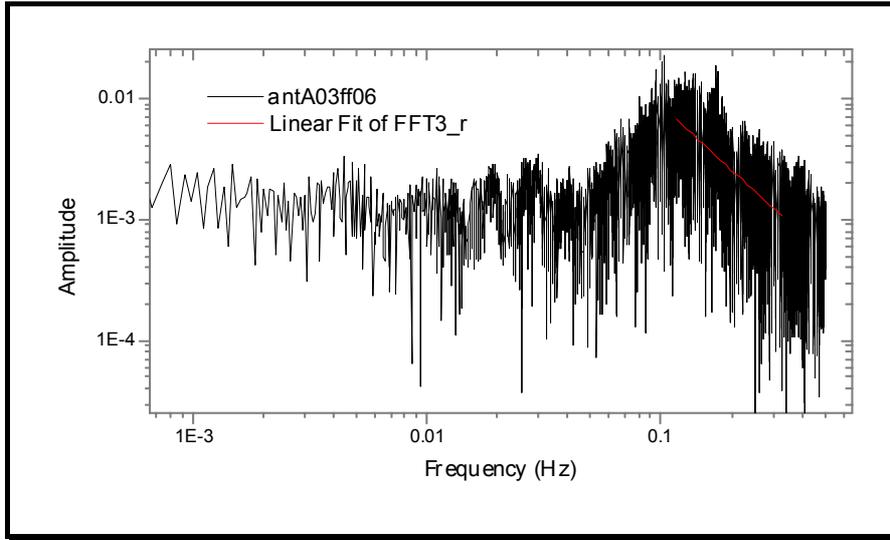
Os gráficos 3.67 a 3.71 representam a análise espectral de Fourier, onde a linha vermelha representa a regressão linear para se obter o expoente  $\varphi$  e validar a dimensão fractal. Para todos os tipos de canais, defeitos e região de carregamento analisada, a validação da dimensão fractal com os expoentes  $\varphi$  e os coeficientes da função de Hurst ( $H$ ) e da contagem de caixas ( $D$ ) foi confirmada, pois observa-se uma boa aproximação dos valores de  $\varphi$ ,  $D$  e  $H$  com as relações matemáticas expressas nas eq. (2.21) e (2.22).



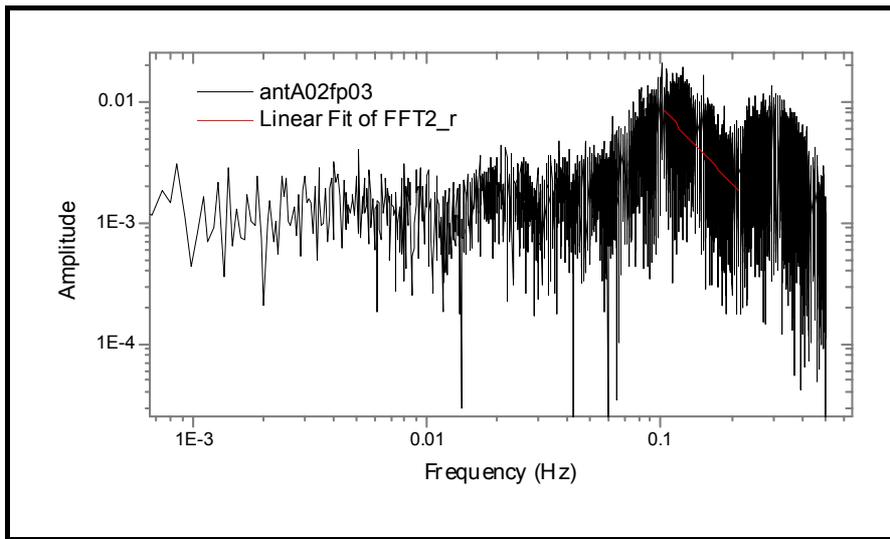
*Figura 3.67. Análise pelo método espectral de Fourier no sinal cortado(esc04tr01).*



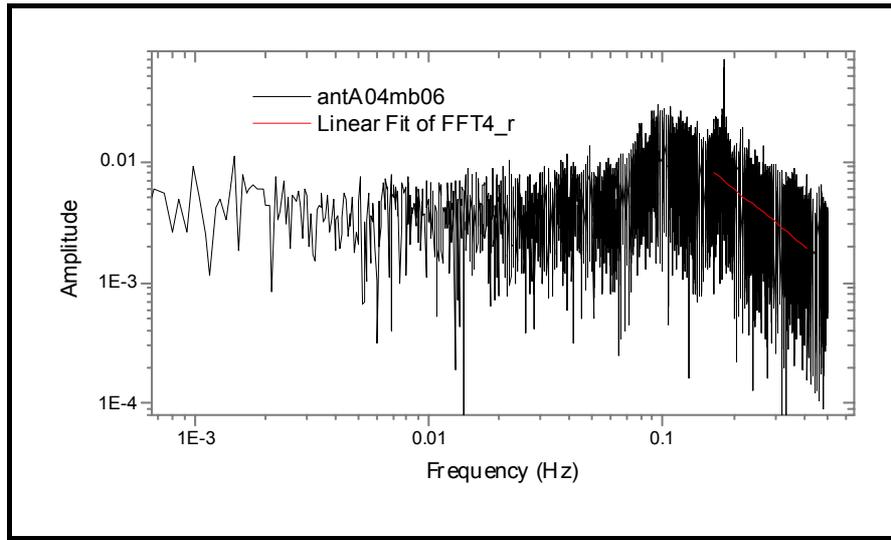
*Figura 3.68. Análise pelo método espectral de Fourier no sinal cortado(esc03vo06).*



*Figura 3.69. Análise pelo método espectral de Fourier no sinal cortado(antA03ff06)*



*Figura 3.70. Análise pelo método espectral de Fourier no sinal cortado(antA02fp03).*



**Figura 3.71.** Análise pelo método espectral de Fourier no sinal cortado(*antA04mb06*).

Nas tabelas 3.2 e 3.3 estão apresentados todos os coeficientes de Hurst ( $H$ ) obtidos dos sinais nos quatro canais utilizados no ensaio e nas duas regiões de carregamento analisadas, anterior ao escoamento e no escoamento, após serem processados. Foram considerados dois corpos de prova para cada tipo de defeito. Observa-se que os valores de Hurst ( $H_1$ ), para a primeira região, se mostraram bem próximos, independente do canal e da região de carregamento analisada e do tipo de defeito. No entanto, a segunda região, os valores de Hurst ( $H_2$ ) são menores na região de carregamento anterior ao escoamento que os valores  $H_2$  na região de escoamento. Esses valores se invertem quando o corpo de prova é o metal de base. Na tabela 3.4 mostrou-se os valores de  $H_2$ ,  $\varphi$  e  $D_1$  para os quatro canais e um corpo de prova para cada defeito. As expressões matemáticas são utilizadas na tabela para validação da dimensão fractal. Os valores se mostraram consistentes.

	Defeitos Volumétricos				Falta de Penetração				Falta de Fusão			
	Vo05				Fp03				Ff05			
	antA		esc		antA		esc		antA		esc	
	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2
Canal01	0,23952	0,51976	0,22637	0,58367	0,23837	0,72551	0,22273	0,87702	0,23942	0,59327	0,25377	0,88140
Canal02	0,21474	0,55929	0,23283	0,57606	0,24882	0,52881	0,21114	0,55107	0,23065	0,51918	0,23982	0,69991
Canal03	0,20136	0,63194	0,19920	0,61208	0,19536	0,47987	0,22949	0,69126	0,21455	0,51304	0,26648	0,63976
Canal04	0,20213	0,58953	0,19968	0,71757	0,21758	0,64706	0,21299	0,64327	0,20058	0,60826	0,20218	0,66835
<b>média</b>	<b>0,21444</b>	<b>0,57513</b>	<b>0,21452</b>	<b>0,62235</b>	<b>0,22503</b>	<b>0,59531</b>	<b>0,21909</b>	<b>0,69066</b>	<b>0,22130</b>	<b>0,55844</b>	<b>0,24056</b>	<b>0,72236</b>
	Vo06				Fp04				Ff06			
	antA		esc		antA		esc		antA		esc	
	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2
Canal01	0,24597	0,56532	0,23380	0,64472	0,26135	0,65234	0,23260	0,88455	0,24274	0,47179	0,22261	0,67148
Canal02	0,22456	0,56075	0,21862	0,56557	0,26621	0,51222	0,19733	0,48448	0,23122	0,50623	0,21544	0,72775
Canal03	0,19800	0,45691	0,22250	0,86597	0,19801	0,47440	0,22172	0,62783	0,22070	0,61411	0,26256	0,66840
Canal04	0,19967	0,54355	0,21372	0,76673	0,20343	0,57721	0,20199	0,63937	0,20396	0,57813	0,19270	0,67490
<b>média</b>	<b>0,21705</b>	<b>0,53163</b>	<b>0,22216</b>	<b>0,71075</b>	<b>0,23225</b>	<b>0,55404</b>	<b>0,21341</b>	<b>0,65906</b>	<b>0,22466</b>	<b>0,54257</b>	<b>0,22333</b>	<b>0,68563</b>
<b>média t.</b>	<b>0,21574</b>	<b>0,55338</b>	<b>0,21834</b>	<b>0,66655</b>	<b>0,22864</b>	<b>0,57468</b>	<b>0,21625</b>	<b>0,67486</b>	<b>0,22298</b>	<b>0,55050</b>	<b>0,23195</b>	<b>0,70399</b>

Tabela 3.2. Coeficientes de Hurst obtidos em três tipos de cp's (VO, FP e FF).

	Trinca Superficial				Metal de Solda				Metal de Base			
	Tr01				Ms01				Mb06			
	antA		esc		antA		esc		antA		esc	
	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2
Canal01	0,23510	0,51958	0,22021	0,53098	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,28067	0,73760	0,21769	0,64231
Canal02	0,24466	0,48483	0,26947	0,68367	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,27617	0,63670	0,23087	0,57064
Canal03	0,22548	0,54426	0,24259	0,62071	0,15047	0,34471	0,24968	0,51364	0,22327	0,56256	0,21550	0,45620
Canal04	0,23045	0,62187	0,19937	0,67455	0,15100	0,39911	0,18650	0,59606	0,29388	0,57666	0,19566	0,42534
média	<b>0,23392</b>	<b>0,54264</b>	<b>0,23291</b>	<b>0,62748</b>	<b>0,15074</b>	<b>0,37191</b>	<b>0,21809</b>	<b>0,55485</b>	<b>0,26850</b>	<b>0,62838</b>	<b>0,21493</b>	<b>0,52362</b>
	Tr07				Ms03				Mb08			
	antA		esc		antA		esc		antA		esc	
	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2	h1	h2
Canal01	0,22415	0,41852	0,22627	0,58632	0,20961	0,46867	0,27102	0,51838	0,24345	0,82004	0,20818	0,78324
Canal02	0,22482	0,47099	0,23135	0,51477	0,20626	0,48673	0,30768	0,63076	0,27260	0,73551	0,23289	0,65452
Canal03	0,21361	0,61987	0,23343	0,74057	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,21620	0,61857	0,19052	0,59456
Canal04	0,20700	0,64735	0,21222	0,73358	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,31776	0,71445	0,22319	0,62684
média	<b>0,21740</b>	<b>0,53918</b>	<b>0,22582</b>	<b>0,64381</b>	<b>0,20794</b>	<b>0,47770</b>	<b>0,28935</b>	<b>0,57457</b>	<b>0,26250</b>	<b>0,72214</b>	<b>0,21370</b>	<b>0,66479</b>
<b>média t.</b>	<b>0,22566</b>	<b>0,54091</b>	<b>0,22936</b>	<b>0,63564</b>	<b>0,17934</b>	<b>0,42481</b>	<b>0,25372</b>	<b>0,56471</b>	<b>0,26550</b>	<b>0,67526</b>	<b>0,21431</b>	<b>0,59421</b>

Tabela 3.3. Coeficientes de Hurst obtidos em três tipos de cp's (TR, MS e MB).

Análise da Dimensão Fractal													
		Vo06		Fp03		Ff06		Tr01		Mb06		Ms03	
		antA	esc										
canal1	RSA ( $h_2$ )	0,56532	0,64472	0,72551	0,87702	0,47179	0,67148	0,51958	0,53098	0,73760	0,64231	0,46867	0,51838
canal2		0,56075	0,56557	0,52881	0,55107	0,50623	0,72775	0,48483	0,68367	0,63670	0,57064	0,48673	0,63076
canal3		0,45691	0,86597	0,47987	0,69126	0,61411	0,66840	0,54426	0,62071	0,56256	0,45620	0,00000	0,00000
canal4		0,54355	0,76673	0,64706	0,64327	0,57813	0,67490	0,62187	0,67455	0,57666	0,42534	0,00000	0,00000
canal1	BC ( $d_1$ )	1,33708	1,34640	1,43560	1,31404	1,39610	1,35884	1,46650	1,39015	1,64315	1,33726	1,77892	1,64101
canal2		1,42655	1,37626	1,41779	1,37073	1,45004	1,39854	1,43236	1,40023	1,41775	1,40849	1,78081	1,85247
canal3		1,51000	1,41374	1,46172	1,33333	1,51755	1,41822	1,48858	1,53121	1,44817	1,47491	0,00000	0,00000
canal4		1,43469	1,46017	1,49927	1,40282	1,44121	1,47626	1,60897	1,49860	1,75726	1,50483	0,00000	0,00000
canal1	FFT ( $f_i$ )	2,07391	2,32149	2,14874	2,30779	2,14936	2,39653	2,03486	2,11191	1,62792	2,30851	1,94718	2,02324
canal2		2,14006	2,22168	2,07078	2,25255	2,07579	2,34438	2,04169	2,36833	2,19633	2,11041	2,05204	2,09966
canal3		1,99396	2,23163	2,07419	2,10837	1,77873	2,13372	1,94676	1,83827	2,13383	2,15278	0,00000	0,00000
canal4		1,98540	2,22025	2,01924	2,43374	2,15468	2,17548	1,60231	2,09165	1,57654	2,07883	0,00000	0,00000
	Média	<b>2,04833</b>	<b>2,24876</b>	<b>2,07824</b>	<b>2,27561</b>	<b>2,03964</b>	<b>2,26253</b>	<b>1,90641</b>	<b>2,10254</b>	<b>1,88366</b>	<b>2,16263</b>	<b>1,99961</b>	<b>2,06145</b>
canal1	$d_1+h_2=2$	1,90240	1,99112	2,16111	2,19106	1,86789	2,03032	1,98608	1,92113	2,38075	1,97957	2,24759	2,15939
canal2		1,98730	1,94183	1,94660	1,92180	1,95627	2,12629	1,91719	2,08390	2,05445	1,97913	2,26754	2,48323
canal3		1,96691	2,27971	1,94159	2,02459	2,13166	2,08662	2,03284	2,15192	2,01073	1,93111	0,00000	0,00000
canal4		1,97824	2,22690	2,14633	2,04609	2,01934	2,15116	2,23084	2,17315	2,33392	1,93017	0,00000	0,00000
	Média	<b>1,95871</b>	<b>2,10989</b>	<b>2,04891</b>	<b>2,04589</b>	<b>1,99379</b>	<b>2,09860</b>	<b>2,04174</b>	<b>2,08253</b>	<b>2,19496</b>	<b>1,95500</b>	<b>2,25757</b>	<b>2,32131</b>
canal1	$f_i=1+2*h_2$	2,13064	2,28944	2,45102	2,75404	1,94358	2,34296	2,03916	2,06196	2,47520	2,28462	1,93734	2,03676
canal2		2,12150	2,13114	2,05762	2,10214	2,01246	2,45550	1,96966	2,36734	2,27340	2,14128	1,97346	2,26152
canal3		1,91382	2,73194	1,95974	2,38252	2,22822	2,33680	2,08852	2,24142	2,12512	1,91240	1,00000	1,00000
canal4		2,08710	2,53346	2,29412	2,28654	2,15626	2,34980	2,24374	2,34910	2,15332	1,85068	1,00000	1,00000
	Média	<b>2,06327</b>	<b>2,42150</b>	<b>2,19063</b>	<b>2,38131</b>	<b>2,08513</b>	<b>2,37127</b>	<b>2,08527</b>	<b>2,25496</b>	<b>2,25676</b>	<b>2,04725</b>	<b>1,95540</b>	<b>2,14914</b>
canal1	$f_i=5-2*d_1$	2,32584	2,30720	2,12880	2,37192	2,20780	2,28232	2,06700	2,21970	1,71370	2,32548	1,44216	1,71798
canal2		2,14690	2,24748	2,16442	2,25854	2,09992	2,20292	2,13528	2,19954	2,16450	2,18302	1,43838	1,29506
canal3		1,98000	2,17252	2,07656	2,33334	1,96490	2,16356	2,02284	1,93758	2,10366	2,05018	5,00000	5,00000
canal4		2,13062	2,07966	2,00146	2,19436	2,11758	2,04748	1,78206	2,00280	1,48548	1,99034	5,00000	5,00000
	Média	<b>2,14584</b>	<b>2,20172</b>	<b>2,09281</b>	<b>2,28954</b>	<b>2,09755</b>	<b>2,17407</b>	<b>2,00180</b>	<b>2,08991</b>	<b>1,86684</b>	<b>2,13726</b>	<b>1,44027</b>	<b>1,50652</b>

Tabela 3.4. Coeficientes de  $H_2$ ,  $D_1$  e  $\varphi$  com seus respectivos cálculos para validação da dimensão fractal.

## CONCLUSÕES

Procurou-se através deste estudo verificar a relação entre a forma da onda, adquirida pelos sinais de emissão acústica, com os defeitos de soldagem através de métodos de análise fractal e espectral. Os sinais foram obtidos através de sensores acoplados em peças, aço carbono A516 grau 60, com solda contendo quatro tipos de defeitos (falta fusão, falta de penetração, volumétricos e trinca superficial), e sem solda, submetidos a um ensaio de tração. Diante desse procedimento pode-se concluir que:

- ♣ Foram observadas duas regiões no gráfico da função de Hurst. Na primeira região, os valores de  $H$  mostraram-se bem próximos, independente do canal, da região de carregamento analisada e do tipo de defeito, e do tratamento para eliminação de ruídos. A segunda região apresentou valores de  $H$  diferentes para regiões diferentes de carregamento (antA e esc) após a eliminação de ruídos (eliminação de picos)
- ♣ A segunda região da análise de Hurst satisfaz a relação mostrada na equação  $D+H=2$  validando a lei de escala da dimensão fractal. Enquanto que a primeira região não satisfaz a equação, uma vez não ter sido observada multifractalidade no método de contagem de caixas. Acredita-se que a primeira região da análise de Hurst seja proveniente de algum tipo de ruído ainda presente no sinal.
- ♣ Considerando todo o sinal emitido, para os diferentes canais, durante a realização do ensaio, envolvendo todas as regiões observadas, no sentido de verificar o comportamento da função de Hurst, somente após a eliminação de picos e a normalização o resultado tornou-se idêntico para todos os canais. Este resultado constitui-se em mais um avalizador do procedimento utilizado para a eliminação de ruídos.

- ♣ O resultado da análise de Hurst para o número total de pontos (aproximadamente 1.000.000) obteve as mesmas respostas que para 50 mil pontos, o que implica na autosimilaridade dos sinais.
- ♣ Foi mostrada a existência de duas regiões de escala distintas que caracterizam os regimes elástico e plástico quando o material foi submetido a um carregamento de tração. Para os materiais soldados, o coeficiente de Hurst no regime plástico é maior que no regime elástico, sendo a situação invertida para o material sem solda (metal de base).
- ♣ Diante da tabela com os coeficientes de Hurst para todos os canais, conclui-se que existe uma correlação numérica para aqueles corpos de prova com defeitos superficiais como, trinca superficial e falta de fusão, e para aqueles com defeitos internos como, defeitos volumétricos e falta de penetração.

Muito embora os resultados obtidos no presente trabalho sejam bastante promissores, estudos mais aprofundados serão necessários para seja desenvolvido um novo método de inspeção por emissão acústica com curto tempo de resposta e maior confiabilidade. Por exemplo, para definição de uma melhor correlação entre os sinais e o tipo de defeito precisa-se de uma análise estatística mais ampla, uma vez que no presente trabalho somente foram considerados dois corpos de prova para cada tipo de defeito. O estudo com um número maior de cp's propiciaria resultados mais confiáveis para se tirar conclusões estatísticas mais consistentes.

## SUGESTÕES

- Como os sinais apresentaram altos níveis de ruído decorrentes do ensaio de tração, é recomendável que sejam realizados outros tipos de ensaios experimentais como, por exemplo, um teste de pressurização em vasos de pressão de pequena escala que poderão trazer resultados relevantes e complementares ao método utilizado neste trabalho.
- Analisar e comparar o método utilizado neste trabalho com o critério MONPAC utilizado nos ensaios realizados pela empresa Physical Acoustics South America – PASA, dando maior ênfase àqueles que tiveram classificação D e E, por serem considerados, respectivamente, indicação de presença de defeitos e presença de defeitos significativos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDISON, P. S. **Fractals and Chaos**. EUA: IOP Publishing Ltd, 1997. 256 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING. **Handbook - Volume Five Acoustic Emission Testing**. 2 ed. Estados Unidos. ASNT, 1987. 603 p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response**. Estados Unidos. ASTM, 1988. (E 976 – 84)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate and Lower Temperature Service**. Estados Unidos: ASTM, 1999. (A 516/A 516M - 90)
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products**. Estados Unidos: ASTM, 1997. 53 p. (A 370 – 97a)
- ANDREUCCI, R. **Ensaio por Ultra-Som – Aspectos Básicos**. 3ª Ed. São Paulo. ABENDE, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS. **Ultra-Som**. São Paulo, ABENDE. s.d. 113 p.
- BARAT, P.; DUTTA, D. **Fractal Characterization of Ultrasonic Backscattered Signals from Single Crystal and Polycrystalline Materials**. Journal Acoustical Society of America. 1995, p. 938-942.
- BASTIAN, F. L.; JUNIOR, H. M. C.; MORAES, M. M. **Mecânica da Fratura**. Rio de Janeiro, IBNQ - Instituto Brasileiro da Qualidade Nuclear. Novembro, 1987.
- BLITZ, Jack; SIMPSON Geoff. **Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing**. London: Champman & Hall, 1996. 264 p.

- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª Edição. EUA: Editora LTC, 2002. 589 p.
- CAMERINI, Cláudio S. **Relação Entre Emissão Acústica e CTOD Para Um Aço Estrutural**. Orientador: João Marcos A. Rebello. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ/Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 1990. 136 p. Dissertação.
- CERQUEIRA, E.O.; POPPI, R.J.; KUBOTA, L.T. *et al.* **Utilização De Filtro De Transformada De Fourier Para A Minimização De Ruídos Em Sinais Analíticos**. São Paulo, Química Nova. 2000.
- CHATFIELD, C. **The Analysis of Time Series – An Introduction**. 4 ed. London: Chapman & Hall, 1992. 241 p.
- FEDER, J. **Fractals**. New York: Plenum Press, 1988.
- FERES, P. F. **Aplicações da Técnica de Emissão Acústica em Dutos e Tubulações**. In: 5ª Conferência sobre Tecnologia e Equipamentos. São Paulo, 2001. COTEQ. v. 46.
- FERREIRA, Débora B. B. **Aplicação da Técnica de Emissão Acústica na Caracterização dos Mecanismos de Falha em Plásticos Reforçados por Fibras**. Orientador: João Marcos A. Rebello. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ/Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2000. 149 p. Tese de Doutorado.
- FLEISCHMANN, P.; MAGNIN, L.; ROUBY, D. *et al.* **Application Of Signal Processing To Acoustic Emission Signals Emitted By Steel Specimens During Tensile Tests**. Ultrasonics. Butterworth & Co Ltd. Janeiro 1982.
- FOWLER, T.J.; BLESSING, J.A.; CONLISK, P.T. *et al.* **The Monpac System**. EUA: Journal of Acoustic Emission, Vol. 8, nº3. 1989.
- JEFFUS, L. F. **Welding: principles and applications**. 4 ed. EUA: Thomson Learning, 1997.
- KINSLER, L.E.; FREY, A.R.; COPPENS, A.B. *et al.* **Fundamentals of Acoustic**. 4 ed. EUA: John Wiley & Sons, Inc., 2000. 548 p.
- MATOS, J.M.O.; MOURA, E.P.; KRÜGER, S.E. *et al.* **Rescaled Range Analysis And Detrended Fluctuation Analysis Study Of Cast Irons**

- Ultrasonic Backscattered Signals.** Rio de Janeiro, Chaos, Solitons & Fractals. 2003.
- MORETTIN, P. A. **Ondas e Ondaletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1999. 272 p.
  - OPPENHEIM, A.V.; SCHAFER, R.W. **Digital Signal Processing.** Prentice-Hall, 1975.
  - ORFANIDIS, S.J. **Introduction to Signal Processing.** Prentice-Hall, 1995.
  - PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION - PAC. **DiSP – User’s Manual.** Estados Unidos. Princeton Junction. 2001.
  - SILVA, F. E. **Análise da Integridade Estrutural de Compósitos Através da Caracterização Fractal de Sinais de Emissão Acústica.** 2002. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
  - SOLAR INFLUENCES DATA ANALYSIS CENTER - SIDC. Department of Solar Physics. Royal Observatory of Belgium, Brussels. <http://sidc.oma.be/index.php3>. 2002.

## APÊNDICE

### Contagem de Caixas

```
implicit double precision (a-h,o-z)
dimension x(1000000),y(1000000)
i write(*,*)'numero de pontos da serie'
! read(*,*)nmax
nmax=10000
open (1, file='data1.dat')
read(1,*) (y(i),i=1,nmax)
open (2, file='data2.dat')
m =nmax
mm=60
! dp=2.d0*dasin(1.d0)/dfloat(m)
do 2 j=1,m
x(j)=dfloat(j)/dfloat(m)
! y(j)=dcos(dfloat(j)*dp)
i write(2,*) x(j),y(j)
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
! 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
```

### Eliminação de Zeros

```
        real a(154000000)
        open(unit=2, file=' data1.dat')
        open(unit=3, file=' data2.dat')
! n é o número de pontos do arquivo com zeros
        n=5038080
        do 10 i=1,n
        read(2,*) a(i)
10     continue
        do 20 j=1,n-4
        if(a(j).eq.0.0) goto 15
        write(3,*) a(j)
        goto 20
15     if(a(j+1).eq.0.0) goto 16
        write(3,*) a(j)
        goto 20
16     if(a(j+2).eq.0.0) goto 17
        write(3,*) a(j)
        goto 20
17     if(a(j+3).eq.0.0) goto 18
        write(3,*) a(j)
        goto 20
18     if(a(j+4).eq.0.0) goto 20
        goto 20
20     continue
        close(unit=2)
        close(unit=3)
        stop
        end
```

## Retificação de Sinal

```
real a(5680000)
open(unit=2, file='data1.dat')
open(unit=3, file=' data2.dat')
! n é o número de pontos do arquivo
n=1977130
do 10 i=1,n
read(2,*) a(i)
10 continue
do 20 j=1,n
b=a(j)
if(b.lt.0.0) a(j)=-b
write(3,*) a(j)
20 continue
close(unit=2)
close(unit=3)
stop
end
```

## Eliminação dos Picos e Normalização

```
real a(1500000),b(1500000),aa(1500000),aaa(1500000)
dimension nm(1500000), nnm(1500000)
open(unit=2, file='esc03ff06x.dat')
open(unit=3, file='esc3ff6.dat')
! n é o número de pontos do arquivo,xf fração dos valores máximo e mínimo
n=1946568
xfmax=0.08
xfmin=0.08
! dpi=4.0*asin(1.0)
! do 10 i=1,n
! teta=(dpi*float(i))/float(n)
! a(i)=sin(teta)
! 10 continue
do 10 i=1,n
read(2,*) a(i)
! write(*,*) a(i)
10 continue
! Cálculo dos valores máximo e mínimo do sinal original
amax=-1.0e20
amin=1.0e20
do i=1,n
amax=amax1(amax,a(i))
amin=amin1(amin,a(i))
enddo
! write(*,*) amax,amin
```

```

    dmax=xfmax*amax
    dmin=xfmin*amin
    do 11 i1=1,n
    b(i1)=a(i1)-dmax
11    continue
! Eliminação dos valores máximos
    jj=1
    do 20 j=1,n
    c=b(j)
    if(c.gt.0.0) goto 20
    nm(jj)=j
    jj=jj+1
20    continue
    do 30 ij=1,jj-1
    ll=nm(ij)
    aa(ij)=a(ll)
30    continue
! do 1 ii=1,jj-1
! write(3,*) aa(ii), ii
!1    continue
! Eliminação dos valores mínimos
    do 31 ii1=1,jj-1
    b(ii1)=aa(ii1)-dmin
31    continue
    jj1=1
    do 32 j1=1,jj-1
    c=b(j1)
    if(c.lt.0.0) goto 32
    nnm(jj1)=j1
    jj1=jj1+1
32    continue
    do 33 ij=1,jj1-1
    jjj=nnm(ij)
    aaa(ij)=aa(jjj)
33    continue
! Cálculo dos valores máximo e mínimo do sinal filtrado
    amax=-1.0e20
    amin=1.0e20
    do ii=1,jj1-1
    amax=amax1(amax,aaa(ii))
    amin=amin1(amin,aaa(ii))
    enddo
    do 40 iii=1,jj1-1
    if(aaa(iii).gt.0) aaa(iii)=aaa(iii)/amax
    if(aaa(iii).lt.0) aaa(iii)=aaa(iii)/abs(amin)
    write (3,*) aaa(iii)
40    continue
    close(unit=2)
```

```
close(unit=3)  
stop  
end
```