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 ATRAVÉS DA ANÁLISE FRACTAL DE SINAIS ULTRA-SÔNICOS OBTIDOS PELA TÉCNICA TOFD

Eng. Waydson Martins Ferreira

ORIENTADOR: Professor Dr. Lindberg Lima Gonçalves

CO-ORIENTADOR: Dr. Elineudo Pinho de Moura

Fortaleza-Ce
Outubro de 2004

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

CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS DE SOLDAGEM ATRAVÉS DA ANÁLISE FRACTAL DE SINAIS ULTRA-SÔNICOS OBTIDOS PELA TÉCNICA TOFD

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

Eng. Waydson Martins Ferreira

ORIENTADOR: Professor Dr. Lindberg Lima Gonçalves

CO-ORIENTADOR: Dr. Elineudo Pinho de Moura

Fortaleza-Ce
Outubro de 2004

À minha esposa, Elieuda, e a meus filhos, por seu apoio, compreensão e paciência,
aos meus pais, pelo eterno incentivo
e apoio aos meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Lindberg Lima Gonçalves pela confiança em mim depositada, e pela orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Dr. Elineudo Pinho de Moura pelos dados de ultra-som cedidos e pela indispensável co-orientação nos assuntos pertinentes à pesquisa.

Ao Professor João Marcos Alcoforado Rebello por ter proporcionado o treinamento em ultra-som no LABOEND-RJ e pela parceria na pesquisa.

Ao Professor Francisco Alcides Germano pela ajuda prestada.

Aos colegas do CENDE, Estênio, Juliano Tesser, Juliano Aguiar e Alex, pelo apoio e amizade.

Aos colegas do Curso de Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, Adailson, Nélio, Flávio, pelos momentos de descontração e amizade.

À ANP pelo apoio financeiro.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar diferentes defeitos de soldagem (falta de fusão, falta de penetração e porosidade) inseridos em corpos de prova durante o processo de soldagem, através da análise fractal de sinais ultra-sônicos obtidos pela técnica TOFD. Para eliminar os ruídos, os sinais foram tratados usando dois métodos de filtragem, passa banda e Savitzky-Golay. Na análise fractal dos sinais foram utilizados três métodos: análise de Hurst, análise de flutuação sem tendências e análise de cobertura mínima. Nos três métodos foram considerados sinais filtrados isoladamente, bem como sinais filtrados concatenados. Os parâmetros característicos das regiões de escala, para cada tipo da análise, foram calculados através de regressões lineares, sendo também determinado o desvio padrão de cada sinal. A caracterização de todos os defeitos foi determinada através dos parâmetros obtidos para os sinais filtrados pelo método Savitzky-Golay e para os sinais concatenados filtrados pelo método passa banda. Foi também mostrado que, no contexto dessa análise fractal, a melhor discriminação foi obtida utilizando o método de Savitzky-Golay.

ABSTRACT

The present work aims to characterize welding defects (lack of fusion, incomplete penetration and porosity) inserted in specimens during the welding process, by means of the fractal analysis of ultrasonic signals obtained by using the TOFD technique. In order to eliminate the noise, the signals have been treated by two different filtering methods, namely, band pass and Savitzky-Golay. In the fractal characterization of the signals, three methods have been used: Hurst's analysis, detrended fluctuation analysis and minimal cover analysis. In all three methods, filtered isolate signals and filtered concatenate signals have been considered. The characteristic parameters of the scaling regions, for each analysis, have been calculated by using linear regression, and the standard deviation of the signals has also been determined. The characterization of all defects has been determined from the parameters obtained for the signals filtered by using Savitzky-Golay and for the concatenate signals filtered by using band pass. It is also shown that, ´within this fractal analysis, the best discrimination is obtained by using Savitzky-Golay method.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

2 DEFEITOS DE SOLDAGEM 4

2.1 Porosidade 5

2.2 Falta de Fusão 6

2.3 Falta de Penetração 6

3 ENSAIO ULTRA-SÔNICO 7

3.1 Características gerais das Ondas Ultra-sônicas 10

3.1.1 Propagação de ondas 10

3.1.2 Tipos de ondas ultra-sônicas 11

3.1.2.1 Ondas Longitudinais 11

3.1.2.2 Ondas Transversais 12

3.1.2.3 Ondas superficiais ou Ondas Rayleigh 13

3.2 Geração de Ondas Ultra-sônicas 15

3.2.1 Introdução 15

3.2.2 O Efeito Piezelétrico 16

3.3 Vantagens dos Ensaios Ultra-sônicos 18

3.3.1 Versatilidade 18

3.3.2 Sensibilidade e Direcionalidade 19

3.3.3 Conveniência 19

3.4 Desvantagens e Limitações 20

3.5 Técnicas de Ensaio Ultra-sônico 20

3.5.1 Tempo de Percurso de Onda Difratada (TOFD) 21

3.5.1.1 Introdução 21

3.5.1.2 Princípio Básico 21

3.5.1.3 Dimensionamento de Defeitos 25

3.5.1.4 Precisão e Resolução 26

3.5.1.5 Zona Morta 26

3.5.1.6 Vantagens e desvantagens 27
4 PROCESSAMENTO DE SINAIS ULTRA-SÔNICOS 28
4.1 Geometria Fractal 28
4.1.1 Introdução 28
4.1.2 Fractais Randômicos e Regulares 29
4.1.3 Dimensão Fractal 30
4.2 Método da Análise do Intervalo Re-escalado de Hurst – Análise R/S 31
4.3 Método da Análise de Flutuação das Não-Tendências (DFA) 34
4.4 Análise de Cobertura Mínima 36
5 MATERIAIS E MÉTODOS 39
5.1 Materiais e corpos de prova 39
5.2 Equipamentos 40
5.3 Metodologia 41
5.3.1 Ensaio 41
5.3.2 Aquisição dos sinais 43
5.3.3 Tratamento e Análises dos sinais 43
5.3.3.1 Critério de Chauvenet 49
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 50
6.1 Introdução 50
6.2 Análises *R/S*, Flutuação sem Tendências e Cobertura Mínima 50
6.3 Análise dos Resultados 112
7 CONCLUSÕES 114
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 116
APÊNDICE 120

This document was created with Win2PDF available at http://www.win2pdf.com.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.

1 INTRODUÇÃO

Na área industrial, a parada da produção para realização de manutenção, seja preventiva ou preditiva, representa um custo bastante elevado, principalmente quando nos referimos à área petrolífera. É por isso que há muito o setor de manutenção é tido como uma “ovelha negra” da indústria, pois não gera recursos apenas despesas.

Este fato, explica a busca incessante da redução dos custos de manutenção na indústria em geral. Nesse sentido ocupam lugar de destaque os ensaios não-destrutivos, uma vez que a realização desses ensaios não acarreta, na maioria das vezes, a desmontagem dos equipamentos e, em alguns casos não necessita a parada do equipamento em questão.

Dentre os ensaios não-destrutivos, o ultra-sônico vêm se consolidando cada vez mais pela versatilidade, sensibilidade e conveniência, podendo ser usado em equipamentos de diversos tamanhos e geometrias, detectando defeitos cada vez menores e não representando perigo à saúde do operador, como o que ocorre com a radiografia, por exemplo [ASNT, 1996]. A portabilidade é outra vantagem não necessitando estar ligado sequer à rede elétrica.

Das técnicas ultra-sônicas, a técnica TOFD vem ganhando destaque, já que permite a localização e o dimensionamento precisos dos defeitos, a visualização do defeito no local da inspeção dando a dimensão real do problema através da digitalização e agrupamento dos sinais B-scan e D-scan [BSI, 1993], e a possibilidade de se automatizar a inspeção com o uso de robôs aumentando a rapidez e precisão do ensaio.

Apesar das vantagens apresentadas, não é plena a confiabilidade da técnica de ultra-som quando usada para caracterizar defeitos encontrados durante uma inspeção, uma vez que esta caracterização dos defeitos depende fortemente da experiência e conhecimento do operador [MOURA, 2003]. É justamente devido a essa subjetividade que vem se tentando desenvolver uma ferramenta computacional, expressa em termos de um algoritmo matemático, que caracterize corretamente os defeitos.

Dentre as tentativas de caracterização de defeitos podemos citar: a análise espectral, função autocorrelação [BALDEV, 1997], reconhecimento de padrões utilizando redes neurais artificiais [MOURA, 2003] e análise fractal [TESSER, 2003].

A análise fractal tem conseguido resultados promissores na caracterização da estrutura de ligas metálicas [BARAT, 1998] e ferro fundido [MATOS et al, 2004], e na caracterização de mecanismos de falha estrutural de compósitos de matriz polimérica com fibra de vidro [SILVA, 2002].

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar os defeitos de soldagem através da análise fractal dos sinais de ultra-som obtidos técnica TOFD [BSI, 1993]. A determinação dessas características fractais será feita através da análise de Hurst [FEDER, 1988], análise de flutuações sem tendências [KURNAZ, 2004] e análise de cobertura mínima [DUBOVIKOV et al,2004], cujos parâmetros característicos deverão conter uma assinatura de cada tipo defeito. A validação desta hipótese será feita através do processamento dos sinais obtidos por Moura (2003).

A revisão bibliográfica é apresentada nos três primeiros capítulos. No primeiro é feita uma classificação dos vários tipos de defeitos de soldagem e uma breve definição dos defeitos estudados no trabalho; no segundo discute-se amplamente o ensaio ultra-sônico e a técnica de ensaio TOFD; e no terceiro é realizada uma explanação sobre geometria fractal e as análises fractais utilizadas nos sinais.

No quarto capítulo estão descritos os corpos de prova e suas características, os equipamentos utilizados e os ensaios realizados, e os programas e técnicas computacionais usados nos tratamentos e análises dos sinais. Para a análise numérica foram realizados três tipos de tratamentos dos sinais. No tratamento 1 foram utilizados todos os 240 sinais de cada tipo de defeito, com a quantidade de pontos que foram obtidos no ensaio, e realizou-se uma filtragem passa-banda nos sinais. No tratamento 2, após a filtragem passa-banda dos sinais, os mesmos foram concatenados com o objetivo de aumentar o número de pontos para o processamento numérico. Já no tratamento 3 foram utilizados apenas 10 sinais de cada tipo de defeito com a quantidade de pontos da aquisição, sendo realizada uma filtragem do tipo Savitzky-Golay [MOURA, 2003].

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos pelo diferentes métodos de análise, e discutidos os resultados. E finalmente, nas Conclusões, são apresentados os principais resultados obtidos no trabalho.

2 DEFEITOS DE SOLDAGEM

A palavra “defeito” significa que uma solda é imperfeita e necessita de medidas corretivas ou rejeição. A importância de um defeito de solda deve ser vista no contexto do objetivo ao qual se destina a estrutura soldada, onde se busca um equilíbrio entre qualidade, confiabilidade, e economia do procedimento de soldagem. Esse objetivo da junta soldada varia em função das necessidades de serviço da estrutura soldada, bem como das propriedades do material envolvido [ASM, 1993].

Os defeitos em juntas soldadas por fusão se classificam em três grandes grupos [AWS, 1984], segundo a sua origem:

- Procedimentos e Processos de Soldagem
  a) geométricos
     - alinhamento deficiente;
     - mordedura;
     - concavidade ou convexidade;
     - reforço excessivo;
     - reforço insuficiente;
     - sobreposição;
     - penetração excessiva;
     - anteparo inferior soldado;
     - penetração incompleta;
     - falta de fusão;
     - rechupe;
     - irregularidade de superfície.

  b) outros
     - abertura do arco;
     - inclusões de escória;
     - inclusões de tungstênio;
     - filmes de óxido;
     - salpico;
     - crateras.
- Metalúrgicos
  a) trincas ou fissuras

- quente;
- fria ou de retardo;
- reaquecimento, alívio de tensões, ou fragilização por encruamento;
- ruptura lamelar.

b) porosidade

- esférica;
- alongada;
- bolha superficial.

c) zona afetada pelo calor, alteração microestrutural;

d) segregação na zona afetada pelo calor e no metal de solda

Como neste trabalho serão investigados apenas os defeitos do tipo: porosidade, falta de fusão e falta de penetração (penetração incompleta), somente estes defeitos serão detalhados a seguir.

2.1 Porosidade

É o termo usado para bolhas de gás ou vazios livres de qualquer material sólido freqüentemente usado em soldas. A porosidade pode vir de gases liberados pelo resfriamento do metal de solda por causa da redução de solubilidade quando a temperatura cai, e dos gases formados por reações químicas na solda. A porosidade pode ser espalhada uniformemente por toda a solda, isolada em pequenas áreas ou concentrada na raiz. Os poros são usualmente esféricos na forma, embora eles podem ocorrer também como bolhas não esféricas ao longo dos contornos de grãos ou como vazios tubulares alongados chamados porosidade tubular ou “bolha superficial” [AWS, 1981]

2.2 Falta de Fusão

Resulta da falha na fusão do metal de solda com metal de base, ou na fusão entre camadas ou filetes adjacentes do metal de solda. A falha na fusão pode ocorrer em qualquer ponto do chanfro ou do cordão de solda, incluindo a raiz da solda.

2.3 Falta de Penetração

Falta de penetração está geralmente associada com soldagem em chanfro. Em alguns projetos de conjuntos soldados, a penetração completa não é sempre desejada em todas as juntas soldadas. Algumas juntas são projetadas com soldas de penetração parcial. Entretanto, tais soldas podem ter penetração inadequada quando a garganta efetiva da solda é menor do que aquela especificada nas especificações de soldagem. A ocorrência de penetração inadequada em soldas é uma função da geometria do chanfro assim como do procedimento de soldagem.

3 ENSAIO ULTRA-SÔNICO

Historicamente, os ensaios não-destrutivos têm sido usados quase exclusivamente na detecção de defeitos macroscópicas em estruturas que tenham um bom tempo de serviço.

Esforços de pesquisa estão sendo direcionados no desenvolvimento e aperfeiçoamento das técnicas não destrutivas capazes de monitorar os processos produtivos dos materiais, a integridade do material no transporte, armazenagem e fabricação, e a taxa de degradação em serviço. Além disso, existem ações em andamento no sentido de desenvolver técnicas capazes de quantificar o tamanho dos defeitos permitindo a determinação da resposta do material usando análise de mecânica da fratura, assim como técnicas quantitativas de caracterização de materiais para substituir as técnicas antigas [ASNT, 1991].

As técnicas ultra-sônicas desempenham um notável papel nesses desenvolvimentos porque proporcionam métodos versáteis para avaliação de microestruturas, associada às propriedades mecânicas, assim como a detecção microscópica e macroscópica de defeitos em materiais sólidos. Embora a possibilidade do uso de ondas ultra-sônicas para aplicações em ensaios não-destrutivos tenha sido sugerida por cientistas russos e alemães já no ano de 1929 e 1931 [ASNT, 1991], foi o desenvolvimento do *Reflectoscópio Supersônico* de Floyd Firestone em 1942 que conduziu às técnicas e instrumentos usados hoje.

O ensaio por ultra-som é um método de ensaio não-destrutivo que utiliza ondas mecânicas de alta freqüência. Estas ondas são geradas na amostra que está sendo examinada, e se propagam no material, sem distorções e com pequenas perdas, exceto quando são refletidas ou difratadas por defeito ou por uma mudança no material.

O ensaio tem como objetivo a detecção desses defeitos internos ou externos (para o caso de medição de espessura e defeitos superficiais), presentes nos mais variados tipos ou forma de materiais ferrosos ou não ferrosos. Tais defeitos são decorrentes do próprio processo de fabricação da peça, por exemplo: bolhas de gás em fundidos, dupla-laminação em laminados, micro-trincas em forjados, escórias em uniões soldadas e muitos outros [CARY, 1998].

O princípio do ensaio consiste de um transdutor, que transforma energia elétrica em energia mecânica. O transdutor é excitado por uma voltagem de alta freqüência que faz com que o cristal presente nele vibre mecanicamente. A sonda de cristal se torna a fonte das vibrações mecânicas ultra-sônicas. Estas vibrações são transmitidas para o corpo de prova através de um fluido acoplador, normalmente um filme de óleo, chamado acoplante. Quando o pulso de ondas ultra-sônicas encontra um defeito no corpo de prova, ele pode ser refletido, refratado ou difratado para o mesmo transdutor que trabalhará agora como receptor ou para um outro transdutor receptor, dependendo da técnica ultra-sônica utilizada. Assim a energia retorna ao transdutor. O transdutor agora trabalha como receptor de uma energia refletida, refratada ou difratada. O sinal inicial ou “estrondo principal”, o eco refletido, refratado ou difratado de um defeito, e o eco de uma superfície posterior do material ensaiado são todas mostradas por um pico vertical na tela do equipamento.

Na figura 1 é mostrado um exemplo de exame por ultra-som utilizando a técnica do pulso-eco. O transdutor está enviando um feixe de energia ultra-sônica. Um pouco da energia é refletida por um defeito interno e o restante é refletido pela superfície posterior da amostra. A figura 2 mostra o equipamento em uso [CARY, 1998].

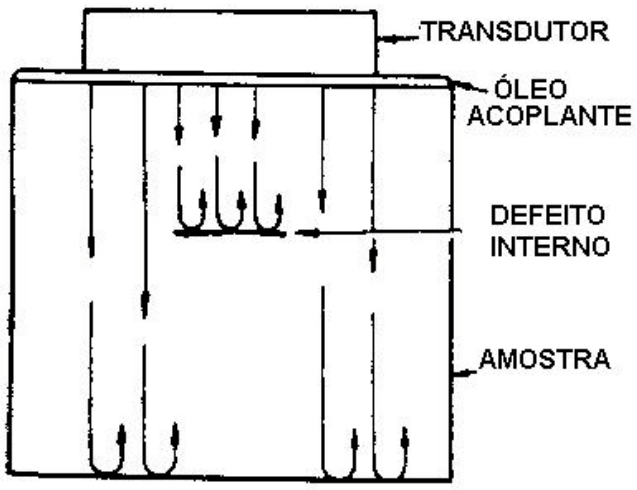

Figura 1 – Princípio do ensaio Ultra-sônico.
[Fonte: CARY, 1998].

Figura 2 – Execução de um exame ultra-sônico em uma solda.
[Fonte: KRAUTKRÄMER, 2004].

A figura 3 mostra uma leitura típica como é apresentada na tela do equipamento. O sinal forte é indicado por uma flexão vertical de pico na tela e o tempo de transmissão é indicado por uma flexão horizontal. Medindo a altura do pico, o tamanho do defeito pode ser determinado. As reflexões dianteira e posterior são os pontos extremos da tela. O eco do defeito está entre as duas [CARY, 1998].

Figura 3 – Leitura do equipamento.
[Fonte: CARY, 1998].

3.1 Características Gerais das Ondas Ultra-sônicas

Ondas ultra-sônicas são ondas mecânicas, ao contrário da luz e dos raios-x que são ondas eletromagnéticas, consistem de oscilações ou vibrações de partículas atômicas ou moleculares de uma substância em relação às posições de equilíbrio destas partículas. Ondas ultra-sônicas se comportam exatamente como ondas sonoras audíveis. Elas podem se propagar em um meio elástico, que pode ser sólido, líquido ou gasoso (dependendo da freqüência e tipo de onda).

Em muitos aspectos o feixe ultra-sônico é parecido com o feixe de luz: ambos são ondas e obedecem a equação geral da onda. Cada um viaja com uma velocidade característica em um dado meio homogêneo – uma velocidade que depende das propriedades do meio, e não das propriedades da onda. Como os feixes de luz, os feixes ultra-sônicos são refletidos das superfícies, refratados quando cruzam uma interface entre duas substâncias que têm diferentes características de velocidades do som, e difratadas em bordas ou ao redor de obstáculos. O espalhamento por superfícies rugosas ou partículas reduz a intensidade de um feixe de luz [ASM, 1992].

3.1.1 Propagação de Ondas Ultra-sônicas

Uma maneira simples de se entender a propagação de ondas sonoras é considerar duas chapas idênticas, S e R, agindo como fonte e receptor respectivamente, paralelas e separadas por um objeto feito de um material homogêneo com o qual elas mantêm contato (Fig. 4). O objeto consiste de um certo número de camadas paralelas muito finas mas, para uma maior clareza apenas vinte e seis delas são mostradas no diagrama: de A a Z. Se a fonte, S, vibra em uma direção perpendicular a sua superfície a uma certa freqüência sobre seu ponto médio, a energia de suas vibrações é transmitida naquela direção para a camada adjacente A que então oscila na mesma direção na mesma freqüência. A camada vibratória A então transmite sua energia de maneira similar para a camada B e sucessivamente para C, D, E etc. que, em troca, vibram da mesma maneira. As vibrações da camada final Z são então transmitidas para o receptor que vibra na mesma direção e mesma freqüência da fonte. Devido estas transferências de

energia acontecerem sob um tempo finito, as vibrações de cada camada estarão atrasadas em relação à camada predecessora e as ondas levarão um tempo finito para se transmitirem da fonte para o receptor. A superfície principal das ondas é chamada de frente de onda [BLITZ & SIMPSON, 1996].

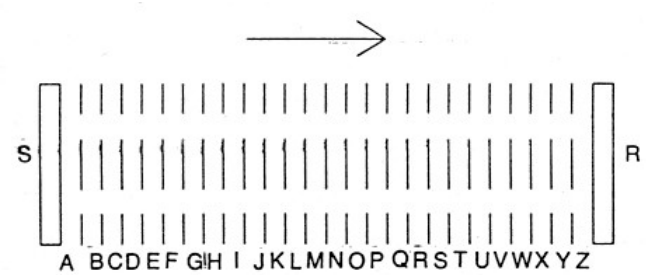

Figura 4 – Propagação do som em um meio dividido em camadas paralelas finas A, B, C, ..., X, Y e Z. S e R indicam a direção do deslocamento, x, da energia sonora [Fonte: BLITZ & SIMPSON, 1996].

Deve ficar entendido que as camadas presentes e as partículas (átomos ou moléculas) que as formam não se movem da fonte para o receptor. É apenas a energia que se transporta [BLITZ & SIMPSON, 1996].

Tomando por base o modo de deslocamento da partícula, as ondas ultra-sônicas são classificadas em longitudinais, transversais, superficiais, e ondas Lamb. Estes quatro tipos de ondas são descritos nas subseções seguintes.

3.1.2 Tipos de ondas ultra-sônicas

3.1.2.1 *Ondas Longitudinais*

Possuem esse nome porque as oscilações das partículas do meio ocorrem na direção longitudinal, isto é, na direção de propagação da onda. Como as forças compressivas e trativas são as responsáveis pelo movimento das partículas, também são chamadas de ondas de pressão ou ondas de compressão, e devido à flutuação da sua densidade também lhe é dado o nome de onda densidade.

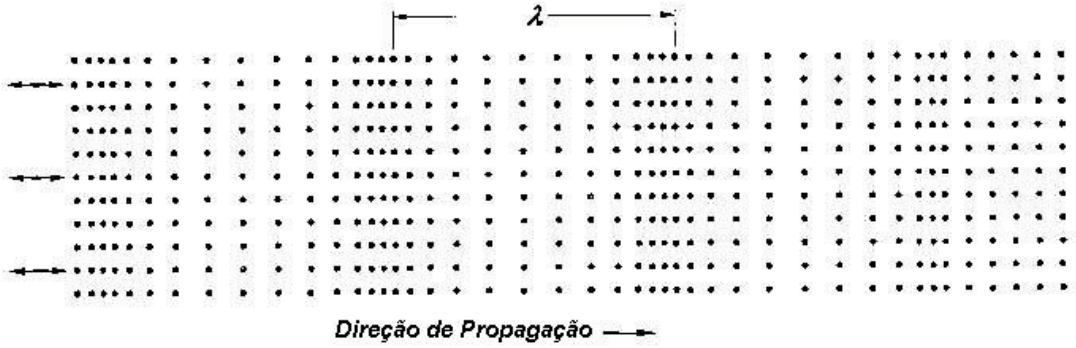

Figura 5 – Onda Longitudinal.
[Fonte: KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER, 1977].

A figura 5 ilustra bem a onda longitudinal, uma onda viajando da esquerda para a direita que ainda não atingiu a margem direita. Pode ser visto que os turnos das fases das oscilações criam zonas onde as partículas se aproximam bastante umas das outras. Estas zonas de compressão se alternam com zonas rarefeitas. O padrão cronológico da onda mostra que estas zonas são constantemente recriadas no lado excitado e que elas viajam no corpo a uma velocidade constante e intervalos uniformes em direção à direita [KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER, 1977].

3.1.2.2 *Ondas Transversais*

Nas ondas transversais as partículas não oscilam na direção de propagação, e sim na direção perpendicular a ela, transversalmente. Um exemplo de onda transversal é mostrado esquematicamente na figura 6 onde se vê o deslocamento das partículas em um dado instante. Assumimos novamente que as ondas viajam da esquerda para a direita.

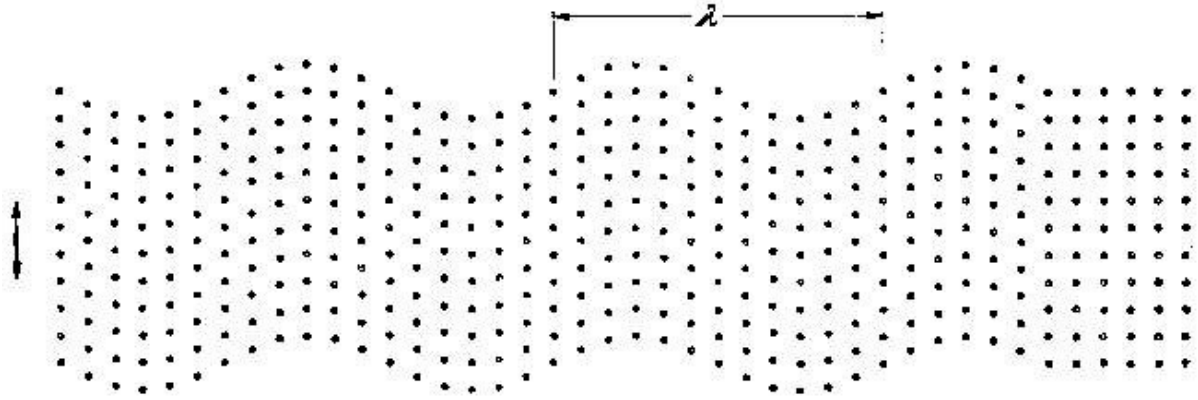

Figura 6 – Onda Transversal.
[Fonte: KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER, 1977].

As excitações podem ser visualizadas como um movimento na qual as partículas na interface esquerda do corpo são movimentadas senoidalmente para cima e para baixo por uma força cisalhante. Nos corpos sólidos, onde a força cisalhante pode ser transmitida para as partículas nos planos adjacentes, as oscilações transversais mostrarão um atraso de tempo, dependendo de sua distância do plano de excitação. Esta onda é também chamada de onda de cisalhamento. Também neste caso o comprimento de onda é determinado pela distância entre dois planos nos quais as partículas estão em um estado similar (Figura 6).

3.1.2.3 *Ondas superficiais ou Ondas de Rayleigh*

A *onda de fronteira* (contorno) que existe na superfície de contorno, curva ou plana, de um meio semi-infinito, é uma *onda de superfície* ou também chamada de *onda de Rayleigh* [RAYLEIGH, 1926]. A figura 7 mostra em um dado instante, uma onda de superfície no aço, ou mais precisamente o movimento do topo da linha de partículas [KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER, 1977].

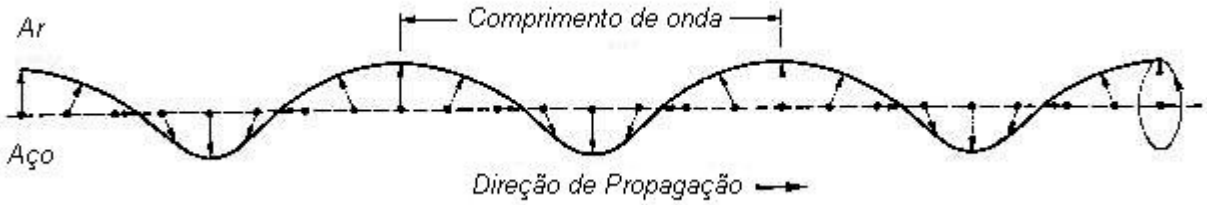

Figura 7 – Onda Superficial no aço. No lado direito uma oscilação elíptica de uma partícula e o sentido de rotação.
[Fonte: KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER, 1977].

A deformação não é assim estritamente senoidal e é até certo ponto já conhecida das ondas aquáticas embora as últimas não sejam ondas elásticas, mas o resultado de forças gravitacionais. Nas ondas aquáticas o movimento oscilatório das partículas é circular, nas ondas Rayleigh é elíptico, como indicado no lado direito da figura 7. A grandes profundidades abaixo da superfície a amplitude da oscilação decresce rapidamente, tanto que a profundidade de aproximadamente um comprimento de onda as partículas já estão praticamente no repouso [KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER, 1977].

As ondas superficiais que se propagam com comprimento de onda comparável à espessura da chapa ensaiada são chamadas de ondas “Lamb” (Figura 8) [SANTIN, 1996]. Elas ocorrem de dois modos diferentes, a onda dilatacional ou simétrica e a onda curva ou assimétrica.

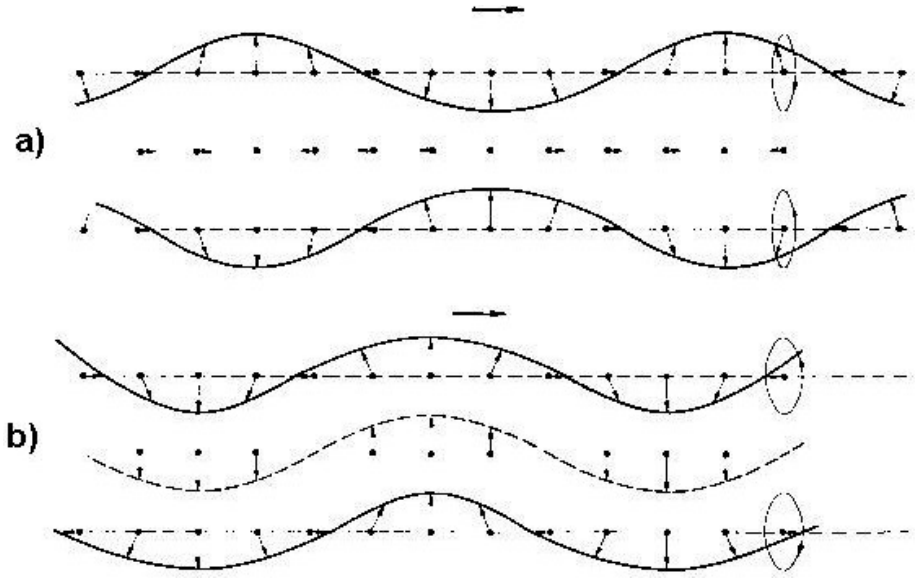

Figura 8 – Ondas Lamb. a) Simétricas; b) Assimétricas.
[Fonte: KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER, 1977].

Nas ondas simétricas as partículas da zona mediana executam oscilações puramente longitudinais, e no caso das ondas curvas as oscilações destas mesmas partículas são puramente transversais. As outras partículas oscilam em ambos os casos elipticamente.

Para o caso especial de ondas superficiais que se propagam em movimento paralelo à superfície e transversal em relação à direção de propagação são chamadas ondas “Love”.

3.2 Geração de Ondas Ultra-sônicas

3.2.1 Introdução

A maioria dos transdutores ultra-sônicos usados em ensaios não-destrutivos é reversível: a conversão de energia elétrica em energia acústica e vice-versa é realizada com igual eficiência.

Os transdutores ultra-sônicos podem ser classificados assim [BLITZ & SIMPSON, 1996]:

- Piezelétricos
- Eletromagnéticos.
- Eletrostáticos.
- Magnetoestritivo.
- Laser e ótico.
- Mistos.

Considerações importantes na escolha do transdutor são a qualidade da performance, a facilidade de aplicação e o custo. Para a grande maioria dos usos, o transdutor piezelétrico é o mais satisfatório nesses aspectos. Contudo para transmissão, as ondas ultra-sônicas têm que se propagar em alguns caminhos através do objeto ensaiado e isto requer o uso de um material acoplante adequado para fornecer um coeficiente de transmissão satisfatório [BLITZ & SIMPSON, 1996].

3.2.2 O Efeito Piezelétrico

Piezeletricidade é a propriedade de certos cristais, incluindo quartzo, sal Rochelle, turmalina e titanato de bário, de apresentar uma diferença de potencial quando submetido a uma pressão. O efeito reverso está presente – quando um campo elétrico é aplicado, o cristal rapidamente muda sua forma. A piezeletricidade foi descoberta por Pierre e Jacques Curie por volta de 1880 [ASNT, 1991].

O efeito é também observado em materiais cerâmicos preparados tais como titanato zirconato de chumbo (PZT) e meta-niobato de chumbo, que possuem propriedades eletroestritivas fortes e são geralmente usados em transdutores ultra-sônicos para detecção de defeitos.

O efeito piezelétrico necessita da presença de um eixo polar. Este eixo está presente naturalmente nos materiais de cristais simples usados como transdutores, mas devem ser induzidos artificialmente nas cerâmicas eletroestritivas. Considere um disco feito de um destes materiais contendo um eixo polar perpendicular às superfícies planas paralelas. Sujeitando-o à tensão mecânica, aparecem cargas elétricas iguais e opostas nestas superfícies. Este é o **efeito piezelétrico direto**. A figura 9(a) ilustra o fenômeno para a tensão de tração agindo ao longo de um eixo polar característico de tensões e deformações longitudinais, e.g. o eixo-x de um cristal de quartzo ou o eixo-z de um transdutor cerâmico. Substituindo a tensão de tração por uma tensão compressiva de igual amplitude, as cargas de superfície trocam a polaridade mas não mudam em resistência (Fig. 9(b)). Afirmando que o limite elástico não é excedido como um resultado do tensionamento, a polarização (a carga por unidade de área), *P*, nas superfícies é proporcional à tensão aplicada σ [BLITZ & SIMPSON, 1996]*:*

$$P = \sigma d \,, \tag{2.1}$$

P é expresso em coulombs por metro quadrado (Cm^{-2}), σ em pascais (Pa, Nm^{-2}) e *d* é a **constante de deformação piezelétrica** expressa em coulombs por newton (CN^{-1}).

.

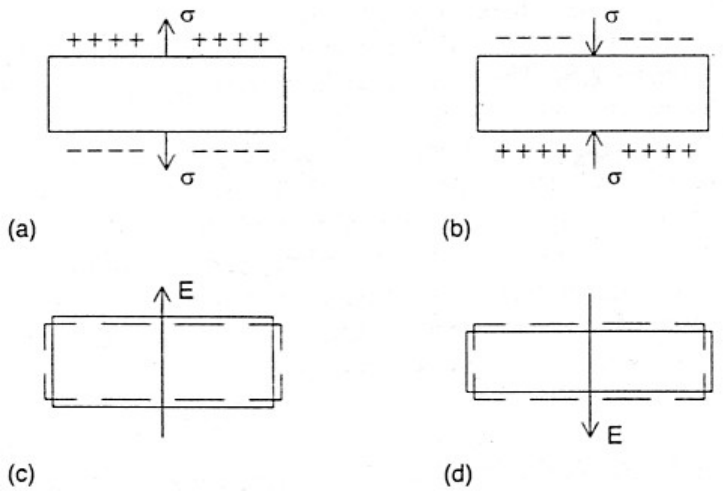

Figura 9 – Compressões e expansões de um transdutor piezelétrico: (a) efeito de uma tensão de tração σ; (b) efeito de uma tensão compressiva σ; (c) expansão causada por aplicação do campo elétrico E; e (d) contração causada pelo inverso de E. As linhas pontilhadas em (c) e (d) indicam as dimensões do transdutor quando não está em operação.
[Fonte: BLITZ & SIMPSON, 1996].

É observada a polarização além da deformação mecânica produzida pela tensão. Na prática, as superfícies das chapas são cobertas finamente com eletrodos de metal e *P* pode ser avaliado pela medida do fluxo de carga quando os eletrodos estão curto-circuitados.

O exemplo ilustrado pelas figuras 9 (a) e (b) é válido apenas quando na direção do eixo polar ocorrem tensões e deformações de tração características das ondas compressivas (longitudinais). Quando ocorrem tensões e deformações de cisalhamento (ondas transversais), o eixo polar (e.g. o eixo-y de um cristal de quartzo) deveria ser perpendicular à direção da espessura do transdutor, mas isso causaria dificuldades na propagação em sólidos quando se usa líquidos acoplantes, que entram em colapso sob a ação de tensões de cisalhamento. O método comum de transmissão de ondas transversais através de sólidos é o uso de técnicas de conversão de modo [BLITZ & SIMPSON, 1996].

Com **o efeito piezelétrico inverso** um campo elétrico, *E*, aplicado ao longo do eixo polar produz uma deformação mecânica, *S*, e, contanto que não exista nenhum carregamento mecânico no disco, *S* é diretamente proporcional a *E*, assumindo condições elásticas:

$$S = Ed \ . \qquad (2.2)$$

Esse fenômeno ocorre além da produção de cargas elétricas pelo campo. Devido o efeito ser reversível, a constante *d* é a mesma que aparece na equação (2.1), isto é, o coeficiente de deformação piezelétrico. As figuras 9 (c) e (d) ilustram estes efeitos inversos para deformações de tração. Na equação (2.2) a unidade de *d* é mV^{-1} mas, de uma consideração da lei de Joule pode ser mostrado que é o mesmo CN^{-1} [BLITZ & SIMPSON, 1996].

3.3 Vantagens dos Ensaios Ultra-sônicos

Como as ondas ultra-sônicas são vibrações mecânicas, o ensaio de ultra-som é especialmente apropriado na detecção de anomalias elásticas e medidas de propriedades físicas tais como porosidade, estrutura e constantes elásticas. Propriedades óticas, magnéticas e outras propriedades não são geralmente indicadas. Quanto a detectabilidade, as anomalias tipicamente determinadas com ultra-som incluem variações geométricas, defeitos grandes, defeitos pequenos e microestrutura [ASNT, 1996].

O equipamento de ensaio ultra-sônico é basicamente eletrônico e as amplitudes da onda podem ser obtidas em tempo real. Esta característica permite rápida varredura com posicionamento, gráficos e alarmes automáticos que avisam quando são encontradas ondas com elevada amplitude. As suas principais vantagens são descritas a seguir.

3.3.1 Versatilidade

O método ultra-sônico permite o ensaio de corpos-de-prova e/ou estruturas com uma grande variedade de tamanhos e geometrias. A técnica detecta defeitos internos, ocultos que podem estar distantes da superfície. Existem transdutores para gerar ondas de vários tipos, longitudinais, transversais e superficiais. As aplicações variam de medidas de espessura de chapas finas de aço à verificação da integridade da estrutura interna de grandes rotores de turbinas.

A maioria dos materiais resilientes, não porosos, usados para propósitos estruturais (aço, alumínio, titânio, magnésio e cerâmica) podem ser penetrados. Até

mesmo seções transversais grandes podem ser ensaiadas, mesmo que os defeitos sejam pequenos.

3.3.2 Sensibilidade e Direcionabilidade

O uso de uma alta freqüência, em um feixe sonoro bem definido permite a detecção e localização dos menores defeitos. Defeitos em forma de disco ou trincas de espessura quase zero podem ser detectados [ASNT, 1996].

A profundidade pode ser medida em milímetros até em objetos espessos. Os feixes ultra-sônicos têm geralmente boa direcionabilidade, sendo limitados a cones de baixa divergência pelos seus pequenos comprimentos de onda. Técnicas de feixes angulares permitem o seu direcionamento para qualquer área no objeto.

3.3.3 Conveniência

Não há nenhum perigo para o operador ou para as pessoas que estejam próximas ao ensaio. No caso de grandes equipamentos e estruturas, ele pode ser feito do lado externo do mesmo.

Os equipamentos podem ser usados em shoppings, laboratórios, armazéns ou campo, permitindo o ensaio no local. É necessário um suprimento de força moderado de uma linha de corrente alternada ou um pequeno gerador. As unidades portáteis são alimentadas por baterias.

Técnicas de ensaio ultra-sônico são amplamente aceitas para controle de qualidade e ensaios de materiais na maioria das indústrias pesadas, incluindo geradoras de eletricidade, produção de aço, alumínio e titânio, na fabricação de fuselagem de aviões, motores de jatos e construção de navios. Técnicas ultra-sônicas são usadas para prevenir falhas de eixos, colunas de pressão, engrenagens de máquinas de terraplanagem, cilindros de laminação, equipamentos de mineração e outras máquinas e equipamentos [ASNT, 1996].

3.4 Desvantagens e Limitações do Ensaio Ultra-sônico

As principais desvantagens da inspeção ultra-sônica são as seguintes [ASM, 1992]:

- A operação manual requer atenção especial e deve ser realizada por técnicos experientes;
- É necessário um grande conhecimento técnico no desenvolvimento dos procedimentos de inspeção;
- Partes rugosas, que são irregulares na forma, muito pequenas ou finas, ou não homogêneas são difíceis de inspecionar;
- Defeitos que estão presentes em uma camada imediatamente abaixo da superfície podem não ser detectados;
- São necessários acoplantes para fornecer transferência efetiva da energia da onda ultra-sônica entre os transdutores e as partes que estão sendo inspecionadas;
- São utilizados padrões de referência para calibrar o equipamento a cada inspeção, o que representa perda de tempo no ensaio.

3.5 Técnicas de Ensaio Ultra-sônico

Estão divididas em três grandes grupos: pulso-eco, múltiplos transdutores e outras técnicas menos usuais, tais como: laser, transdutores que usam ar como acoplante, transdutores acústicos eletromagnéticos, e métodos de ressonância e espectroscopia de impedância.

Como a técnica utilizada neste trabalho foi a de Tempo de Percurso de Onda Difratada (do inglês "*Time of Flight Diffraction*" - TOFD) que pertence ao grupo de múltiplos transdutores, apenas esta técnica será apresentada a seguir.

3.5.1 Tempo de Percurso de Onda Difratada (TOFD)

3.5.1.1 Introdução

A primeira informação da técnica TOFD para ensaio ultra-sônico foi introduzida em 1975 por Maurice G. Silk [SILK & LIDINGTON, 1975]. O método foi introduzido na Alemanha [HECKHÄUSER & GISCHLER, 1988]; entretanto foi ignorado pelos técnicos de END (Ensaios Não-Destrutivos) alemães. Em 1996, uma pré-norma européia foi publicada [CEN, 1996] e graças a ela parece que a técnica TOFD afirma-se como alternativa à radiografia e outras técnicas de ensaio ultra-sônico [VERKOOIJEN, 1995].

O método TOFD está adquirindo e aumentando sua importância devido ao seu elevado grau de acerto na detecção de defeitos, portabilidade e o mais importante sua precisão intrínseca no dimensionamento e localização dos defeitos no objeto de ensaio, principalmente a profundidade (distância do defeito em relação à superfície ensaiada), parâmetro de difícil determinação através de ensaio radiográfico. Devido à rigidez das normas européias, com relação à segurança do ensaio radiográfico, muitas empresas de END estão tentando substituir a técnica de Raios-X pelo método TOFD por causa do custo e por razões de segurança.

3.5.1.2 Princípio Básico

A técnica TOFD se baseia na medida do tempo de percurso das ondas ultra-sônicas difratadas nas pontas das descontinuidades. Tempos esses que estão diretamente relacionados com o tamanho e posições corretas do defeito, ao invés da reflexão geométrica na interface das descontinuidades utilizada pelos métodos tradicionais [ZAHRAN et al, 2002]. O TOFD se utiliza principalmente de ondas longitudinais, já que estas ondas se propagam mais rapidamente [BSI, 1993].

A técnica utiliza dois transdutores dispostos de modo que um seja o transmissor da onda ultra-sônica e o outro o receptor. O transmissor emite sinais ultra-sônicos contínuos no material. Cada borda do defeito trabalha como uma fonte pontual de sinais difratados, sendo estes sinais então recebidos pelo receptor. As figuras 10 e 11 ilustram bem a descrição acima.

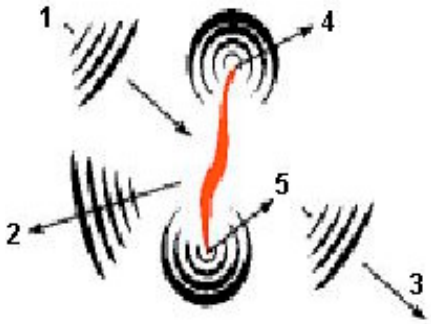

Figura 10 – Interação de uma onda com uma descontinuidade. (1) Onda incidente; (2) onda refletida; (3) onda transmitida; (4) onda difratada da ponta superior do defeito; (5) onda difratada da ponta inferior do defeito. [Fonte: DIEDERICHS, 1999]

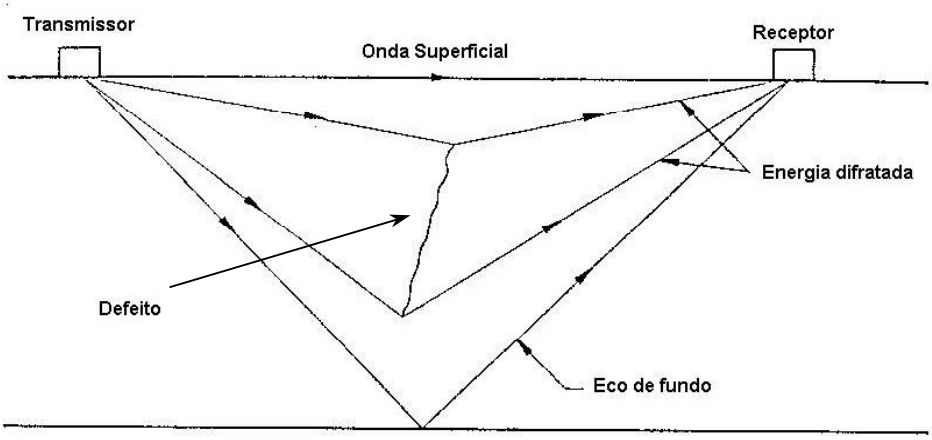

Figura 11 – Esquema padrão da técnica TOFD.
[Fonte: BSI, 1993]

Os sinais detectados pelo receptor são quatro: sendo o primeiro da onda superficial, onda esta que percorre a superfície de contato dos transdutores; o segundo da ponta do defeito mais próxima da superfície ensaiada; o terceiro da ponta do defeito mais distante da superfície ensaiada; e o quarto sinal é o eco de fundo, proveniente da superfície oposta à de ensaio. O primeiro e o quarto sinais são tidos como referência para medir o tempo dos outros sinais, já que representam respectivamente, o percurso mais curto e o mais longo, entre o transdutor emissor e o receptor. Esse atraso no tempo de percurso entre os sinais é a medida de altura do defeito [MOURA, 2003].

A maneira mais simples de se apresentar um sinal ultra-sônico típico de TOFD é através do modo A-scan, que consiste na representação do próprio sinal como é apresentado na tela do equipamento, amplitude versus tempo. A figura 12 mostra um sinal de TOFD no modo A-scan.

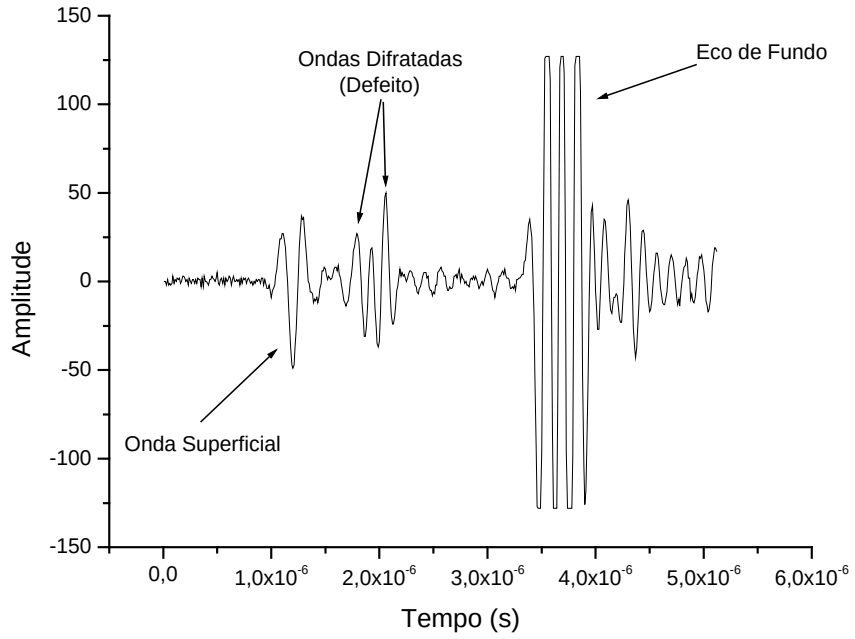

Figura 12 – A-scan típico de um sinal TOFD.
[Fonte: MOURA, 2003]

As outras maneiras mais conhecidas de se representar os sinais de TOFD são os modos B-scan e D-scan [BSI, 1993] onde são feitas digitalizações e agrupamentos de sinais A-scan sucessivos onde os valores de amplitude são convertidos em escalas de cinza ou de cores. O modo D-scan mostra uma seção longitudinal da região que se deseja inspecionar formada pelos sinais A-scan adquiridos pelo deslocamento perpendicular dos transdutores em relação ao feixe ultra-sônico ao longo da região de interesse (solda, por exemplo). Pelo modo D-scan temos idéia de comprimento e a altura dos defeitos relativa à superfície ensaiada. Já no modo B-scan temos uma seção transversal da região inspecionada formada por sinais A-scan adquiridos pelo deslocamento paralelo dos transdutores em relação ao feixe ultra-sônico. No modo B-scan, também temos idéia da altura relativa à superfície ensaiada e medida da largura do defeito. Na escala de tons de cinza, geralmente a cor preta é igual a zero e a cor branca é igual a 255, valores de amplitude. Enquanto que na escala de cores se atribuem cores claras para amplitudes menores e cores escuras para amplitudes maiores. As figuras 13 e 14 demonstram os dois modos.

Figura 13 – Fotografia mostrando ensaio ultra-sônico por TOFD, onde se visualiza os defeitos pelo modo B-scan no aparelho.O sinal A-scan aparece no canto superior esquerdo do aparelho. [Fonte: MOSHKOVIC et al, 2003]

Figura 14 – Fotografia mostrando ensaio ultra-sônico por TOFD, onde se visualiza os defeitos pelo modo D-scan no aparelho.O sinal A-scan aparece no canto superior esquerdo do aparelho. [Fonte: MOSHKOVIC et al, 2003]

3.5.1.3 Dimensionamento de Defeitos

Para elaborar uma formulação do dimensionamento de defeitos vamos primeiramente nos basear no modelo da figura 15. Admitindo que o sinal ultra-sônico entra e sai da amostra em pontos fixos sob os transdutores e separados por uma distância 2*S*. Isto é um modelo simplificado da situação real, mas é suficientemente preciso para muitos propósitos. O tempo, *T*, é obtido a partir da onda difratada pela ponta de um defeito em *D* e volta para o transdutor-receptor, de acordo com a relação [BSI, 1993]:

$$cT = \left[d^2 + (S - X)^2\right]^{1/2} + \left[d^2 + (S + X)^2\right]^{1/2}, \tag{2.3}$$

onde *c* é a velocidade de propagação da onda, *d* é a profundidade de *D* abaixo da superfície da amostra, *S* é a metade da distância entre os transdutores e *X* é o deslocamento lateral do difrator (defeito) em relação à *S*.

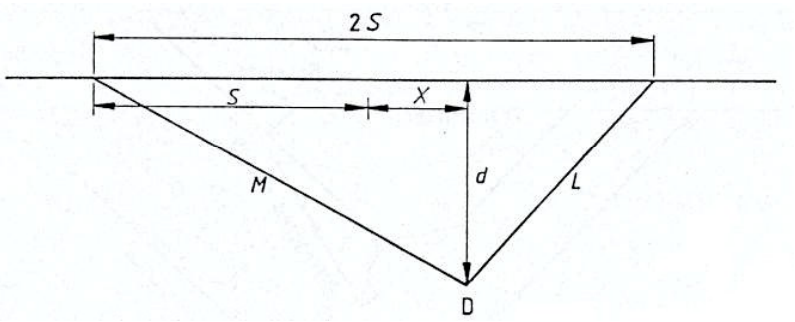

Figura 15 – Geometria Geral do ensaio no modo transmissão-recepção.
[Fonte: BSI, 1993]

$$L^2 = d^2 + (S + X)^2, \tag{2.4}$$

$$M^2 = d^2 + (S - X)^2. \tag{2.5}$$

O valor de *T* é mínimo quando *X* é zero e neste simples caso a expressão torna-se [BSI, 1993]:

$$cT = 2\sqrt{d^2 + S^2}. \tag{2.6}$$

A profundidade *d* é dada por:

$$d = \sqrt{\frac{1}{4}(cT)^2 - S^2} \ . \tag{2.7}$$

3.5.1.4 Precisão e Resolução

Vamos primeiramente distinguir os dois conceitos. Precisão é o grau com que a posição de um refletor ou difrator pode ser determinada, enquanto que resolução é uma medida do grau de distinção entre dois defeitos próximos.

A precisão do dimensionamento por TOFD é influenciada por erros no tempo, velocidade, distância entre os transdutores e na posição lateral do defeito. Sob condições normais, esta última é a que tem maior influência na precisão global.

3.5.1.5 Zona Morta

Próximo à superfície de ensaio existe uma região onde a interferência com a onda superficial pode mascarar o sinal, o mesmo acontecendo na superfície oposta à de ensaio, na qual o eco de fundo age da mesma forma que a onda superficial. A essa região dá-se o nome de zona morta. A profundidade da zona morta superficial, devido à onda superficial, é dada por [CEN, 2001]:

$$D_{ds} = \sqrt{\frac{c^2 T_P^2}{4 + ScT_P}} \tag{2.8}$$

onde T_P é o comprimento do pulso acústico.

Enquanto que a profundidade da zona morta devido ao eco de fundo é dada por:

$$D_{dw} = \sqrt{\frac{c^2 \left(T_W + T_P\right)^2}{4 - S^2}} - W \tag{2.9}$$

onde T_W é o tempo de percurso do eco de fundo e W é a espessura da peça.

3.5.1.6 Vantagens e desvantagens

Dentre as principais vantagens podemos citar:

- A detecção de defeitos por TOFD não depende da orientação do defeito.
- O defeito pode ser precisamente dimensionado.
- Elevada probabilidade de detecção de defeitos.
- Toda a região de interesse pode ser inspecionada com um simples passe uniaxial ao longo da solda.
- A visualização do defeito através das imagens B-scan e D-scan dando uma idéia real do tamanho do defeito.
- O TOFD é uma técnica segura, pois não utiliza qualquer tipo de radiação.
- A possibilidade de se automatizar a inspeção através do uso de robôs é uma das maiores vantagens da técnica, pois possibilita a redução do tempo da medida e o aumento de sua precisão.

As principais desvantagens da técnica encontradas são:

- A sensibilidade: se o ganho do equipamento estiver em um nível baixo, a tela do equipamento não mostrará nenhum eco de difração; por outro lado se o ganho estiver ajustado para um nível ruidoso, a tela do equipamento mostrará vários ecos difratados referentes à não-homogeneidades que são desprezíveis.
- Ineficiência na detecção de defeitos próximos à superfície e na superfície oposta à do ensaio, devido à zona morta.
- Dificuldade no dimensionamento de trincas.
- Limitação dos transdutores quanto à freqüência: a utilização de transdutores de baixa freqüência (inferiores a 1 MHz) pode prejudicar a resolução, assim como o uso de transdutores de alta freqüência (acima de 10 MHz) resulta em um aumento do nível de ruído do sinal.

4 PROCESSAMENTO DE SINAIS ULTRA-SÔNICOS

Consiste na aplicação de técnicas de análise estatística não usuais aos sinais ultra-sônicos, que constituem séries temporais, com o objetivo de obtenção de parâmetros associados a essa análise capazes de discriminar os diferentes tipos de defeitos.

4.1 Geometria Fractal

4.1.1 Introdução

A geometria fractal diz respeito às propriedades dos objetos fractais, ou simplesmente conhecidos por fractais. Os fractais podem ser encontrados na natureza ou gerados usando um algoritmo matemático. Diferentes definições de fractais surgiram, mas a que serve de fio condutor foi introduzida por Benoît Mandelbrot [ADDISON, 1997] que associou a estas figuras propriedades não topológicas. Mandelbrot é considerado algumas vezes o pai da geometria fractal.

Mandelbrot percebeu a impossibilidade de descrever a natureza usando apenas a geometria Euclidiana, isto é, em termos de linhas, retas, círculos, cubos, etc. Ele propôs que os fractais e a geometria fractal poderiam ser usados para descrever objetos reais, tais como árvores, raios, sinuosidades de rios e linhas costeiras, etc.

Os fractais podem apresentar uma infinidade de formas diferentes, não existindo uma aparência consensual. Contudo, existem duas características muito freqüentes nesta geometria: *auto-semelhança* e *complexidade infinita* [PEITGEN et al, 1992].

Um fractal pode ser definido como um objeto que se mostra auto-similar sob diversos graus de ampliação, possuindo simetria através da escala utilizada, com cada pequena parte do objeto reproduzindo a estrutura total. E também é um objeto com sua própria dimensão fractal, que é geralmente uma dimensão não inteira maior do que sua dimensão topológica, D_T, e menor do que sua dimensão Euclidiana, D_E.

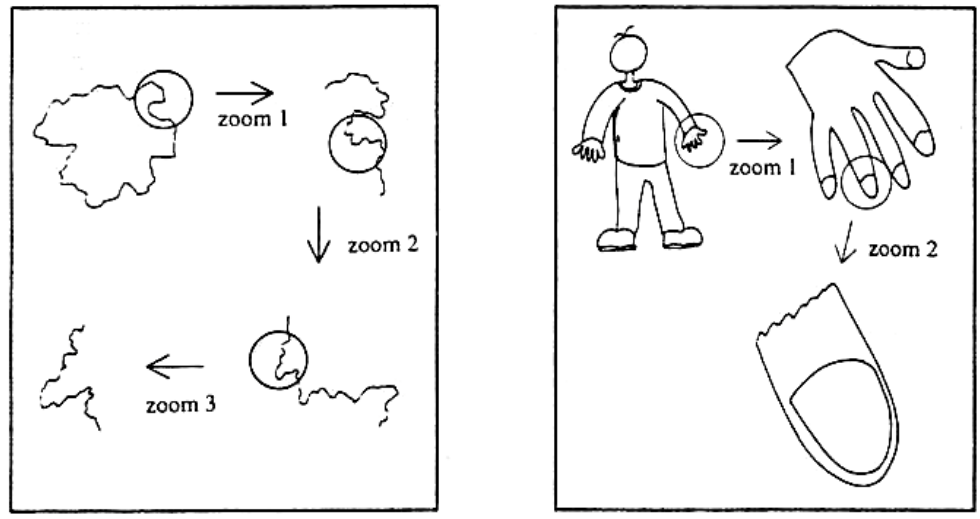

Figura 16 – Objetos fractal e não-fractal. Fonte: [ADDISON, 1997]

A figura acima contém croquis de dois “objetos” naturais: a linha costeira de uma ilha e uma pessoa. Quando nós ampliamos a linha costeira da ilha, vemos que a aspereza é repetida em escalas cada vez menores e comparando com a escala inicial parece essencialmente a mesma: a linha costeira é um objeto fractal. A pessoa, porém, não é um objeto auto-similar. Quando nós ampliamos em várias partes do corpo vemos formas completamente diferentes. A mão não parece com o resto do corpo, a unha não parece com a mão e assim por diante. A pessoa não é, portanto um objeto fractal. [ADDISON, 1997].

A Geometria Fractal pode ser utilizada para descrever diversos fenômenos na natureza, onde não podem ser utilizadas as geometrias tradicionais.

4.1.2 Fractais Randômicos e Regulares

Os fractais naturais, quanto ao tipo de auto-similaridade, se dividem em dois tipos: regulares e randômicos. Os regulares possuem auto-similaridade exata e os randômicos auto-similaridade estatística. Um exemplo clássico de objeto fractal é a curva triádica de Koch, que além de exemplificar bem a formação de um fractal, mostra bem os dois tipos. Como toda curva fractal típica, ela é definida por um elemento básico gerador, que é repetido infinitamente. As curvas fractais possuem uma propriedade particular: o perímetro infinito.

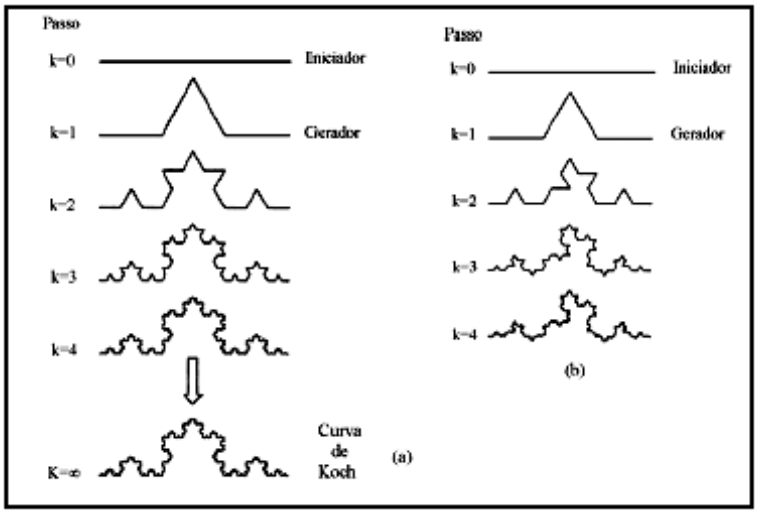

Figura 17 – Curvas triádicas de Koch: (a) construção regular. (b) construção randômica. [Fonte: ADDISON, 1997].

4.1.3 Dimensão Fractal

Aos elementos geométricos comuns estudados na matemática, costuma-se atribuir dimensões inteiras, assim, o ponto tem dimensão zero, a reta tem dimensão um, o plano tem dimensão dois e o espaço usual tem dimensão três. Só que na natureza não encontramos elementos geométricos perfeitos, como vamos então obter a dimensão real desses objetos já que a geometria euclidiana não pode nos ajudar? Para resolver esse problema, desenvolveu-se, então o conceito de dimensão fractal, que assume valores fracionários, podendo assim nos dar uma dimensão da rugosidade e descontinuidade dos objetos. Sem entrar em detalhes matemáticos, podemos adiantar que a curva triádica de Koch acima, por exemplo, tem uma dimensão fractal de Hausdorff D_H, aproximadamente igual a 1,26 [COSTA & BIANCHI, 2002].

Alguns autores chamam a dimensão fractal de “medida da complexidade” dos objetos. A dimensão fractal é, na prática, a medida da rugosidade da superfície efetiva de contato entre o objeto e o seu meio.

Existem outras definições de dimensão fractal como por exemplo, a dimensão de contagem de caixas, a qual é facilmente obtida através de um tratamento numérico [COSTA&BIANCHI, 2002]. Esta dimensão é largamente usada na prática para estimar a dimensão de uma variedade de objetos fractais. A técnica não é limitada a estimar as dimensões de objetos no plano, tal como uma curva

litorânea. Este método pode ser estendido para investigar objetos fractais de alta dimensão em espaços multidimensionais, usando hiper-cubos de cobertura correspondentes a tais escalas.

Para obter o valor *D* da dimensão de contagem de caixas, no caso de curvas planas, discretiza-se a região considerada dentro de quadrados com a dimensão *l*. Então, conta-se o número *N*(*l*) de quadrados de comprimento *l* que tem intersecções com a curva considerada. Se o objeto tem propriedades fractais, então, repetindo-se esse procedimento para diferentes valores de *l*, *D* é obtido através da relação [ADDISON, 1997]:

$$N(l) \sim l^{-D} \ . \qquad (3.1)$$

4.2 Método da Análise do Intervalo Re-escalado 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 18 mostra um exemplo típico de uma série temporal. [TESSER, 2004]

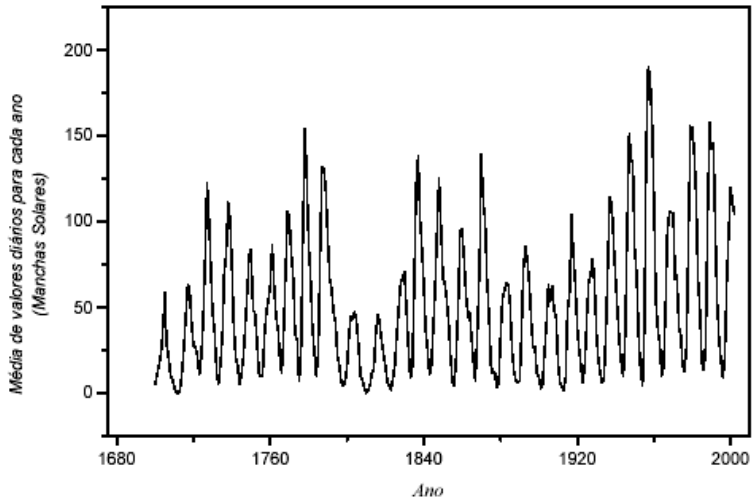

Figura 18 – Mancha Solar entre os anos 1700 e 2002, baseados em contagens de manchas na superfície do sol. [Fonte: SIDC, 2002].

As séries temporais podem ser analisadas em termos da análise do intervalo re-escalado de Hurst, e são caracterizadas pelo expoente de Hurst – *H* [FEDER, 1988]. Para o caso específico de processos gaussianos estocásticos, *H* se relaciona com a dimensão fractal *D* através da seguinte relação:

$$D = 2 - H \,. \tag{3.2}$$

Estudando o rio Nilo e os problemas relacionados ao armazenamento de água, Hurst criou um novo método estatístico, a análise R/S. Assim, dada uma série temporal discreta*{x(1), x(2),..., x(t)}* de um fenômeno natural em um dado intervalo de tempo, definimos o valor médio sobre o período τ como [MATOS et al, 2004]:

$$\langle x \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t) \,. \tag{3.3}$$

Definindo *X(t, τ)* como sendo o desvio cumulativo de *x(t)* em relação à média $\langle x \rangle_{\tau}$,

$$X(t,\tau) = \sum_{u=1}^{t} \left\{ x(u) - \langle x \rangle_{\tau} \right\}, \tag{3.4}$$

temos que *R,* a diferença entre os valores máximos e mínimos de *X(t, τ)* no intervalo τ é dado por [FEDER, 1988]:

$$R(\tau) = \max_{1 \le t \le \tau} X(t,\tau) - \min_{1 \le t \le \tau} X(t,\tau). \tag{3.5}$$

Considerando *S* o desvio padrão no intervalo τ definido como:

$$S = \left(\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \left\{ x(t) - \langle x \rangle_{\tau} \right\}^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \tag{3.6}$$

Hurst encontrou que *R/S* satisfaz a relação de escala:

$$R/S = A_H \cdot \tau^H. \tag{3.7}$$

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

$$R/S = \left(\frac{\pi\tau}{2} \right)^{\frac{1}{2}}. \tag{3.8}$$

Para se obter as tendências dentro de uma série temporal, é necessário dividi-la em várias partes e efetuar a análise *R/S* para cada parte. Assim, calcula-se R/S_1 para τ, então se divide a série pela metade e calcula-se R/S_2 para cada parte. Repete-se essa operação para divisões de τ da série por 4, 8,..., e assim por diante. Então, as séries de *R/S* são calculadas do conjunto de dados para o respectivo intervalo de divisões e então representadas em uma curva log-log. O coeficiente de Hurst, *H*, é então calculado da inclinação da linha reta referente à regressão linear dos *R/S* discretos [BARAT, 1997]. Veja o exemplo da figura 19.

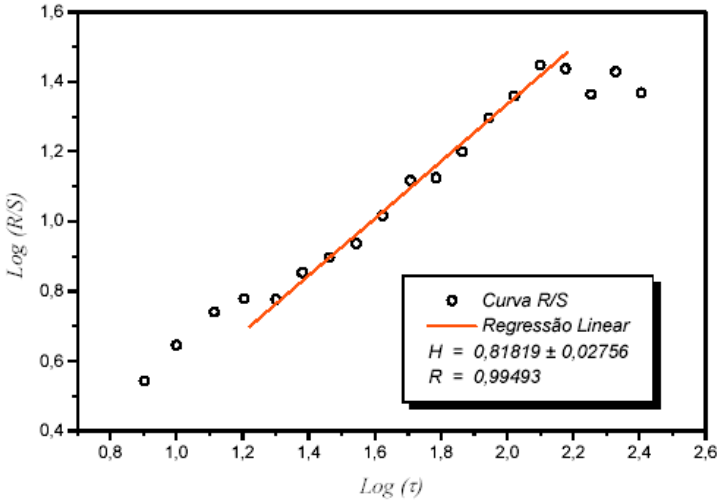

Figura 19 – Análise de Hurst dos dados de Mancha Solar entre os anos 1700 e 2002, baseados em contagens de manchas na superfície do sol. [Fonte: SIDC, 2002].

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 – $H = ½$), a correlação das ocorrências do futuro e passado desaparece para qualquer t. Entretanto, para $H \neq ½$, tem-se uma correlação diferente de zero, independente de t. Isto é uma notável característica do movimento Browniano fracionário que leva à persistência ($H > ½$), ou seja, uma tendência de crescimento no passado implica em média numa tendência de crescimento no futuro e vice-versa ou antipersistência ($H < ½$), ou seja, uma tendência de acréscimo no passado implica em média numa tendência de decréscimo no futuro e vice-versa [SILVA, 2002].

4.3 Método da Análise de Flutuação Sem Tendências (DFA)

As aproximações tradicionais tais como, a análise de correlação e o espectro de potência, são apropriadas para quantificar correlações em sinais estacionários. Entretanto muitos sinais que são produzidos por sistemas mais complexos são não-estacionários – a média, o desvio-padrão, e momentos mais altos, ou funções de correlação variam com o tempo. A não-estacionariedade pode

eventualmente ser associada com diferentes tendências no sinal ou segmentos heterogêneos (irregularidades) com propriedades estatísticas locais diferentes.

Para resolver esse problema, a análise de flutuação sem tendências (do inglês "*Detrended Fluctuation Analysis" – DFA*) foi desenvolvida para quantificar precisamente as correlações de leis de potência de longo período encontradas em séries temporais não-estacionárias. Este método fornece um parâmetro quantitativo simples – o expoente de escala α - para quantificar as propriedades de correlação de um sinal. Uma das vantagens do DFA é a que permite a detecção de correlações de leis de potência de longo período em sinais ruidosos com tendências polinomiais embutidas que podem mascarar as correlações verdadeiras nas flutuações do sinal.

O método DFA têm sido aplicado com êxito a vários campos de pesquisa tais como: dinâmica cardíaca, postura humana, meteorologia, flutuações climáticas de temperatura, volume de descarga e fluxo de rios, receptores neurais em sistemas biológicos, e economia [CHEN et al, 2002].

Para calcular o expoente α, vamos primeiramente calcular a flutuação da amplitude em relação à amplitude média,

$$\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle , \tag{3.9}$$

onde $\langle x \rangle$ é a média das amplitudes da série temporal e é dado por [KURNAZ, 2004]:

$$\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i \ . \tag{3.10}$$

Integrando Δx_i, tem-se:

$$y(m) = \sum_{i=1}^{m} \Delta x_i \ , \tag{3.11}$$

onde *m=1,...,N.* Agora, a série temporal de *y(m)* é dividida em intervalos iguais de comprimento *n*. Em cada intervalo ajustamos a *y(m)* uma linha reta, $y_a(m)=am+b$, e calculamos a variabilidade sem tendências *F(n)* como

$$F(n) = \sqrt{\left\langle \frac{1}{n} \sum_{m=kn+1}^{(k+1)n} \left(y(m) - y_a(m) \right)^2 \right\rangle} , \tag{3.12}$$

com [KURNAZ, 2004]

$$k = 0,1,2,...,\left(\frac{N}{n} - 1\right). \tag{3.13}$$

Uma relação de lei de potência entre *F(n)* e *n* indica a presença de escala:

$$F(n) = A_{\alpha} \cdot n^{\alpha}. \tag{3.14}$$

As flutuações podem ser caracterizadas pelo expoente de escala α, um parâmetro de auto-similaridade que representa as propriedades de correlação de leis de potência de longos períodos do sinal. [CHEN et al, 2002].

Se as flutuações dos dados não forem correlacionadas (ruído branco) devemos ter α=½. Se α<½, o sinal é anticorrelacionado, e se α>½, o sinal é correlacionado.

4.4 Análise de Cobertura Mínima

Relembrando a definição de fractal onde um objeto fractal é aquele cuja sua dimensão fractal (*D*) é maior que sua dimensão topológica D_T, é natural introduzir o *índice de fractalidade F* como

$$F = D - D_T. \tag{3.15}$$

Para uma função *y=f(t)* real e contínua, determinada dentro de um intervalo fechado *[a;b]* representando a divisão do intervalo em segmentos de igual tamanho d, tem-se:

$$\omega_m = \left[a = t_0 < t_1 < \ldots < t_m = b\right]; \delta = (b-a)/m. \tag{3.16}$$

Deseja-se produzir a cobertura mínima da função *f(t).* Para tanto, preenche-se o gráfico com retângulos relacionados à divisão adotada (vide figura 20). As bases dos retângulos são d, e suas alturas, $A_i(d)$, as quais representam as

diferenças entre os valores máximo e mínimo da função *f(t)* dentro do intervalo $[t_{i-1};t_i]$ [DUBOVIKOV et al, 2004].

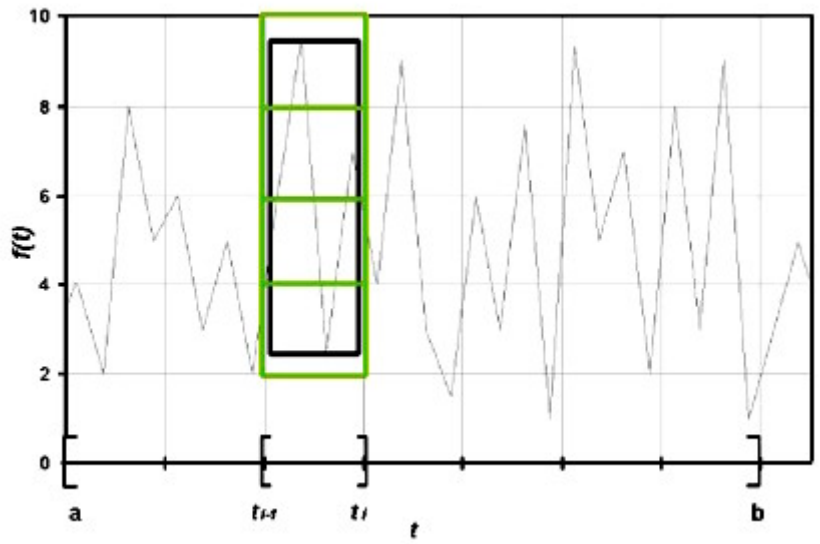

Figura 20 – Cobertura mínima da função f(t) com retângulos de base δ e sua relação com a cobertura celular. [Fonte: DUBOVIKOV et al, 2004]

Logo, a área mínima de cobertura será:

$$S_\mu(\delta) = \sum_{i=1}^{m} S_i(\delta) = \sum_{i=1}^{m} A_i(\delta)\delta \,, \tag{3.17}$$

e no limite $\delta \to 0$ a equação anterior satisfaz a relação:

$$S(\delta) \sim \delta^{2-D} \tag{3.18}$$

onde *D*=1. Quando *f(t)* apresenta um comportamento fractal podemos definir a dimensão de cobertura mínima D_μ através da relação [DUBOVIKOV et al, 2004]:

$$S_\mu(\delta) \sim \delta^{2-D_\mu} \,. \tag{3.19}$$

no limite $\delta \to 0$, onde $D_\mu > 1$. Desta relação podemos escrever:

$$V_f(\delta) \equiv \frac{S_\mu(\delta)}{\delta} = A_\mu \cdot \delta^{-\mu}, \tag{3.20}$$

onde μ dado por

$$\mu = D_\mu - 1, \tag{3.21}$$

é chamado *índice de variação,* sendo uma medida da fractalidade de *f(t)* .

Uma vez que *H = 2-D*, para processos gaussianos estocásticos, *μ* pode ser relacionado à *H* através da expressão:

$$H = 1 - \mu. \tag{3.22}$$

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais e corpos de prova

Foram analisados doze corpos de prova, confeccionados de chapas de aço AISI 1020, com 20mm de espessura, 300mm de comprimento, chanfro em V com 50º de inclinação, distância de aproximadamente 2mm na raiz e soldados por processo de eletrodo revestido. Os diferentes tipos de defeitos, como falta de fusão (FF), falta de penetração (FP) e porosidades (PO), foram inseridos em todos os doze corpos de prova durante o processo de soldagem, gerando padrões de defeitos. A posição, o tipo e a dimensão de cada um dos defeitos inseridos foram determinados através de ensaio ultra-sônico convencional e radiográfico. A confecção dos corpos de prova, bem como os ensaios ultra-sônicos e radiográficos foram realizados por Moura (2003).

Características das 12 juntas soldadas inspecionadas:

- Juntas de topo em placas de aço.
- Metal de base: aço AISI 1020.
- Espessura: 20 mm.
- Comprimento: 300 mm.

Processo de soldagem:

- Passe de raiz: eletrodo revestido.
- Enchimento: eletrodo revestido.

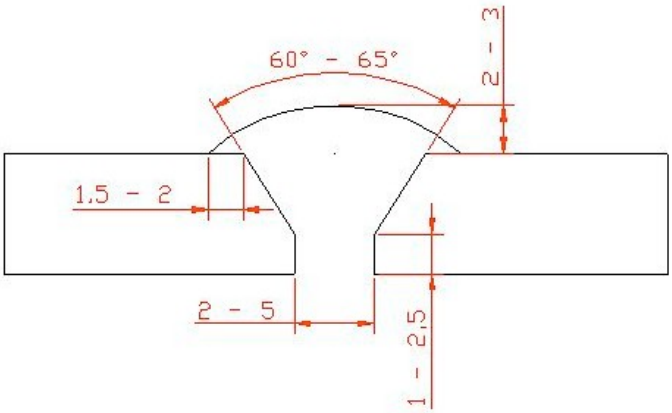

Figura 21 – Desenho esquemático da junta soldada. [Fonte: MOURA, 2003]

5.2 Equipamentos

Um sistema de inspeção composto por um veículo (Robô), responsável por transportar os transdutores ultra-sônicos e garantir o melhor contato possível entre os transdutores e a região a ser inspecionada, foi projetado munido de rodas magnéticas que lhe permite inspecionar dutos, chapas e estruturas ferromagnéticas em geral, em todas as posições, inclusive sobre-cabeça.[MOURA, 2003]

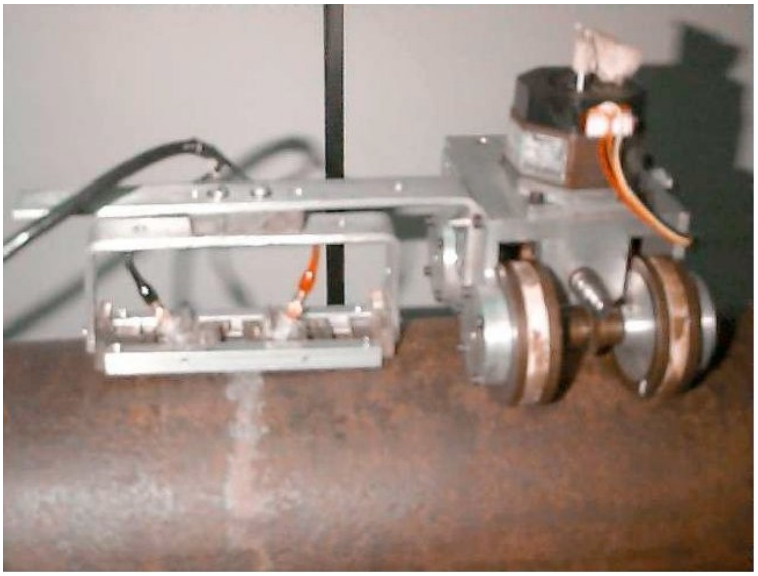

Figura 22 – Carro de inspeção (robô) utilizado nos ensaios ultra-sônicos.

Os transdutores são do tipo normal de onda longitudinal, marca KRATKRÄMER, 6 mm de diâmetro, modelo MSW/QC/PC, com freqüência central de

5 MHz. Para a obtenção de ondas longitudinais nos ângulos desejados foi utilizado um par de sapatas para ondas longitudinais com ângulo de incidência de 60º no aço.

Figura 23 – Transdutores normais de onda longitudinal Krautkrämer e sapatas. Fonte: [KRAUTKRÄMER GMBH & CO.OHG, 2001]

O aparelho de ultra-som convencional de fabricação KARL DEUTSCH, modelo ECHOGRAPH 1080 conectado a uma placa conversora A/D Gagescope CS – Lite, fabricada pela Gage Applied – Sciences.

5.3 Metodologia

5.3.1 Ensaio

O robô e o aparelho de ultra-som foram conectados a um microcomputador controlado por um programa desenvolvido pelo Laboratório de Ensaios não-Destrutivos – LABOEND – PEMM/COPPE/UFRJ, de nome comercial US-TOFD, que é responsável pelo controle da posição dos transdutores e armazenagem dos sinais A-scan, cada um contendo 512 pontos, capturados pelo aparelho de ultra-som, a uma taxa de amostragem de 100 MHz, durante o deslocamento lateral do par de transdutores (a cada 1 mm) ao longo da solda, e que foram posteriormente utilizados na construção das imagens ultra-sônicas (D-scan) (ver figura 24). Todos os ensaios foram realizados por Moura (2003).

Figura 24 – Sistema de Inspeção por Ultra-som utilizando o método TOFD. Fonte: [TESSER, 2004]

A próxima figura reúne, para efeito de comparação, imagens obtidas durante inspeções radiográfica e ultra-sônica por TOFD em uma mesma região de solda em aço. A imagem radiográfica digitalizada não sofreu qualquer processamento de imagem. Pode-se visualizar que o mesmo defeito está presente em ambas às imagens.

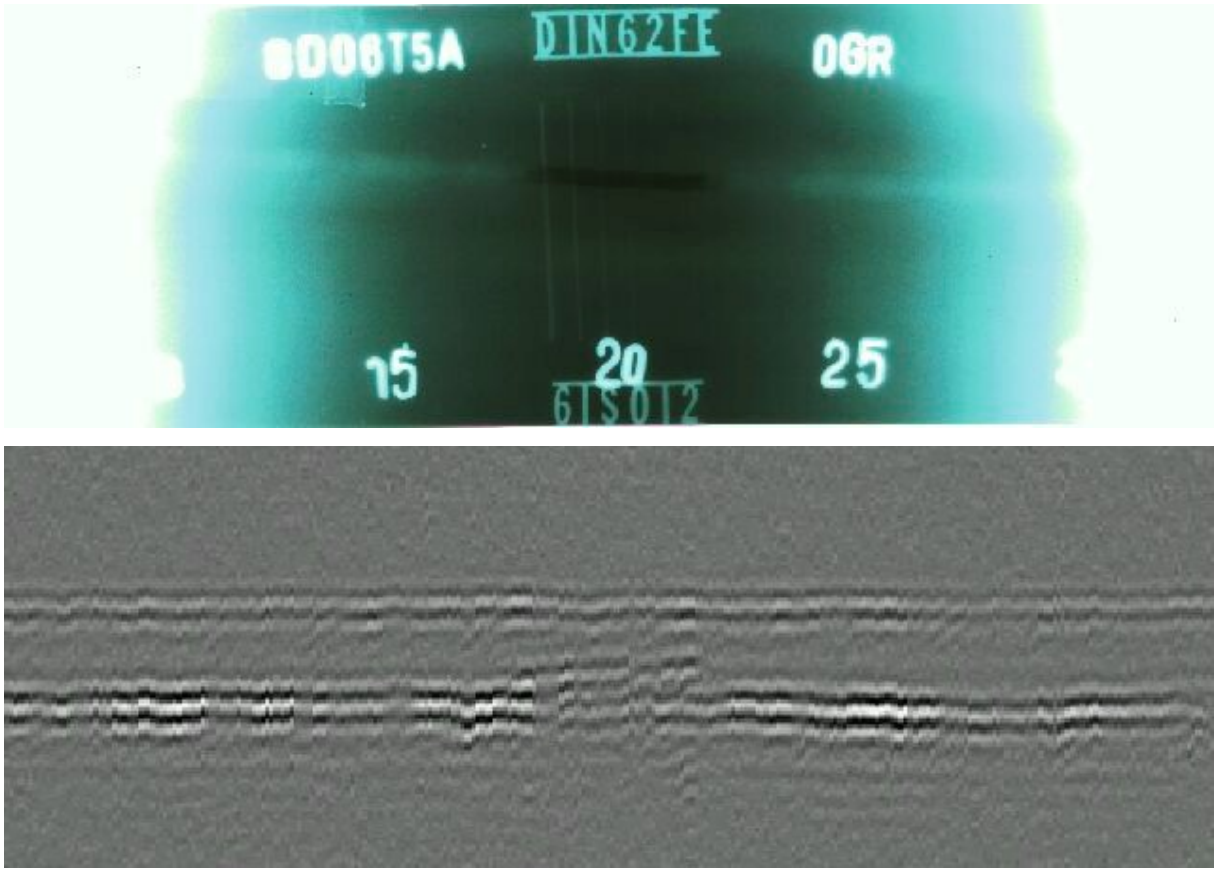

Figura 25 – Radiografia e D-scan obtido por TOFD em uma mesma região da solda. Fonte: [MOURA, 2003].

5.3.2 Aquisição dos sinais

Através das imagens D-scan obtidas após a inspeção ultra-sônica por TOFD dos doze corpos de prova, e utilizando o resultado das radiografias como gabarito, um total de 240 sinais (A-scan), igualmente divididos entre cada uma das quatro classes – falta de fusão (FF), falta de penetração (FP), porosidade (PO) e uma classe de sinal que não apresenta defeitos (SD) – foram selecionados para os diferentes métodos de tratamento e análise dos sinais. Cada sinal é armazenado em um arquivo com extensão DAT, totalizando, portanto, 240 arquivos com extensão DAT [Moura, 2003].

5.3.3 Tratamento e Análises dos sinais

Antes de proceder com a análise dos sinais foi necessário aplicar tratamentos nos sinais que consistiram de:

- Retirada da média dos sinais: para centralizar a mediana do sinal no valor zero. Foi utilizado um programa na linguagem Fortran para o processamento dos dados (ver figuras 26 e 27).

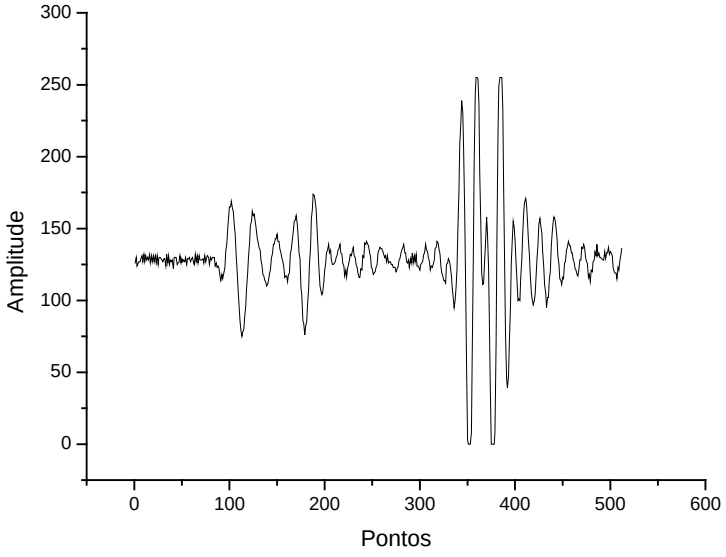

Figura 26 – Sinal A-scan original obtido do aparelho de ultra-som. Fonte: [MOURA, 2003]

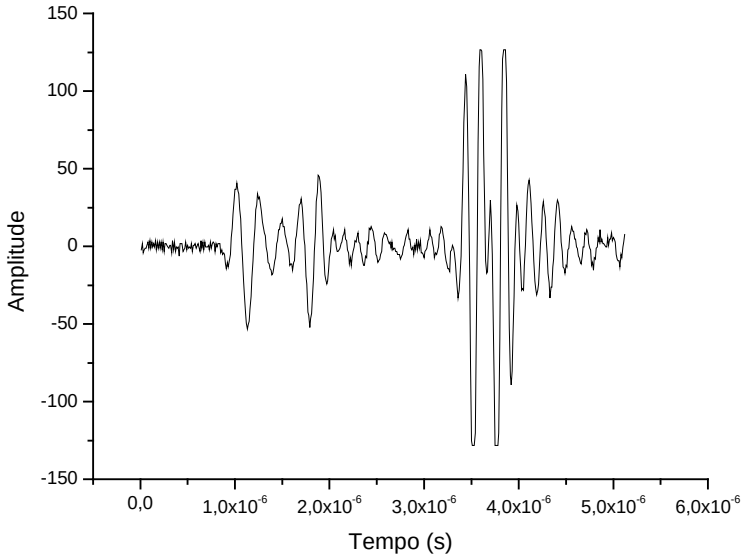

Figura 27 – Mesmo sinal da figura 26, após retirada da média do sinal.

- Filtragem passa-banda: com o objetivo de eliminar os ruídos que estivessem fora da faixa de freqüência máxima e mínima do transdutor. A faixa utilizada foi de 2,5 MHz a 7,5 MHz e foi realizada com o auxílio do software Origin 6.0 (ver figura 28).

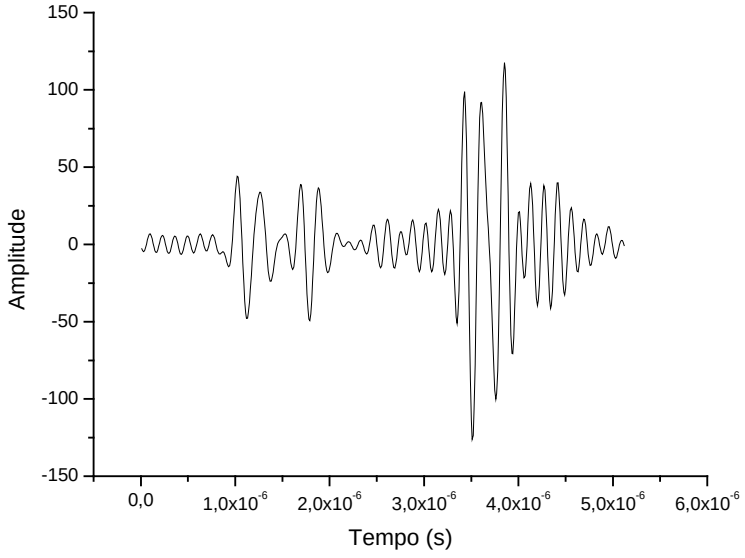

Figura 28 – Mesmo sinal da figura 27 após filtragem passa-banda de 2,5-7,5 MHz.

- Alisamento: foi empregado o filtro Savitzky-Golay [Moura, 2003] na busca de uma maior eliminação de ruídos e para calcular a evoltória do sinal, para esse procedimento foi necessário usar o sinal retificado (ver figura 29). Utilizou-se polinômio de 6º grau e 25 pontos no software Origin 6.0 (ver figura 30) que também foi utilizado para retificar os sinais.

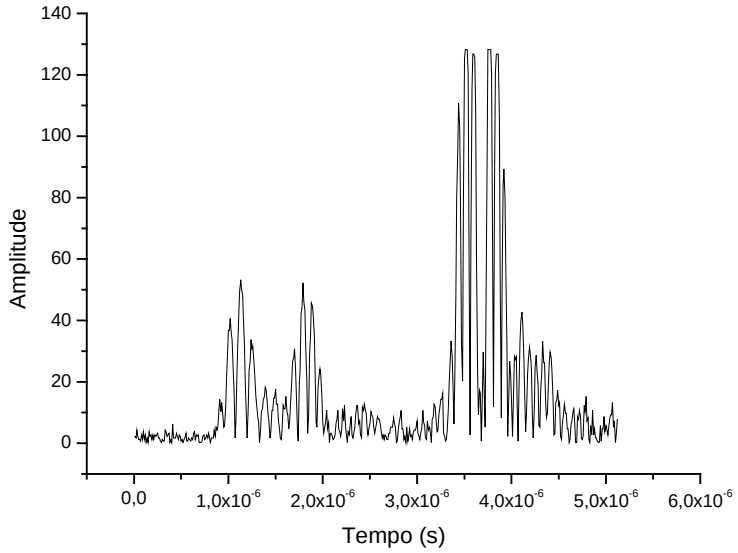

Figura 29 – Mesmo sinal da figura 27 retificado.

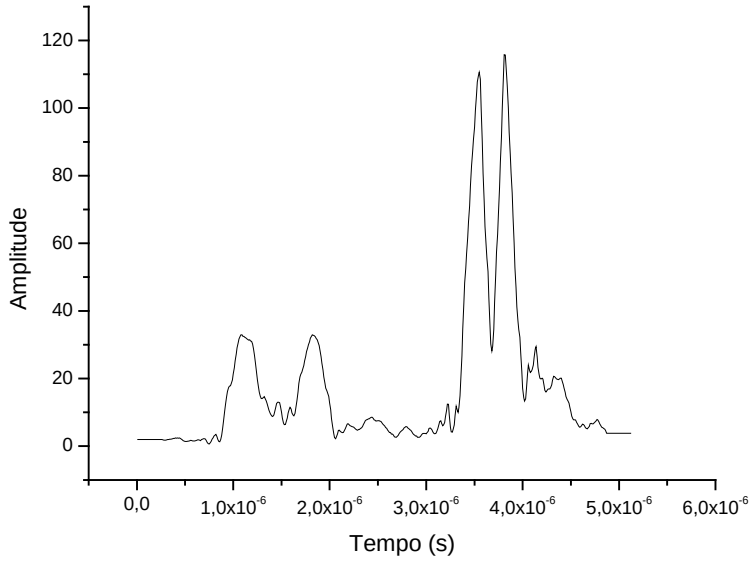

Figura 30 – Mesmo sinal da figura 29 após alisamento com filtro Savitzky-Golay.

- Normalização: com o objetivo de tornar equivalentes sinais que por acaso tenham sido obtidos com ganhos diferentes durante o ensaio (ver figura 31 e 32). Sendo também utilizado um programa em Fortran.

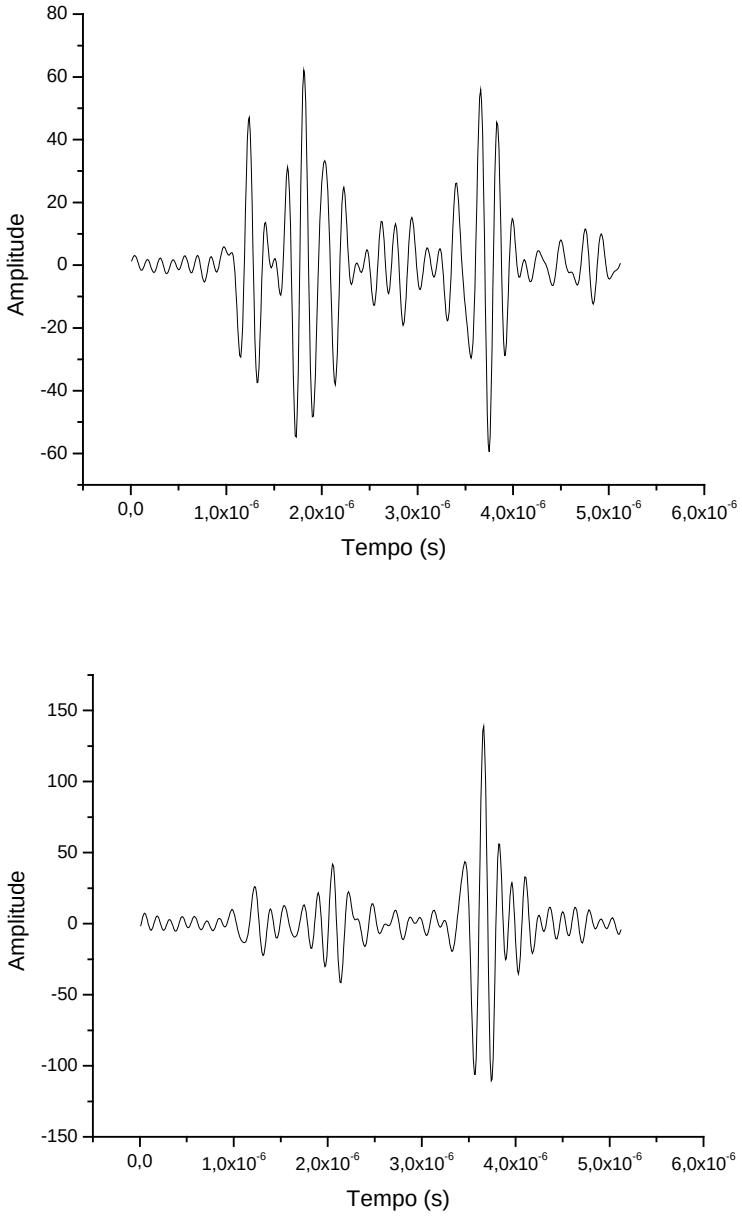

Figura 31 – Sinais de Falta de Penetração filtrados, onde se vê claramente no eixo da amplitude que foram adquiridos com ganho diferente.

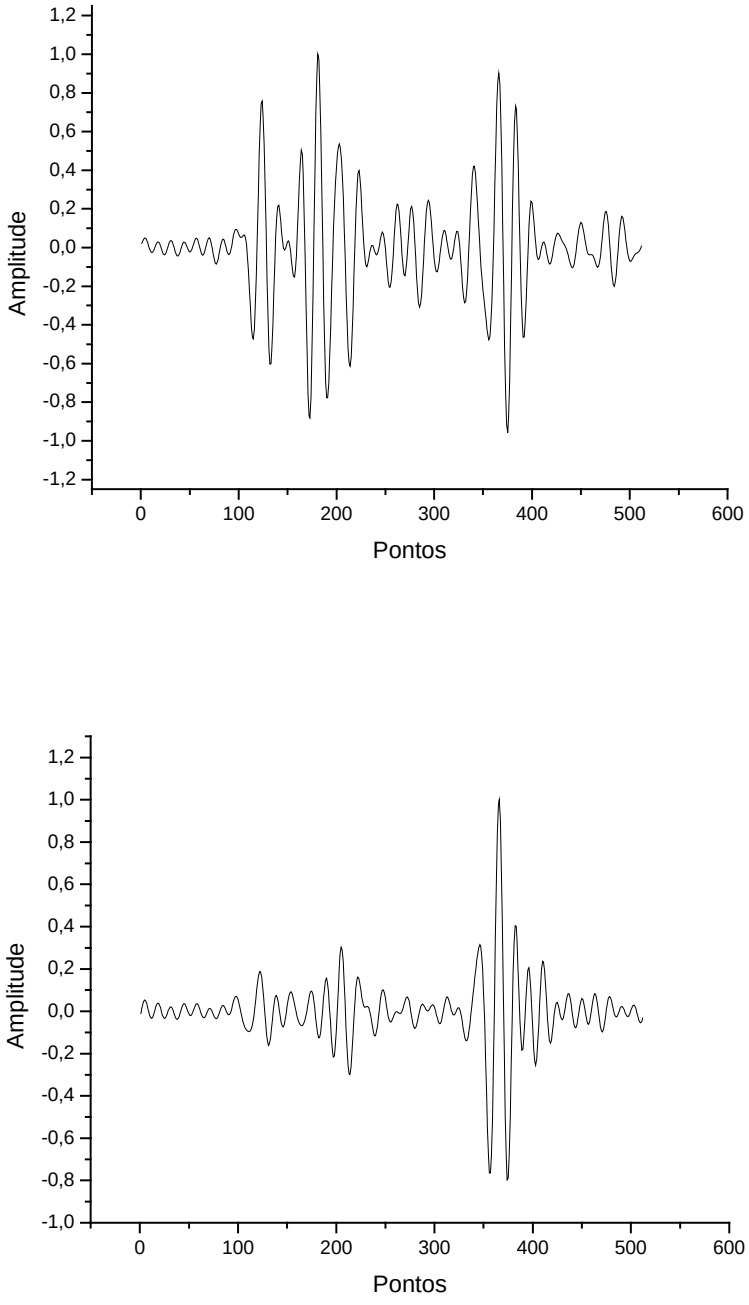

Figura 32 – Mesmos sinais de Falta de Penetração filtrados da figura 31, agora normalizados com amplitude variando numa mesma faixa de ganho: -1 a 1.

Foram efetuados três tipos de tratamento diferentes: o primeiro foi realizado com todos os 240 sinais e utilizou-se apenas a filtragem passa-banda, no segundo realizou-se concatenações de 4 sinais de 512 pontos, com uma rotina criada no programa MatLab, totalizando 15 sinais de 2048 pontos cada para cada classe de onde foram utilizados 10 sinais de cada uma; o terceiro tipo de tratamento

empregou-se o alisamento Savitzky-Golay em 10 sinais de 512 pontos de cada classe (falta de fusão, falta de penetração, porosidade e sem defeito).

Os três tipos de tratamento seguiram a seguinte seqüência:

- Tratamento 1: sinal original → retirada da média → filtragem passa-banda → normalização → análise do sinal.
- Tratamento 2: sinais originais → concatenação do sinais → retirada da média → filtragem passa-banda → normalização → análise do sinal.
- Tratamento 3: sinal original → retirada da média → retificação do sinal → alisamento Savitzky-Golay → normalização → análise do sinal.

Tanto nos tratamentos como nas análises dos sinais foram utilizados os seguintes softwares e programas:

- Fortran: utilizado para executar os algoritmos dos programas *R/S*, DFA e cobertura mínima.
- Software Origin 6.0
    a) Utilizado para traçar as curvas dos cálculos da análise de Hurst, da análise de flutuação sem tendências e da análise de cobertura mínima;
    b) Para se obter a regressão linear das curvas citadas acima, com os referidos logaritmo da amplitude, expoente crítico, coeficiente de ajuste linear e os erros relativos percentuais;
    c) Para se obter os desvios-padrões dos sinais e;
    d) Para traçar os gráficos comparativos de logaritmos das amplitudes e expoentes críticos das curvas com respectivas barras de erro;
    e) Para realizar a filtragem passa-banda, o alisamento Savitzky-Golay e a retificação do sinal.
- Microsoft Excel 2000: utilizado na construção das tabelas do logaritmo da amplitude e do expoente crítico de cada análise para o cálculo dos desvios-padrões, média e variância do logaritmo da amplitude e expoente crítico para cada tipo de defeito, e cálculo do critério de Chauvenet para cada um;

- MatLab 6.0: utilizado na concatenação dos sinais de 512 pontos, transformando-os em sinais de 2048 pontos.

Todos os códigos dos programas do Processador Fortran Microsoft 4.0 e MatLab encontram-se no apêndice.

5.3.3.1 Critério de Chauvenet

Ao analisarmos um conjunto de dados resultado de uma série de medidas, é comum verificar-se valores muito diferenciados. As causas da ocorrência de tais dados são diversas: avaliação equivocada da indicação, erro na registro dos dados, medida mau executada, etc. Como esses valores parecem não pertencer à amostra, eles devem ser eliminados. Porém deve ser feita uma análise criteriosa para se ter certeza de que não há explicação plausível para sua permanência na série. Uma ferramenta bastante usada para decidir a eliminação de dados é o "CRITÉRIO DE CHAUVENET" [ALVES et al, 2003].

Sendo $\overline{X}$ definido como a média das medidas, e *S(X)* o desvio-padrão, o critério de Chauvenet estabelece que uma medida x_i deve ser descartada se o valor de *r* calculado na equação:

$$r = \frac{\left|x_i - \overline{X}\right|}{S(X)}, \tag{4.1}$$

for maior ou igual a 2. Para aplicar o presente critério, os valores de $\overline{X}$ e *S(X)* devem ser calculados utilizando-se todos os dados da amostra incluindo os dados passíveis de serem eliminados. Se ocorrerem eliminações tanto a média quanto o desvio-padrão devem ser recalculados, agora sem os termos eliminados. Pode-se aplicar novamente o critério, para que se tenha uma redução no desvio-padrão caso este ainda esteja elevado [ALVES et al, 2003].

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Introdução

Os resultados do presente trabalho serão apresentados, para cada tipo de tratamento, da seguinte forma: gráficos das curvas das análises mostrando a região de escala escolhida para cada uma e a forma das curvas; tabelas do logaritmo da amplitude e expoente crítico de cada sinal, para cada tipo de defeito e análise mostrando o descarte pelo critério de Chauvenet; gráficos confrontando logaritmo da amplitude e expoente crítico, expoente crítico e desvio-padrão do sinal tratado; gráficos mostrando os expoentes críticos das análises entre si.

6.2 Análises *R/S*, Flutuação Sem Tendências e Cobertura Mínima

Nas figuras 33 a 68 são apresentadas as regressões lineares correspondentes às análises *R/*S, DFA e dimensão de cobertura mínima de um sinal referente a cada tipo de defeito e tratamento. Nos diferentes diagramas são mostrados os valores dos expoentes críticos (expoentes de Hurst – *H,* expoente de escala α e o índice de variação μ), os logaritmos das amplitudes (A_H, A_α, A_μ), os coeficientes de ajuste linear (R) e os erros relativos aos logaritmos das amplitudes e expoentes críticos.

Na análise *R/*S foram escolhidas duas regiões para os tratamentos 1 e 2, onde se apresenta um “crossover” entre os regimes de curtos e longos tempos, o tratamento 3 apresentou apenas uma região de escala. Na análise de DFA foram observados dois regimes para os tratamentos 1 e 2, não sendo, no entanto, considerado o segundo regime uma vez que o expoente foi igual a zero; o tratamento 3 apresentou apenas uma região de escala. No caso da análise de cobertura mínima onde se obteve duas regiões com inclinações opostas para os três tipos de tratamento, a região escolhida foi a que o índice de variação μ forneceu valor positivo, região crescente da curva.

Os sinais serão designados da seguinte maneira:

- FF01 a FF60 – sinais de falta de fusão.
- FP01 a FP60 – sinais de falta de penetração.
- PO01 a PO60 – sinais de porosidade.
- SD01 a SD60 – sinais da categoria sem defeito.

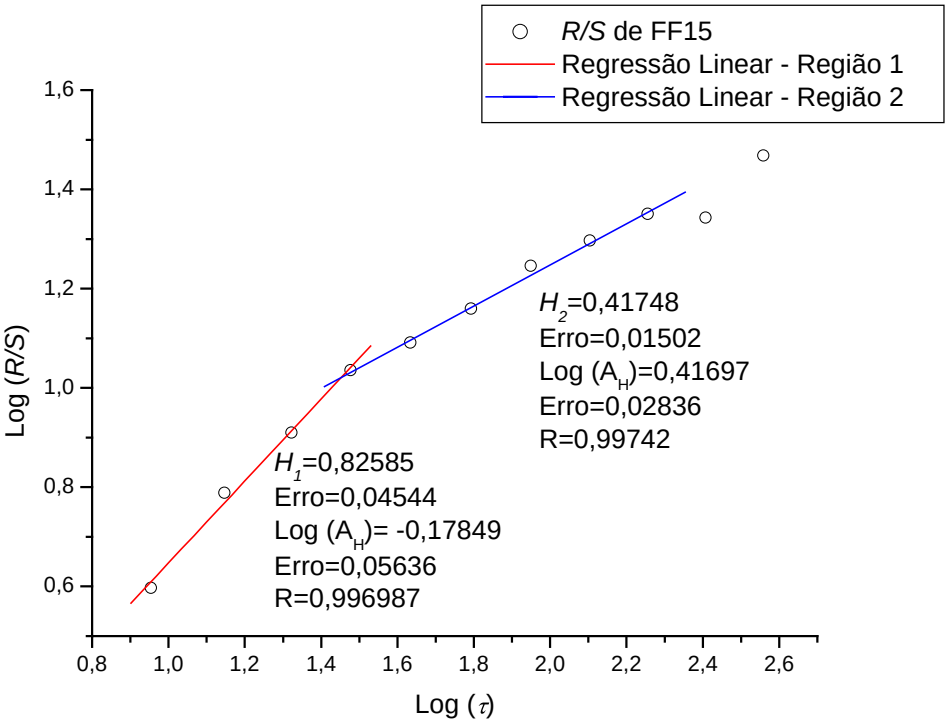

Figura 33 – Análise R/S do sinal FF15 – Tratamento 1.

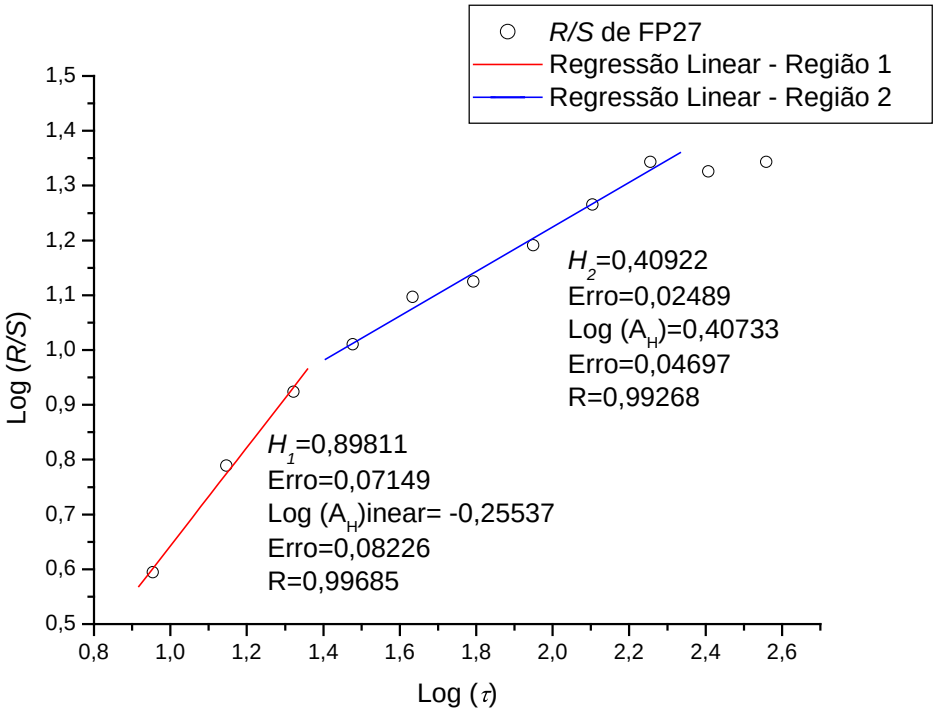

Figura 34 – Análise R/S do sinal FP27 – Tratamento 1.

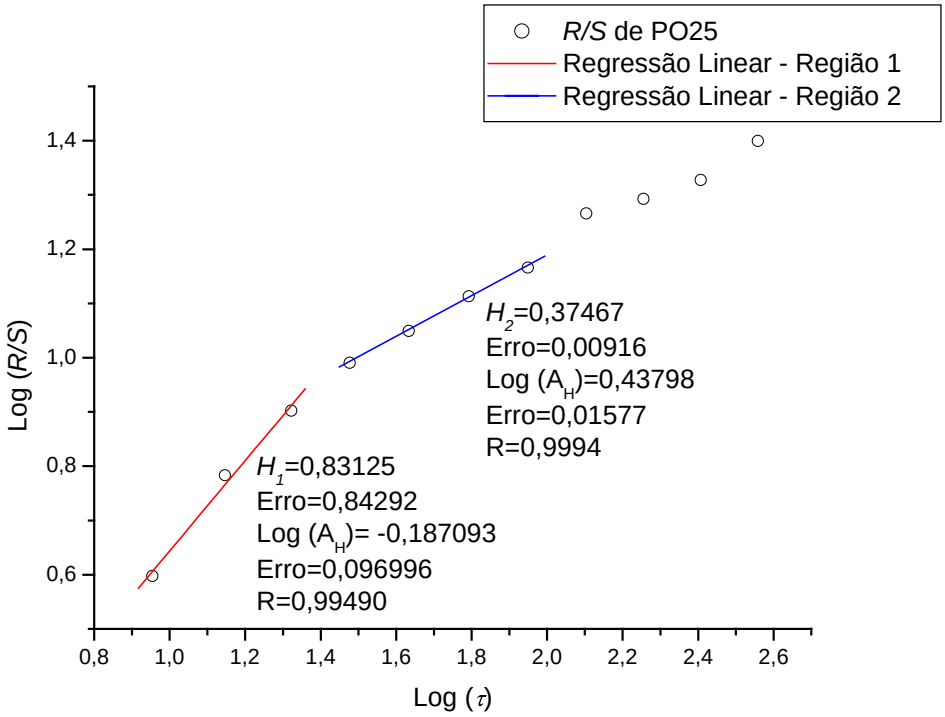

Figura 35 – Análise R/S do sinal PO25 – Tratamento 1.

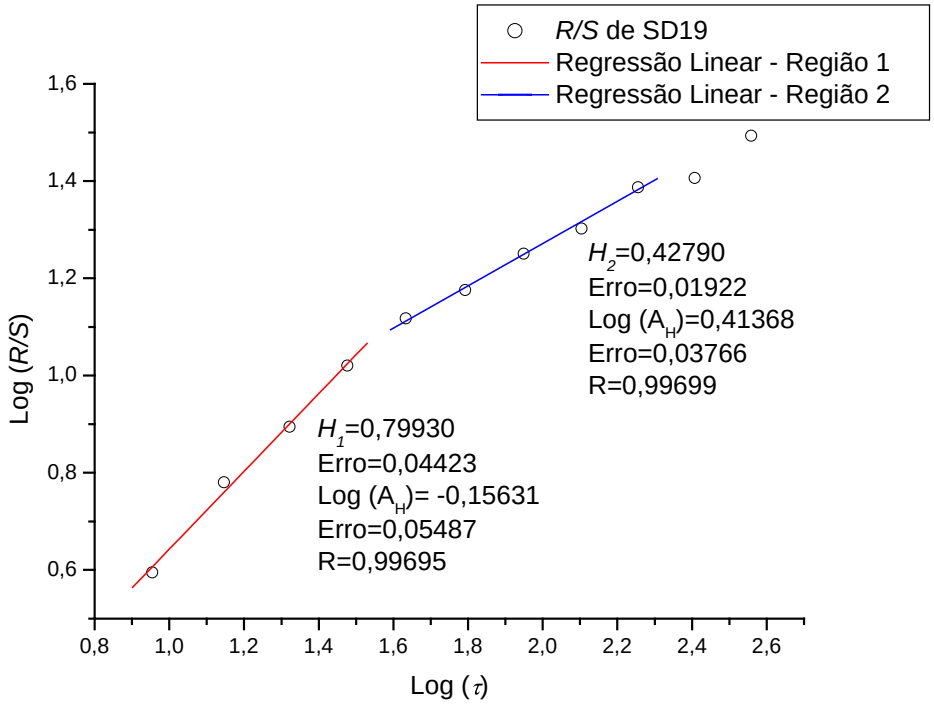

Figura 36 – Análise R/S do sinal SD19 – Tratamento 1.

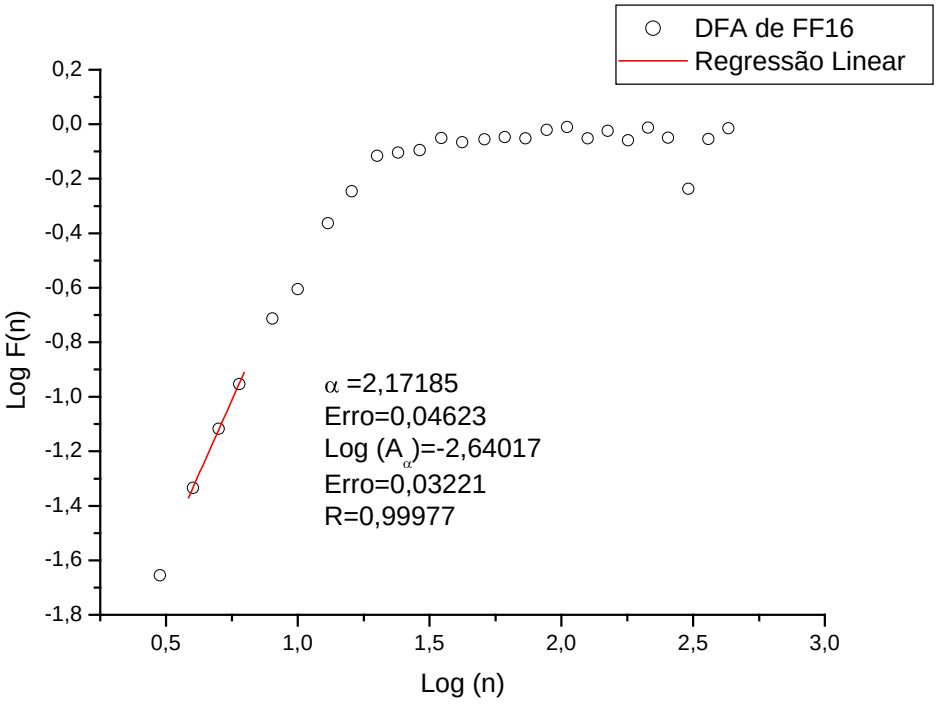

Figura 37 – DFA do sinal FF16 – Tratamento 1.

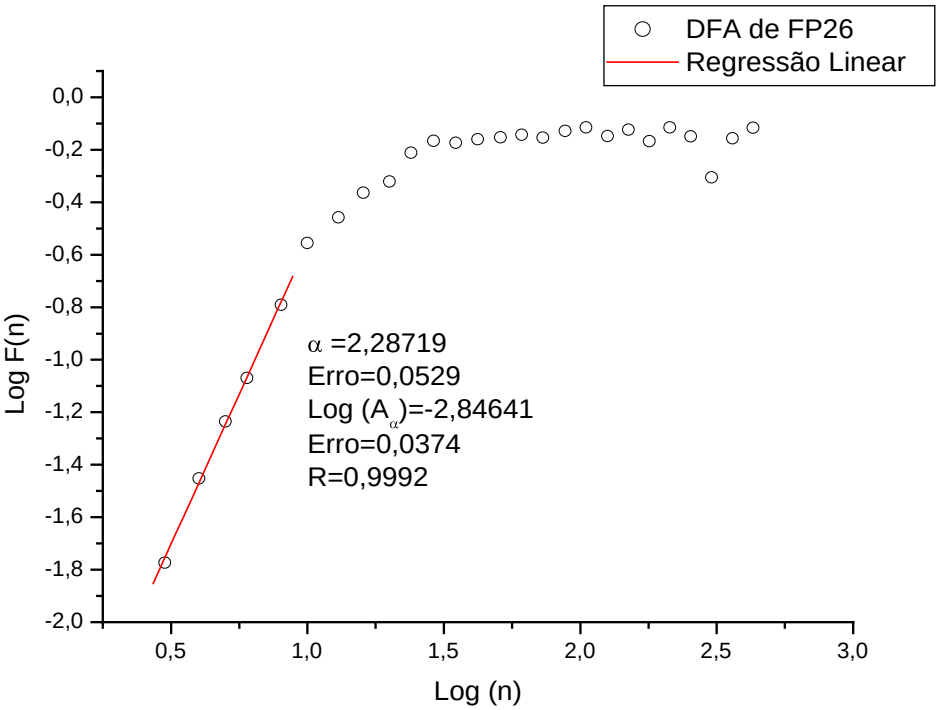

Figura 38 – DFA do sinal FP26 – Tratamento 1.

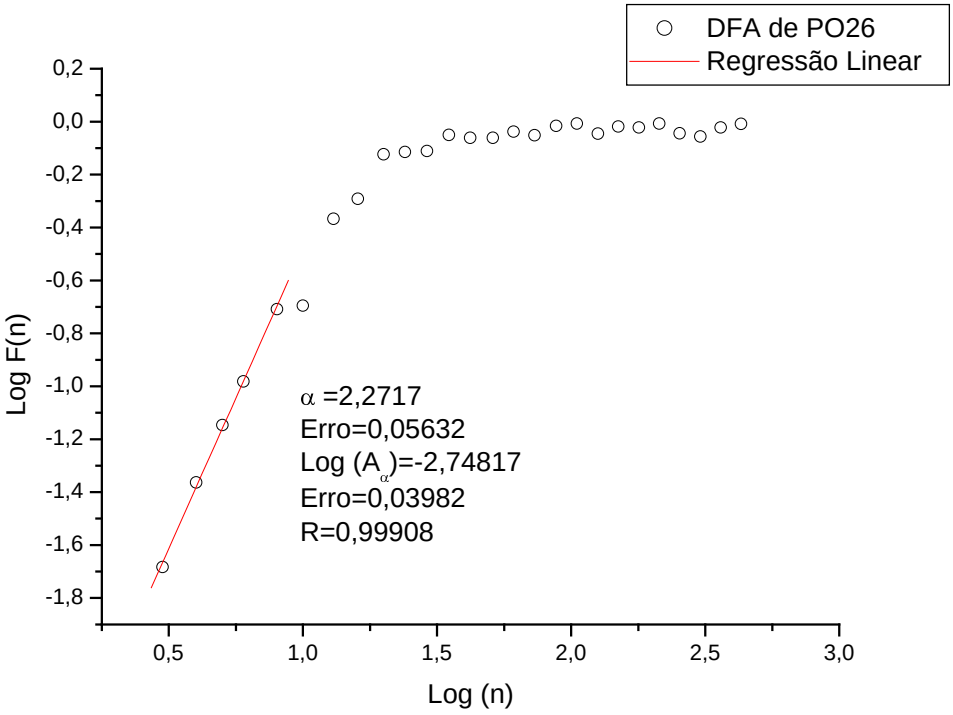

Figura 39 – DFA do sinal PO26 – Tratamento 1.

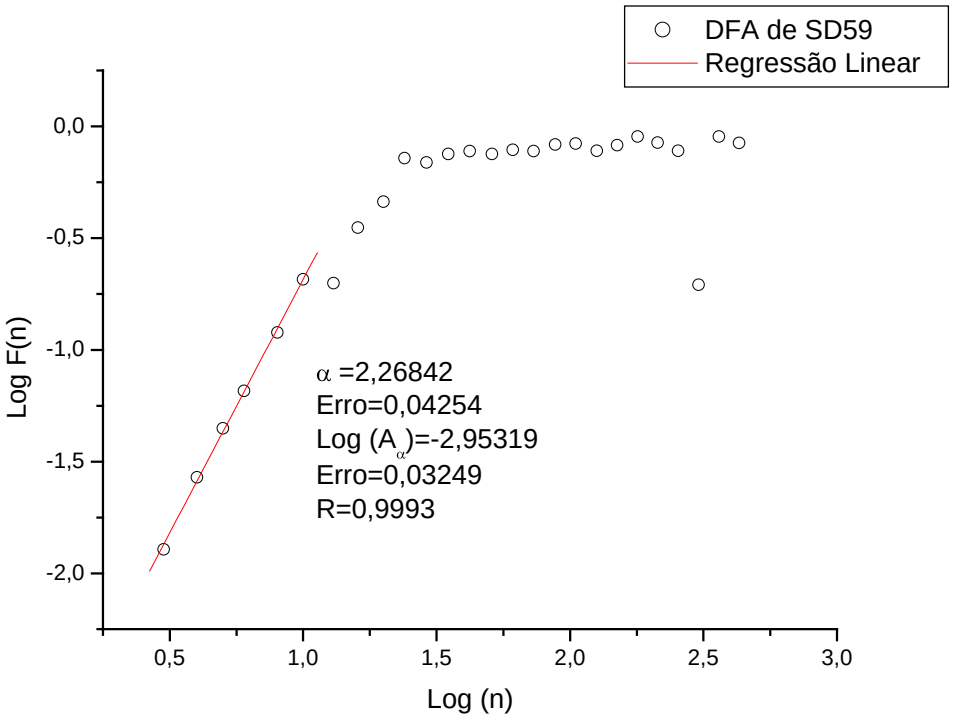

Figura 40 – DFA do sinal SD59 – Tratamento 1.

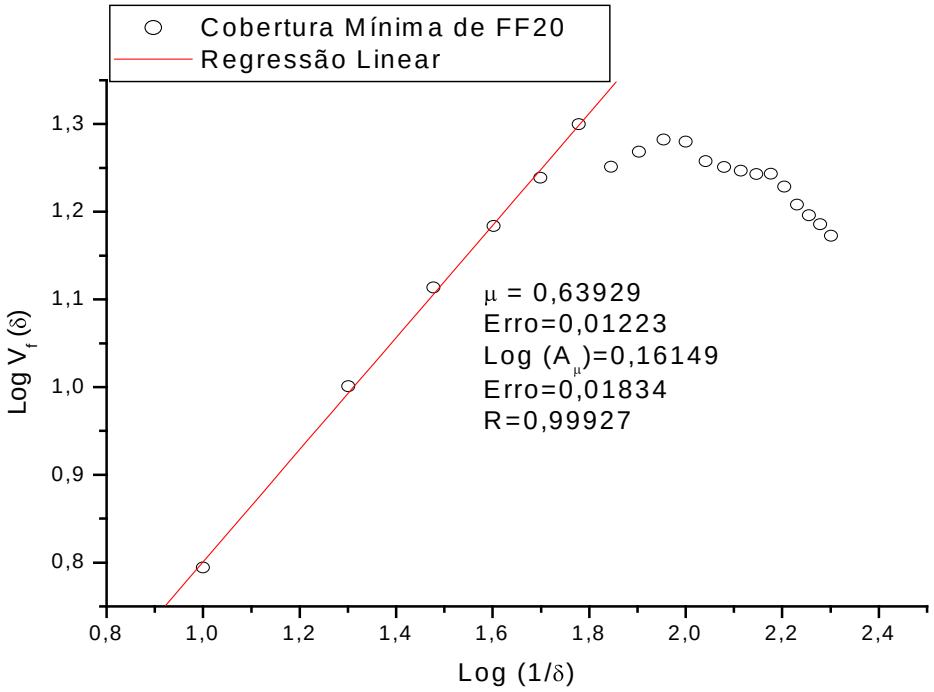

Figura 41 – Análise de Cobertura Mínima do sinal FF20 – Tratamento 1.

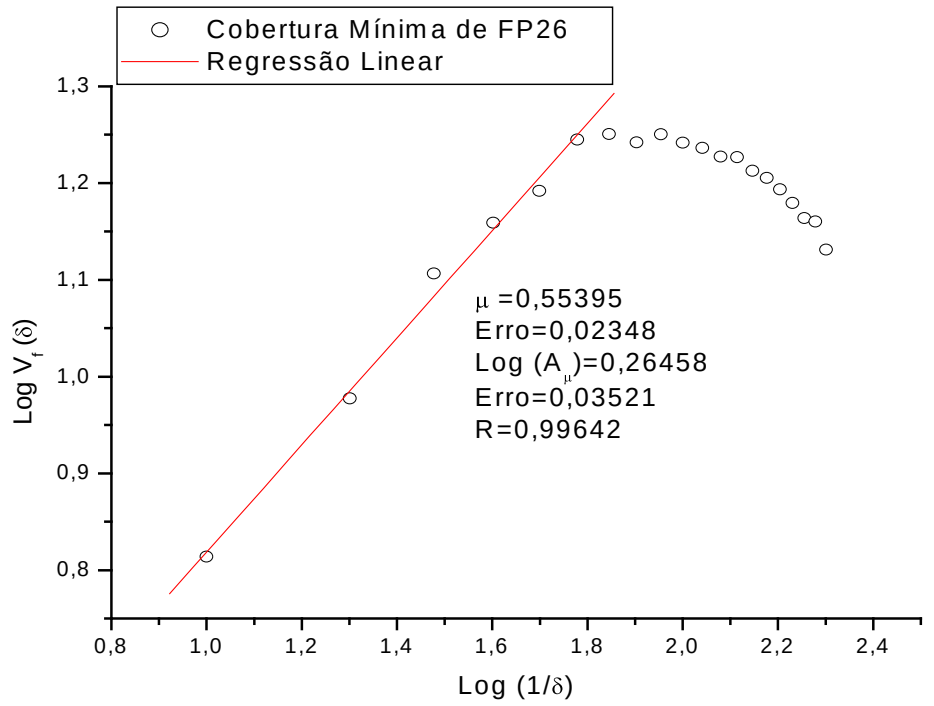

Figura 42 – Análise de Cobertura Mínima do sinal FP26 – Tratamento 1.

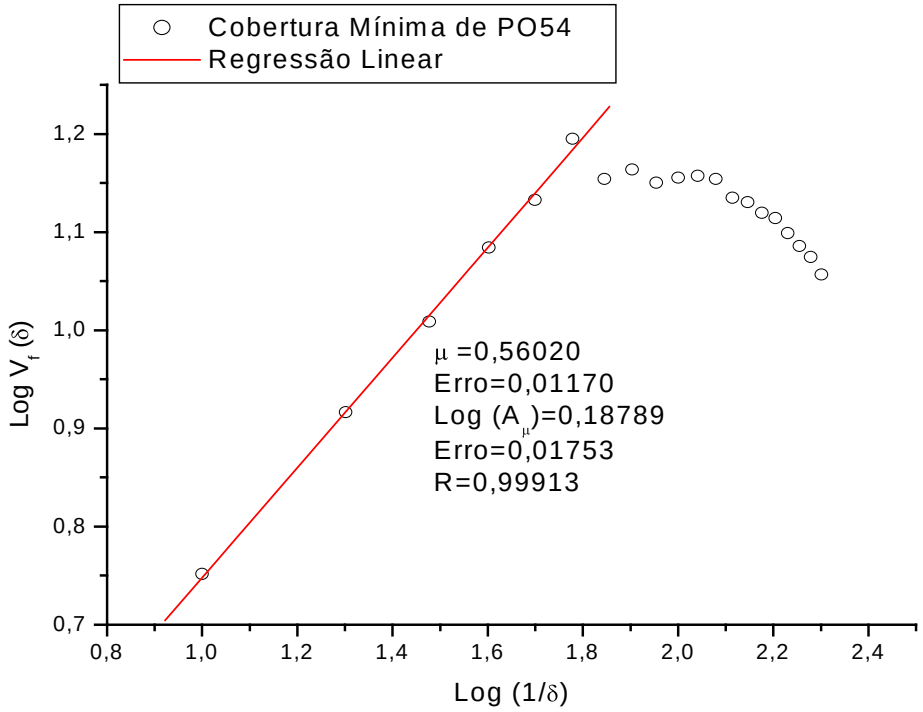

Figura 43 – Análise de Cobertura Mínima do sinal PO54 – Tratamento 1.

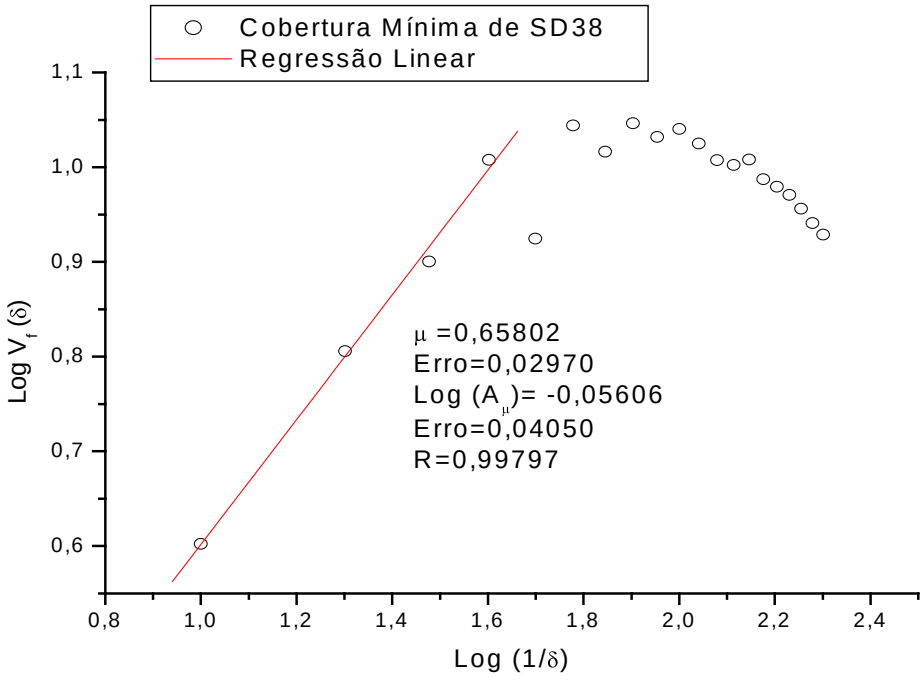

Figura 44 – Análise de Cobertura Mínima do sinal SD38 – Tratamento 1.

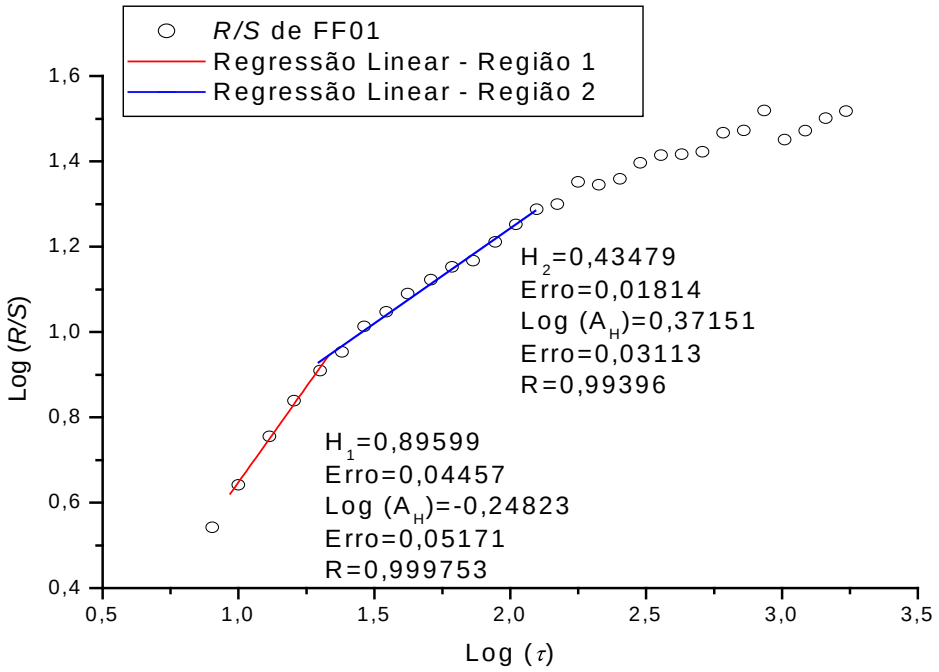

Figura 45 – Análise R/S do sinal FF01 – Tratamento 2.

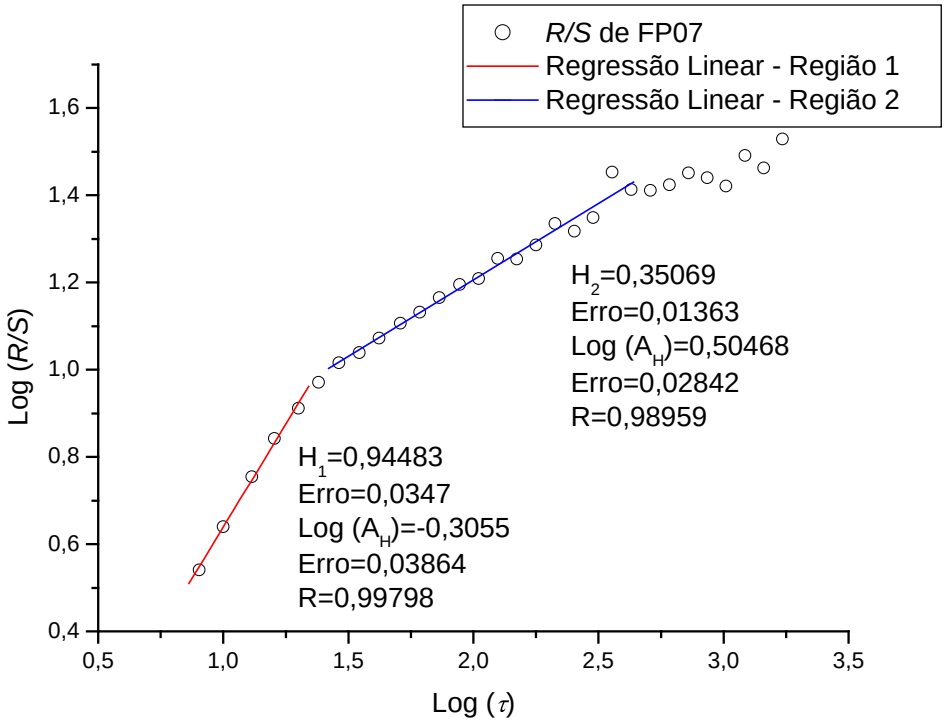

Figura 46 – Análise R/S do sinal FP07 – Tratamento 2.

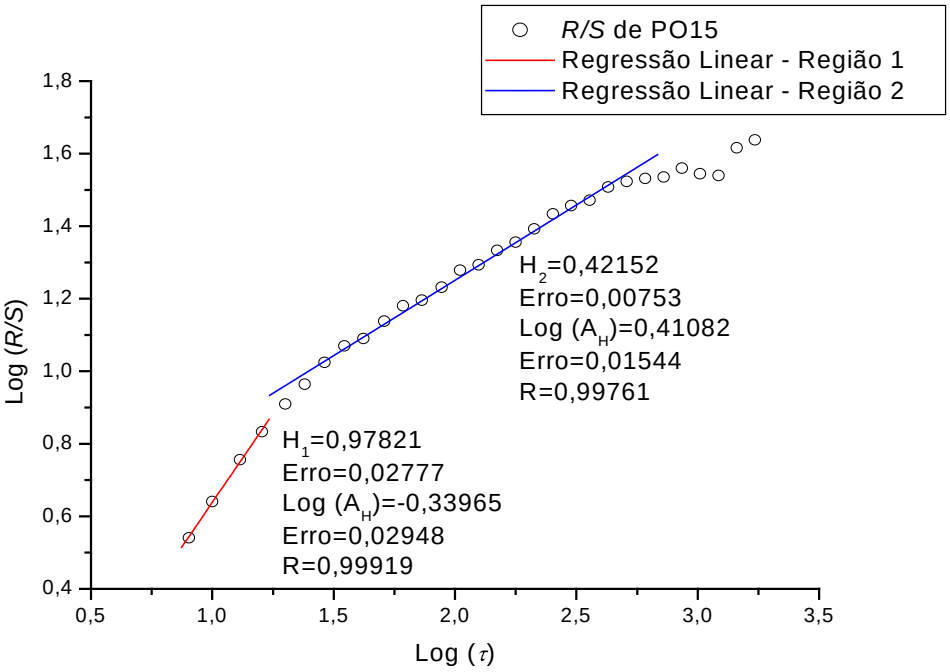

Figura 47 – Análise R/S do sinal PO15 – Tratamento 2.

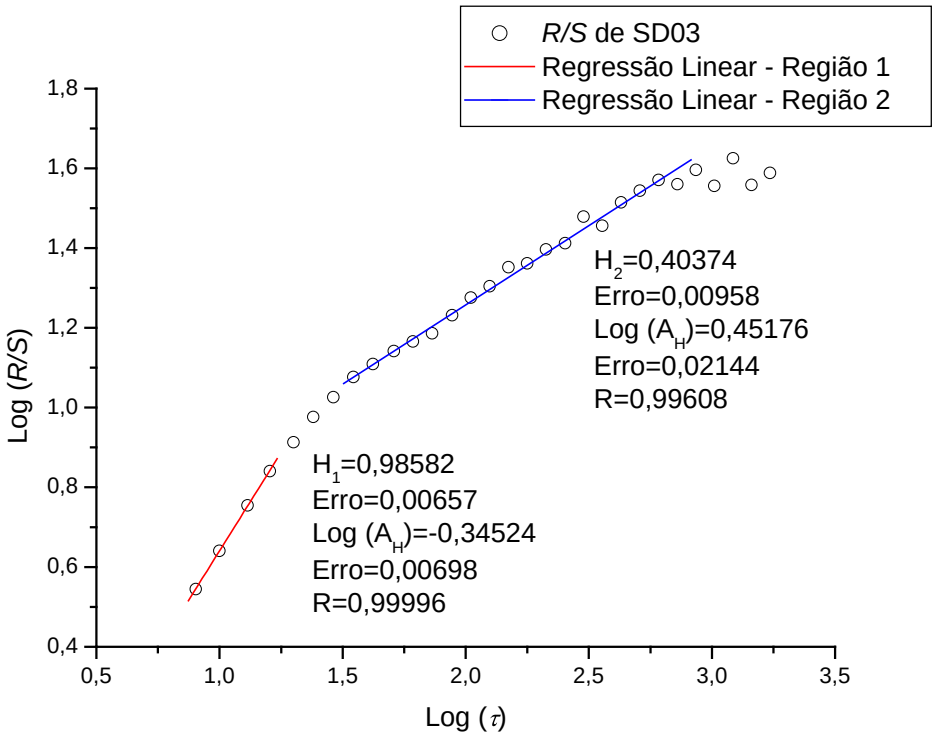

Figura 48 – Análise R/S do sinal SD03 – Tratamento 2.

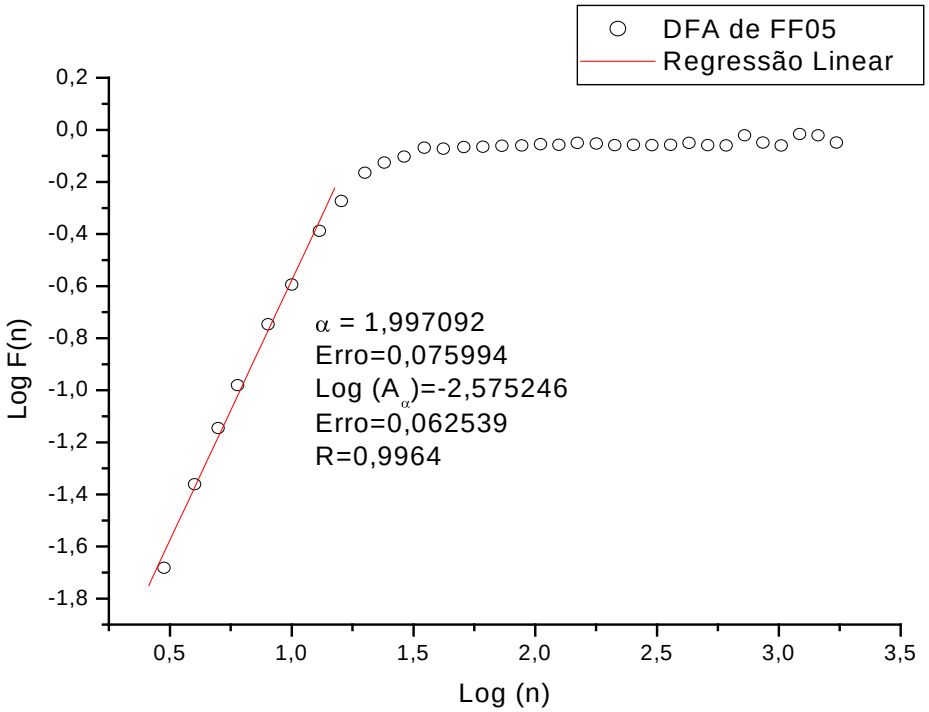

Figura 49 – DFA do sinal FF05 – Tratamento 2.

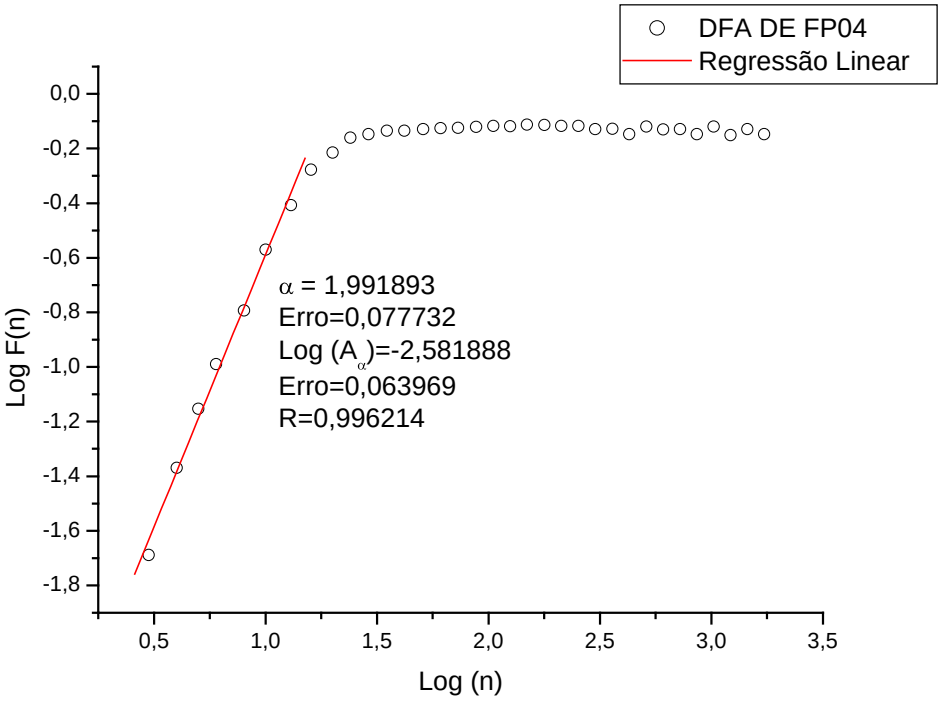

Figura 50 – DFA do sinal FP04 – Tratamento 2.

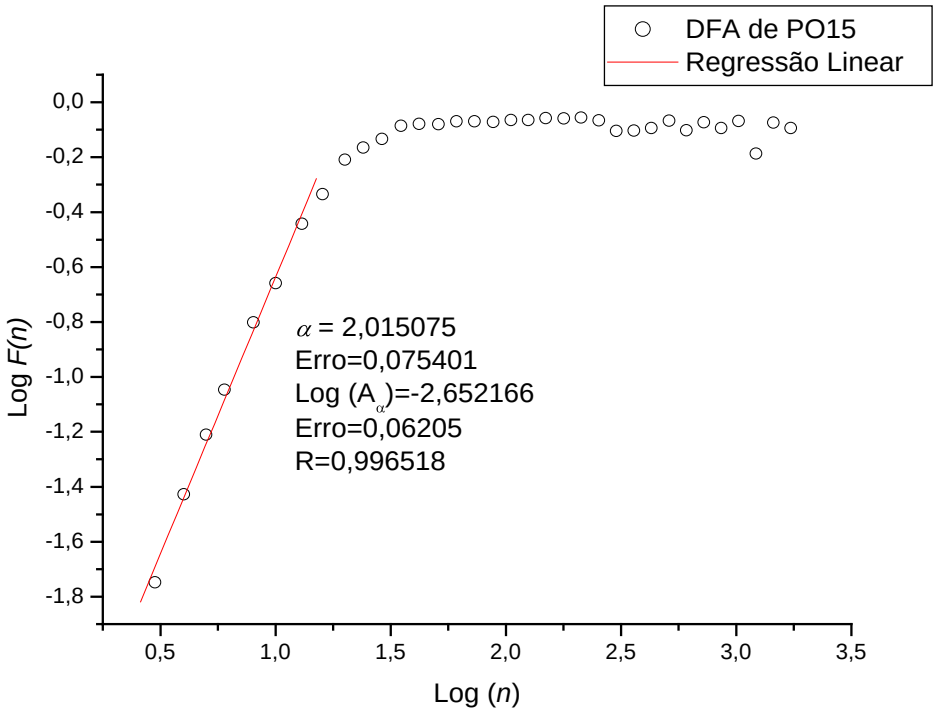

Figura 51 – DFA do sinal PO15 – Tratamento 2.

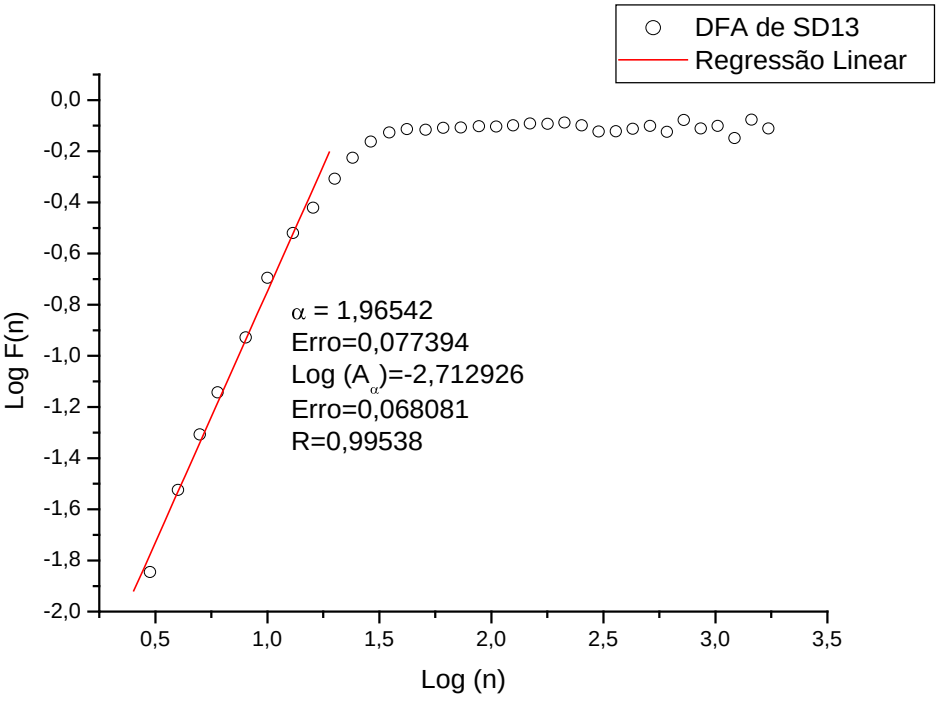

Figura 52 – DFA do sinal SD13 – Tratamento 2.

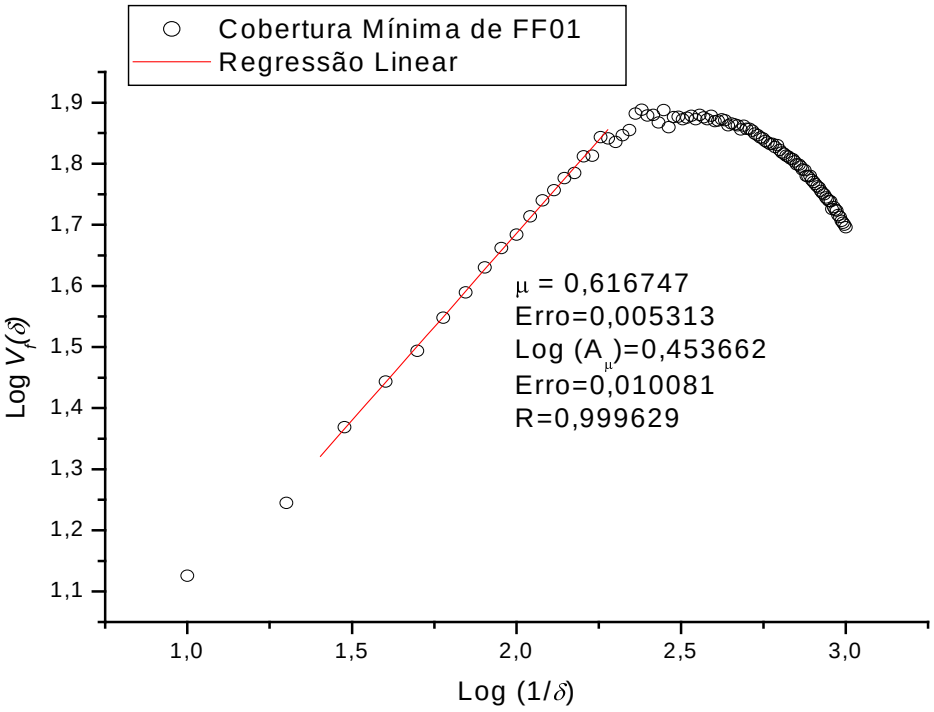

Figura 53 – Análise de Cobertura Mínima do sinal FF01 – Tratamento 2.

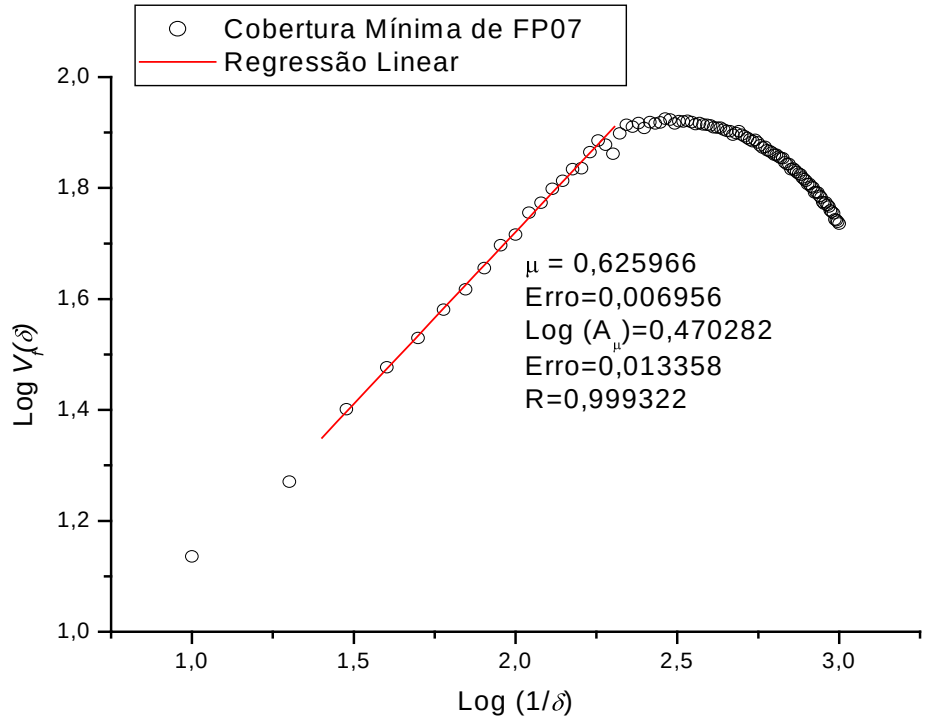

Figura 54 – Análise de Cobertura Mínima do sinal FP07 – Tratamento 2.

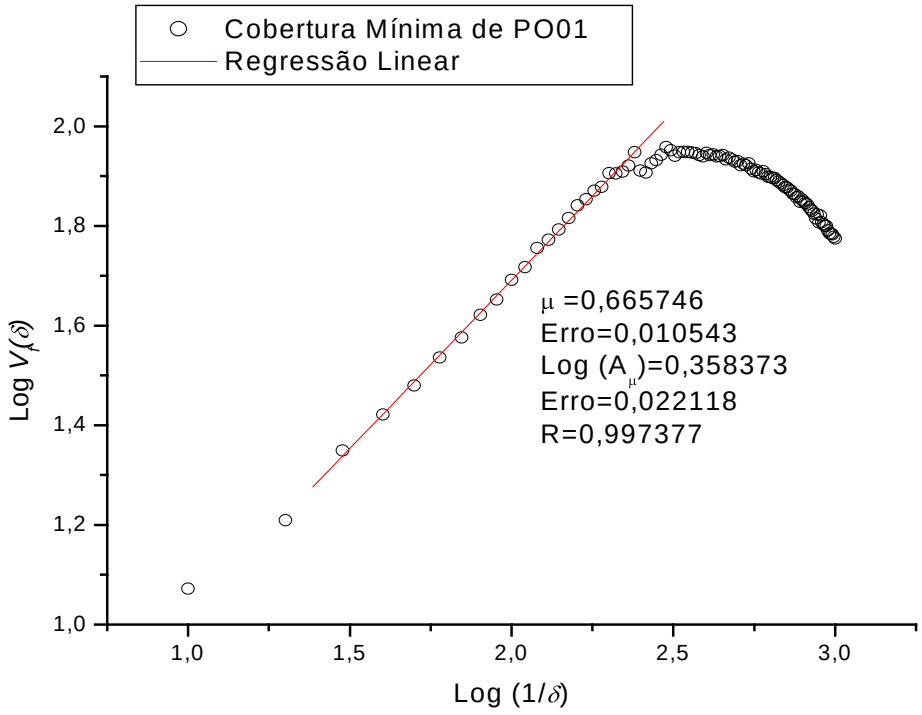

Figura 55 – Análise de Cobertura Mínima do sinal PO01 – Tratamento 2.

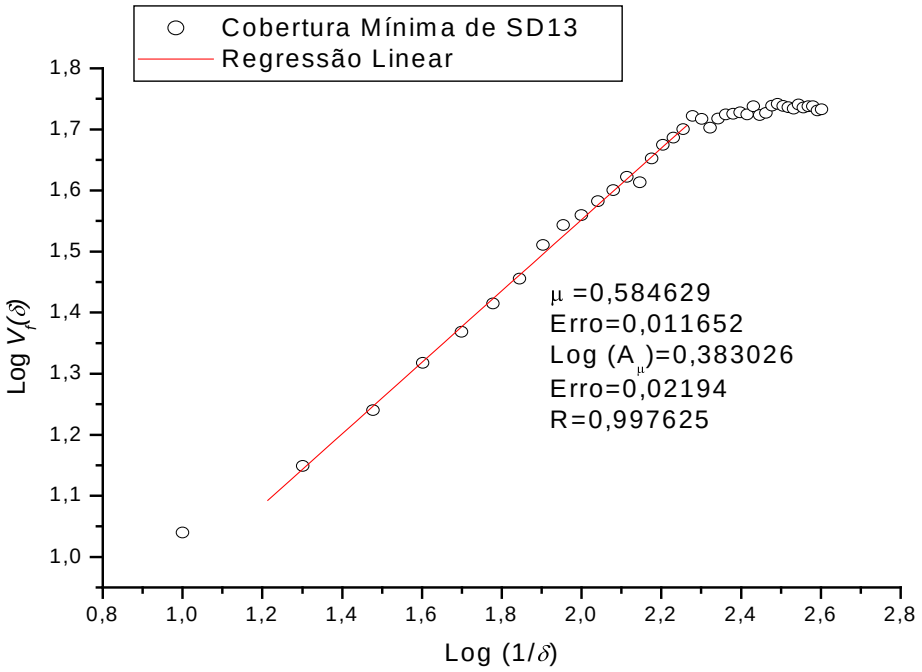

Figura 56 – Análise de Cobertura Mínima do sinal SD13 – Tratamento 2.

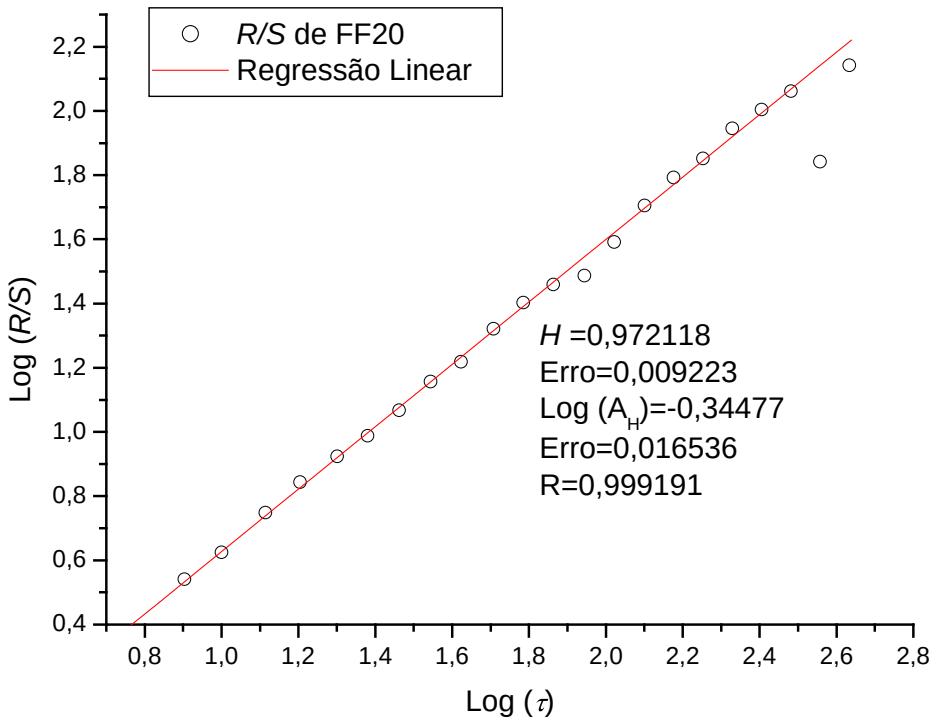

Figura 57 – Análise R/S do sinal FF20 – Tratamento 3.

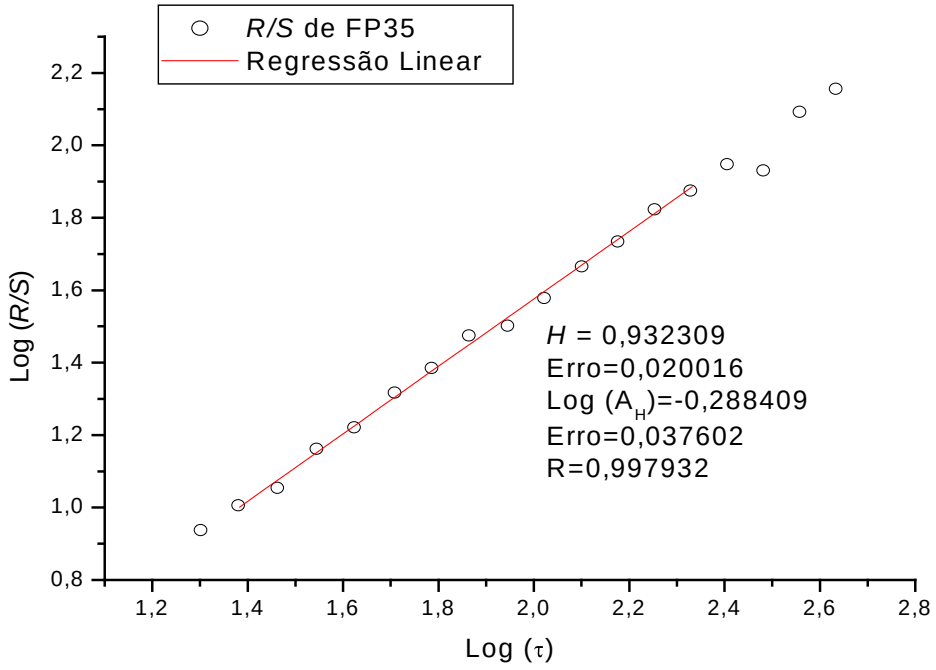

Figura 58 – Análise R/S do sinal FP35 – Tratamento 3.

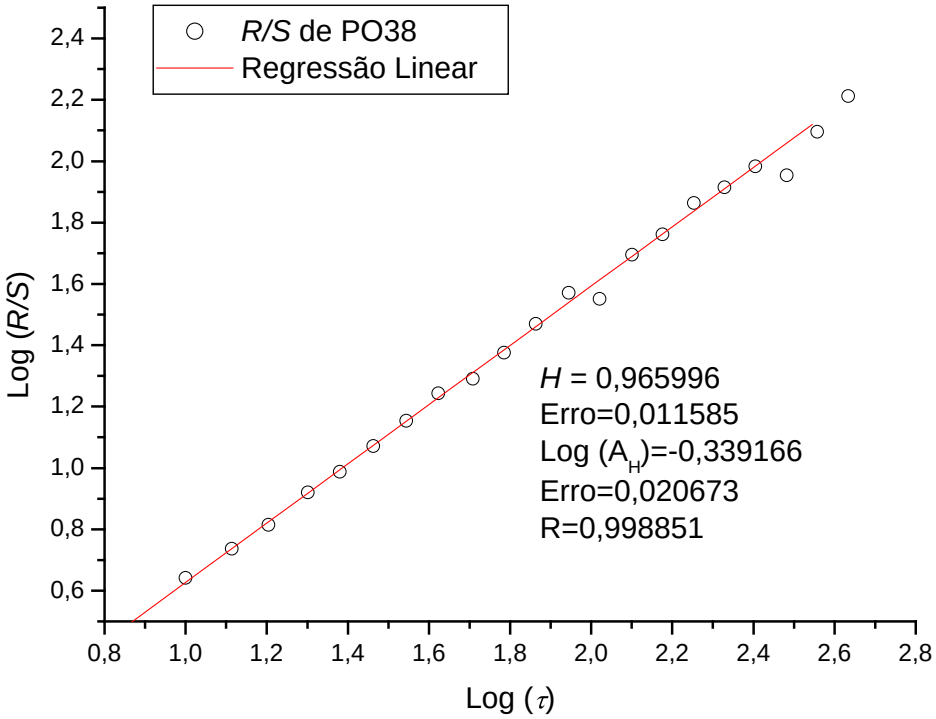

Figura 59 – Análise R/S do sinal PO38 – Tratamento 3.

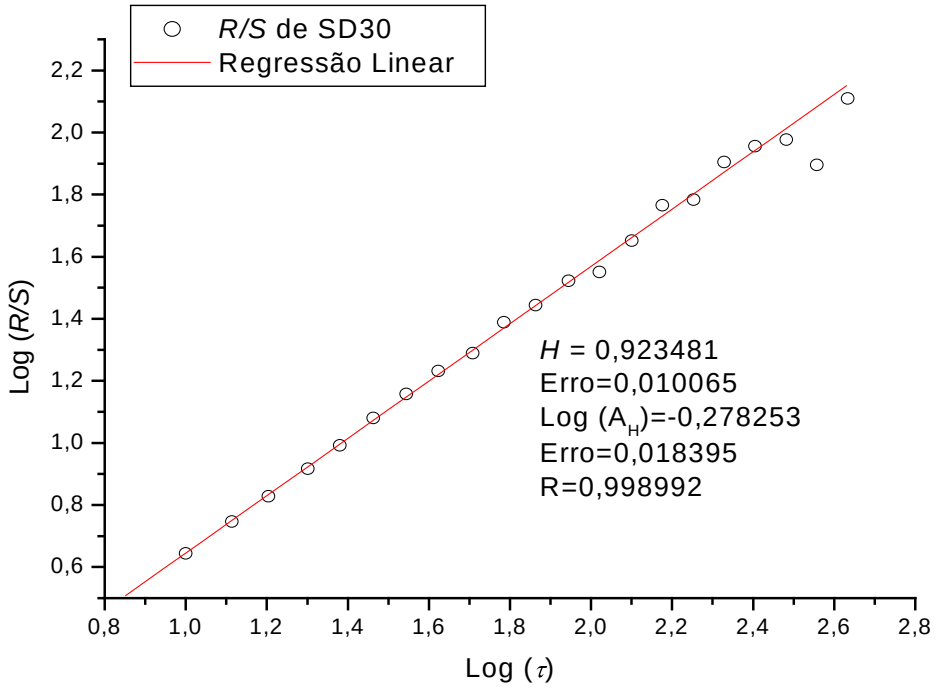

Figura 60 – Análise R/S do sinal SD30 – Tratamento 3.

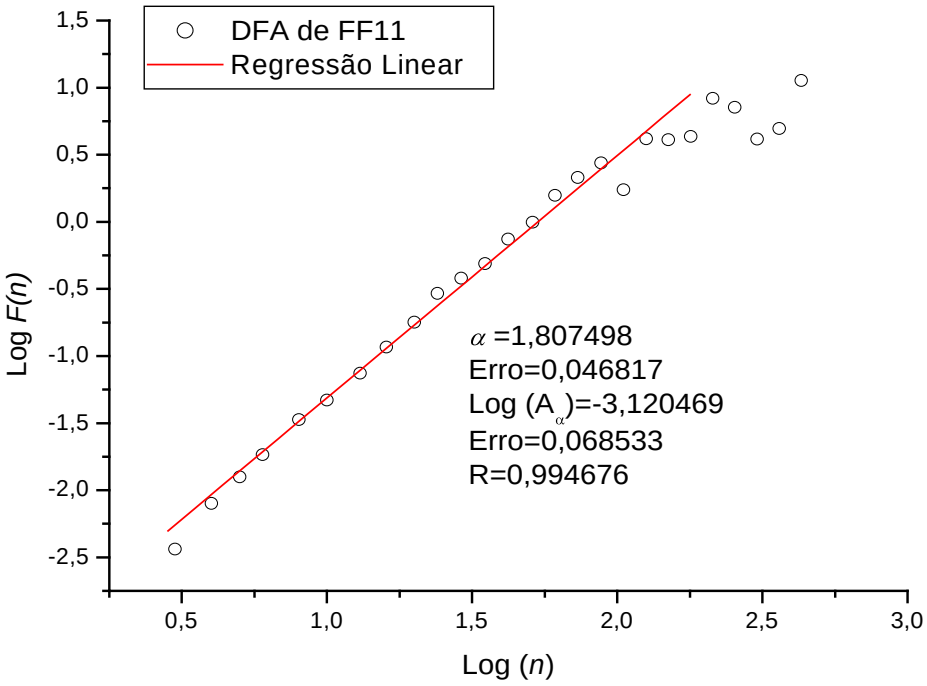

Figura 61 – DFA do sinal FF11 – Tratamento 3.

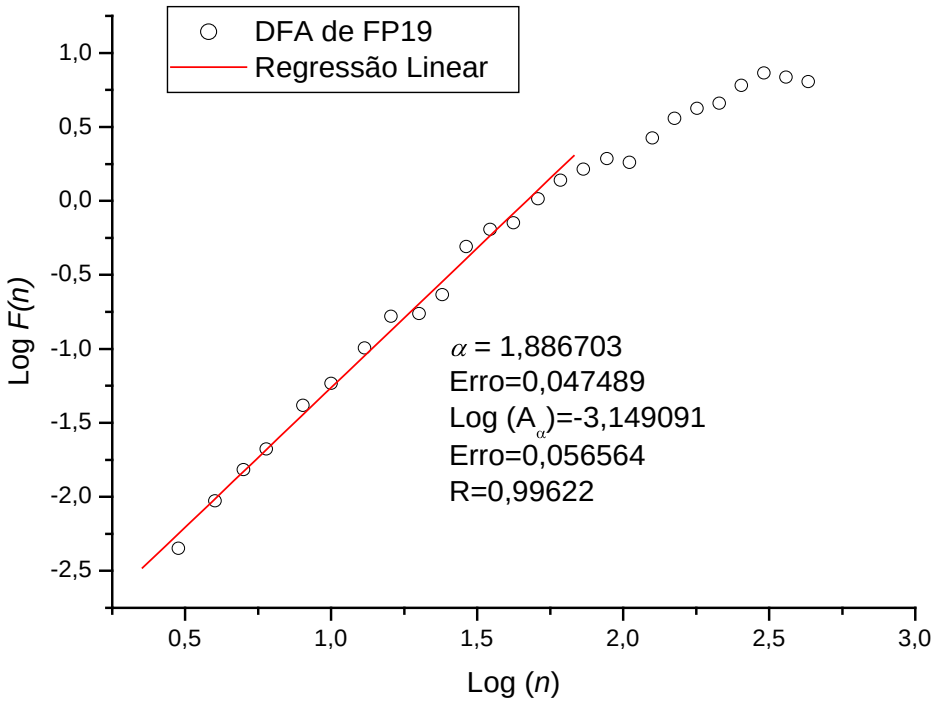

Figura 62 – DFA do sinal FP19 – Tratamento 3.

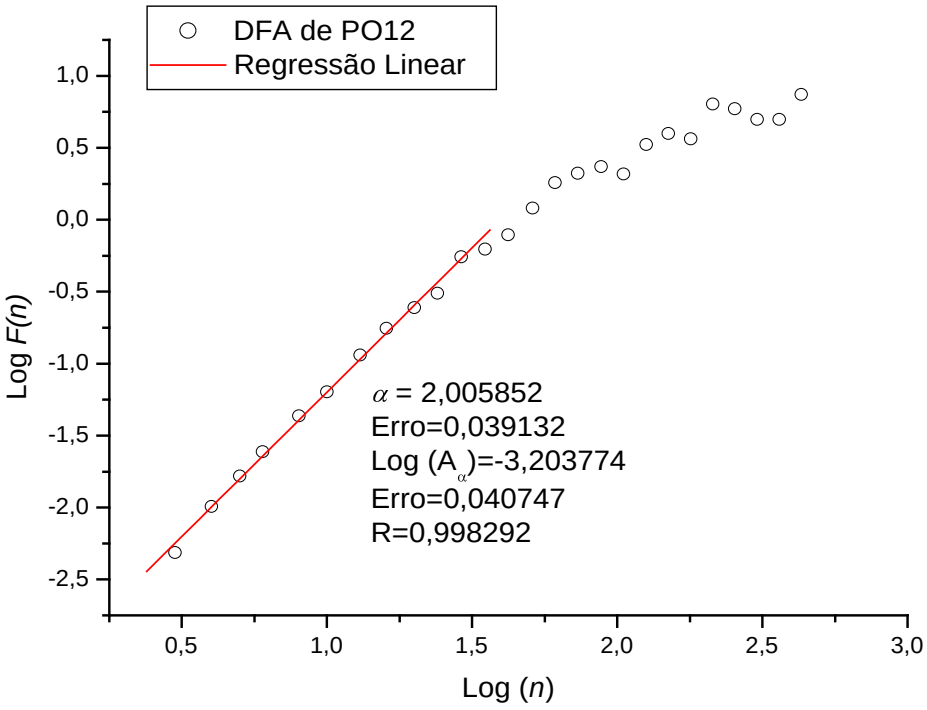

Figura 63 – DFA do sinal PO12 – Tratamento 3.

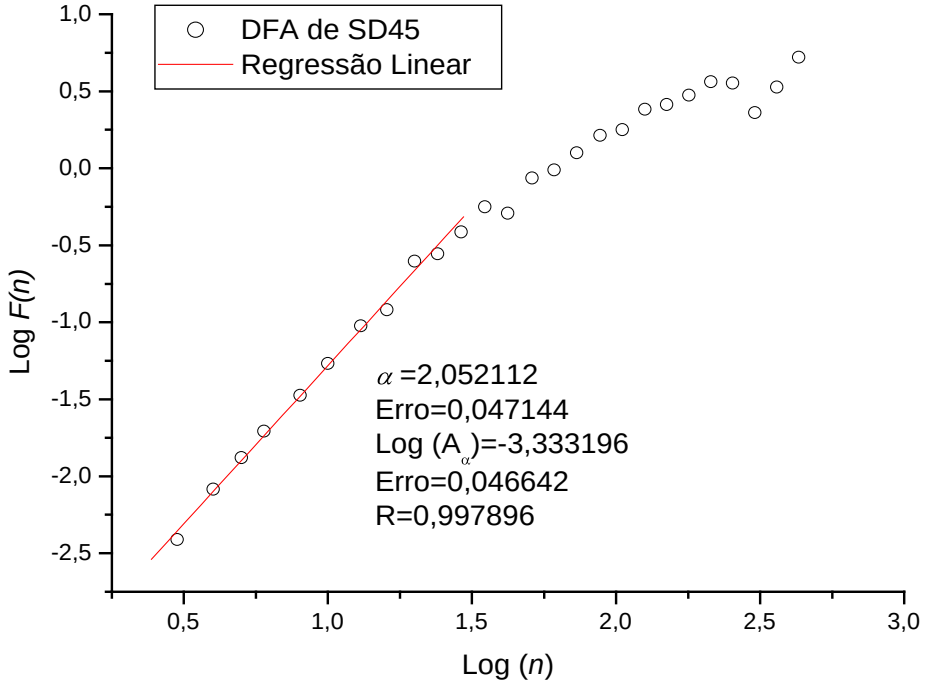

Figura 64 – DFA do sinal SD45 – Tratamento 3.

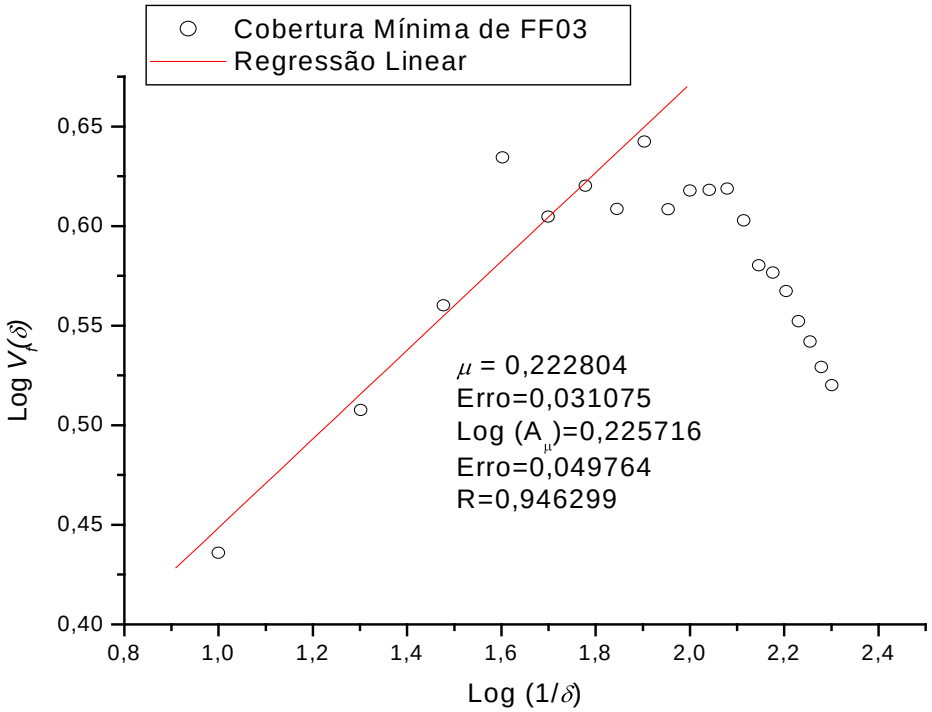

Figura 65 – Análise de Cobertura Mínima do sinal FF03 – Tratamento 3.

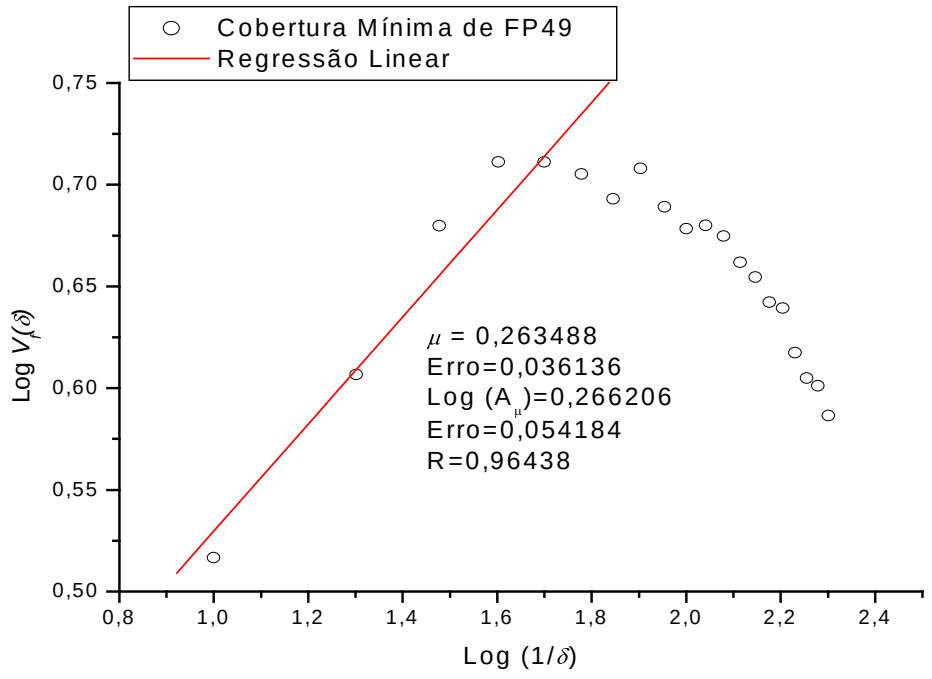

Figura 66 – Análise de Cobertura Mínima do sinal FP49 – Tratamento 3.

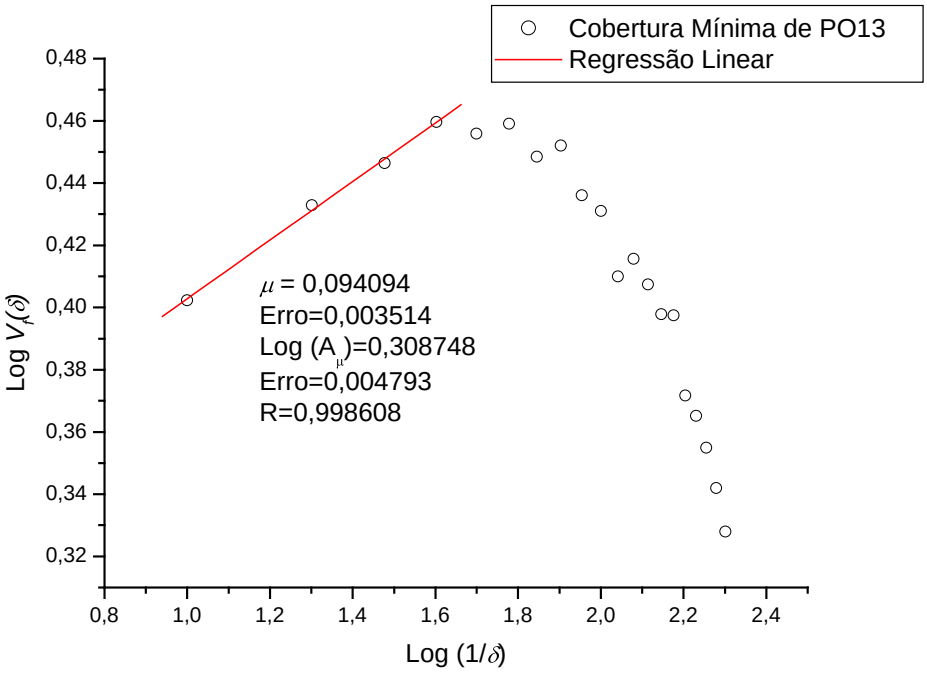

Figura 67 – Análise de Cobertura Mínima do sinal PO13 – Tratamento 3.

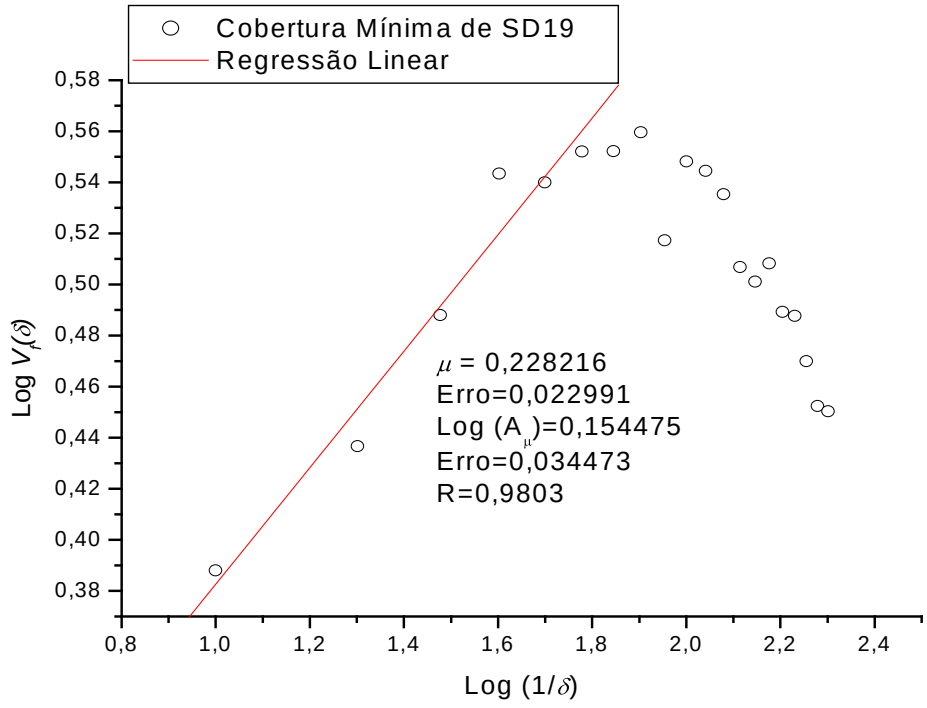

Figura 68 – Análise de Cobertura Mínima do sinal SD19 – Tratamento 3.

Nas tabelas 5.1-5.36 são mostrados o logaritmo da amplitude e o expoente crítico referentes às análises *R/S*, DFA e cobertura mínima, a média, desvio-padrão e variância para cada sinal.

Também são mostrados os valores de r, definidos pelo critério de Chauvenet, para o logaritmo da amplitude e do expoente crítico, obtidos para cada sinal após a eliminação de alguns sinais que não satisfaziam a eq. (4.1.). Os valores não apresentados referem-se aos sinais que foram eliminados.

Os valores grifados em vermelho nas tabelas 5.1-5.36 são apresentados nas figs. 69-103, e constituem os principais resultados deste trabalho. Através deles é possível verificar que as análises conseguiram diferenciar os tipos de defeitos, que é o objetivo deste o trabalho, sendo a confiabilidade da separação verificada através da dispersão dos valores obtidos.

Essas figuras mostram, além dos logaritmos das amplitudes e dos expoentes críticos obtidos em cada análise e tipo de tratamento com suas respectivas dispersões, também o desvio-padrão das amplitudes dos sinais de cada tipo de defeito com suas respectivas dispersões, seguindo o procedimento introduzido por Kurnaz (2004) no estudo de séries de temperaturas.

Também são comparados os expoentes críticos das regressões lineares de cada análise, para cada tipo de tratamento, com seus respectivos desvios-padrões representados por barras de erro.

Tabela 5.1. – Logaritmo da amplitude (A_H) e expoente crítico da Análise de Hurst efetuada com o tratamento 1 para o defeito falta de fusão das duas regiões encontradas e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Fusão								
Sinal	Região 1				Região 2			
			Critério de Chauvenet				Critério de Chauvenet	
	Log (A_{H1})	H_1	r (Log (A_{H1}))	r (H_1)	Log (A_{H2})	H_2	r(Log(A_{H2}))	r(H_2)
FF01								
FF02								
FF03	-0,230957	0,874082	0,23565	0,24920	0,32377	0,47957	1,53813	1,67807
FF04	-0,268973	0,914593	0,45430	0,52253				
FF05	-0,27771	0,92216	0,61286	0,66668	0,35548	0,45795	1,05324	1,08321
FF06	-0,27356	0,91372	0,53755	0,50590	0,38812	0,44393	0,55413	0,69746
FF07					0,50428	0,36006	1,22212	1,61017
FF08	-0,175181	0,819165	1,24791	1,29537	0,54568	0,35567	1,85518	1,73096
FF09	-0,292471	0,934751	0,88076	0,90654	0,34115	0,45959	1,27236	1,12833
FF10	-0,1472	0,79498	1,75573	1,75609	0,44595	0,37625	0,33017	1,16471
FF11	-0,23315	0,872492	0,19584	0,27949				
FF12	-0,182864	0,832623	1,10847	1,03900	0,44133	0,40204	0,25953	0,45512
FF13	-0,16804	0,81677	1,37751	1,34099	0,44421	0,39815	0,30357	0,56215
FF14					0,41279	0,40819	0,17689	0,28590
FF15	-0,178485	0,825852	1,18795	1,16798	0,41697	0,41748	0,11297	0,03030
FF16	-0,256771	0,901531	0,23285	0,27370	0,53189	0,36446	1,64432	1,48910
FF17	-0,195633	0,842825	0,87673	0,84465	0,42325	0,41301	0,01694	0,15328
FF18	-0,166015	0,81535	1,41426	1,36805	0,34168	0,46554	1,26426	1,29204
FF19	-0,262222	0,902217	0,33178	0,28677	0,30417	0,47064	1,83784	1,43237
FF20	-0,247187	0,888588	0,05891	0,02714	0,32033	0,46330	1,59073	1,23041
FF21	-0,277041	0,919882	0,60072	0,62329	0,43390	0,41481	0,14591	0,10376
FF22	-0,220025	0,865038	0,43405	0,42149	0,42585	0,43607	0,02282	0,48120
FF23	-0,315447	0,951807	1,29775	1,23146	0,40609	0,43492	0,27934	0,44955
FF24	-0,149717	0,798916	1,71005	1,68111	0,41086	0,42970	0,20640	0,30593
FF25	-0,17698	0,82208	1,21526	1,23984	0,42565	0,42901	0,01976	0,28694
FF26	-0,20361	0,84506	0,73196	0,80207	0,41362	0,43298	0,16420	0,39618
FF27	-0,192015	0,840285	0,94239	0,89303	0,42585	0,43607	0,02282	0,48120
FF28	-0,296674	0,939049	0,95704	0,98842	0,37548	0,42781	0,74741	0,25393
FF29	-0,25484	0,893129	0,19780	0,11364	0,47629	0,40134	0,79411	0,47438
FF30	-0,237828	0,878122	0,11094	0,17224	0,46291	0,40839	0,58952	0,28040
FF31	-0,287124	0,928984	0,78372	0,79668	0,33146	0,47092	1,42054	1,44007
FF32	-0,322752	0,959083	1,43032	1,37007	0,49600	0,39697	1,09551	0,59461
FF33	-0,234041	0,876145	0,17967	0,20990	0,54604	0,36752	1,86069	1,40491
FF34	-0,167272	0,815932	1,39145	1,35696	0,49031	0,36071	1,00850	1,59228
FF35	-0,24679	0,89205	0,05170	0,09309	0,46419	0,36980	0,60909	1,34218
FF36	-0,2798	0,92496	0,65080	0,72002	0,44407	0,38255	0,30143	0,99137
FF37	-0,31006	0,948146	1,19998	1,16172	0,41498	0,42856	0,14340	0,27456
FF38	-0,322682	0,962725	1,42905	1,43945	0,47953	0,40766	0,84366	0,30049
FF39	-0,303089	0,947021	1,07346	1,14028	0,35888	0,45325	1,00125	0,95389
FF40	-0,207003	0,849313	0,67038	0,72105	0,32441	0,47666	1,52834	1,59800
FF41	-0,268041	0,909816	0,43738	0,43153	0,49292	0,38867	1,04841	0,82298
FF42	-0,226563	0,866663	0,31539	0,39053	0,40272	0,43992	0,33087	0,58713
FF43	-0,301597	0,942831	1,04638	1,06047	0,44042	0,40874	0,24561	0,27077
FF44	-0,161901	0,807795	1,48893	1,51197	0,51773	0,38469	1,42779	0,93249
FF45	-0,23927	0,886	0,08477	0,02216	0,44401	0,42102	0,30051	0,06711
FF46	-0,15545	0,80669	1,60600	1,53302	0,46350	0,36440	0,59854	1,49076
FF47	-0,27036	0,914654	0,47947	0,52369	0,45675	0,36233	0,49532	1,54771
FF48	-0,330855	0,970938	1,57738	1,59590	0,48012	0,40719	0,85268	0,31342
FF49	-0,326531	0,967689	1,49891	1,53401	0,43809	0,41901	0,20998	0,01180
FF50	-0,28539	0,924523	0,75225	0,71170	0,32121	0,47069	1,57727	1,43374
FF51	-0,217819	0,858142	0,47408	0,55286	0,52027	0,36576	1,46663	1,45334
FF52	-0,231001	0,871068	0,23485	0,30662	0,34687	0,47548	1,18490	1,56554
FF53	-0,200659	0,844012	0,78552	0,82203	0,45215	0,41712	0,42498	0,04020
FF54	-0,197572	0,843052	0,84154	0,84032	0,50012	0,38834	1,15851	0,83206
FF55	-0,170689	0,817871	1,32944	1,32002	0,38631	0,43175	0,58180	0,36233
FF56	-0,288985	0,930076	0,81749	0,81748	0,32449	0,47012	1,52712	1,41806
FF57	-0,333868	0,97298	1,63206	1,63480	0,47938	0,40068	0,84136	0,49254
FF58	-0,270087	0,913873	0,47452	0,50882	0,34569	0,45230	1,20294	0,92775
FF59	-0,288985	0,930076	0,81749	0,81748	0,32449	0,47012	1,52712	1,41806
FF60	-0,333868	0,97298	1,63206	1,63480	0,47938	0,40068	0,84136	0,49254
MÉDIA	-0,24394	0,88716			0,42436	0,41858		
DESVPD	0,05510	0,05249			0,06540	0,03634		
VARIÂNCIA	0,00304	0,00276			0,00428	0,00132		

Tabela 5.2. – Logaritmo da amplitude (A_H) e expoente crítico da Análise de Hurst efetuada com o tratamento 1 para o defeito falta de penetração das duas regiões encontradas e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Penetração								
Sinal	Região 1				Região 2			
			Critério de Chauvenet				Critério de Chauvenet	
	Log (A_{H1})	H_1	r(Log (A_{H1}))	r(H_1)	Log (A_{H2})	H_2	r(Log(A_{H2}))	r(H_2)
FP01	-0,244831	0,890037	0,05915	0,11060	0,34513	0,43750	2,01090	1,88556
FP02	-0,273815	0,911658	0,82579	0,70984	0,41125	0,43830	1,13803	1,90585
FP03	-0,233096	0,875665	0,25125	0,28773				
FP04	-0,231451	0,874611	0,29476	0,31694				
FP05	-0,19845	0,84312	1,16765	1,18974	0,59154	0,32566	1,24204	0,95173
FP06	-0,18814	0,83239	1,44035	1,48713				
FP07	-0,278452	0,922616	0,94844	1,01355	0,55774	0,34751	0,79583	0,39741
FP08	-0,178915	0,824409	1,68436	1,70833	0,54123	0,35351	0,57788	0,24520
FP09	-0,247214	0,890586	0,12218	0,12582	0,35896	0,42836	1,82833	1,65368
FP10	-0,228725	0,871929	0,36686	0,39127	0,35634	0,42908	1,86292	1,67195
FP11	-0,1985	0,84285	1,16633	1,19722	0,56346	0,31373	0,87134	1,25438
FP12	-0,1985	0,84285	1,16633	1,19722	0,56346	0,31373	0,87134	1,25438
FP13	-0,21428	0,85619	0,74894	0,82749	0,52877	0,32666	0,41339	0,92636
FP14	-0,21753	0,86276	0,66297	0,64540	0,47013	0,37098	0,36074	0,19800
FP15	-0,211303	0,858225	0,82768	0,77109	0,45244	0,39644	0,59427	0,84390
FP16	-0,309466	0,948381	1,76877	1,72765	0,56168	0,32663	0,84785	0,92712
FP17	-0,187413	0,83018	1,45958	1,54838	0,58763	0,30293	1,19042	1,52837
FP18	-0,265829	0,906602	0,61455	0,56971	0,45445	0,37958	0,56773	0,41618
FP19	-0,239963	0,882843	0,06961	0,08879	0,47551	0,35808	0,28971	0,12926
FP20	-0,266842	0,909328	0,64135	0,64527	0,51753	0,35140	0,26501	0,29873
FP21	-0,233502	0,877235	0,24051	0,24422	0,52629	0,35267	0,38065	0,26651
FP22	-0,22263	0,870842	0,52808	0,42140	0,52012	0,35587	0,29920	0,18533
FP23	-0,22263	0,870842	0,52808	0,42140	0,52012	0,35587	0,29920	0,18533
FP24	-0,313792	0,957084	1,88320	1,96886	0,55468	0,32766	0,75544	0,90099
FP25	-0,263778	0,90709	0,56030	0,58324	0,45088	0,38025	0,61486	0,43317
FP26	-0,260173	0,905562	0,46495	0,54089	0,44365	0,38968	0,71031	0,67241
FP27	-0,255369	0,898106	0,33788	0,33424	0,40733	0,40922	1,18978	1,16812
FP28	-0,227042	0,870054	0,41138	0,44324	0,55996	0,32638	0,82514	0,93346
FP29	-0,180348	0,828667	1,64645	1,59031	0,46292	0,36616	0,45592	0,07572
FP30	-0,188834	0,836926	1,42200	1,36141	0,39055	0,41803	1,41130	1,39162
FP31	-0,280423	0,922227	1,00057	1,00277	0,40367	0,40761	1,23810	1,12727
FP32	-0,271001	0,911756	0,75136	0,71256	0,49860	0,35780	0,01511	0,13636
FP33	-0,231155	0,873391	0,30259	0,35075	0,39318	0,40777	1,37658	1,13133
FP34	-0,227097	0,872726	0,40992	0,36919	0,45355	0,37999	0,57962	0,42658
FP35	-0,278469	0,919486	0,94889	0,92680	0,46259	0,36334	0,46027	0,00418
FP36	-0,21009	0,84993	0,85977	1,00099	0,51004	0,34425	0,16613	0,48012
FP37	-0,208671	0,854763	0,89730	0,86704	0,53003	0,31588	0,43002	1,19984
FP38								
FP39					0,38146	0,41003	1,53130	1,18867
FP40	-0,24142	0,88581	0,03107	0,00655	0,51322	0,33052	0,20811	0,82844
FP41	-0,309634	0,950395	1,77321	1,78347	0,50959	0,33972	0,16019	0,59504
FP42	-0,249539	0,891862	0,18368	0,16118	0,56006	0,31363	0,82646	1,25692
FP43	-0,263737	0,90655	0,55922	0,56827	0,52136	0,31349	0,31557	1,26047
FP44					0,45486	0,40285	0,56232	1,00652
FP45					0,42124	0,39770	1,00615	0,87587
FP46	-0,192759	0,837076	1,31818	1,35725	0,62817	0,30724	1,72560	1,41903
FP47	-0,285533	0,925985	1,13573	1,10693				
FP48	-0,302332	0,942668	1,58007	1,56931				
FP49	-0,239072	0,882348	0,09318	0,10250	0,44970	0,41112	0,63044	1,21632
FP50	-0,293111	0,931639	1,33617	1,26363	0,61044	0,31459	1,49154	1,23257
FP51	-0,286668	0,926588	1,16575	1,12364	0,55090	0,36238	0,70554	0,02017
FP52	-0,174277	0,825448	1,80703	1,67953	0,59428	0,33666	1,27821	0,67267
FP53	-0,280358	0,920243	0,99885	0,94778				
FP54					0,46813	0,39618	0,38714	0,83730
FP55					0,39554	0,43196	1,34542	1,74501
FP56	-0,311933	0,953432	1,83402	1,86764				
FP57	-0,263621	0,908622	0,55615	0,62570	0,57832	0,36020	1,06752	0,07548
FP58	-0,254166	0,899249	0,30606	0,36592	0,57049	0,35025	0,96415	0,32790
FP59	-0,22608	0,86983	0,43682	0,44945	0,61470	0,31858	1,54778	1,13134
FP60	-0,238161	0,884845	0,11728	0,03330	0,61983	0,32950	1,61550	0,85431
MÉDIA	-0,24259	0,88605			0,49746	0,36318		
DESVPD	0,03781	0,03608			0,07575	0,03942		
VARIÂNCIA	0,00143	0,00130			0,00574	0,00155		

Tabela 5.3. – Logaritmo da amplitude (A_H) e expoente crítico da Análise de Hurst efetuada com o tratamento 1 para o defeito porosidade das duas regiões encontradas e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Porosidade								
Sinal	Região 1				Região 2			
			Critério de Chauvenet				Critério de Chauvenet	
	Log (A_{H1})	H_1	r(Log(A_{H1}))	r(H_1)	Log (A_{H2})	H_2	r(Log (A_{H2}))	R(H_2)
PO01					0,35337	0,40793	0,76622	0,03232
PO02	-0,255611	0,900068	1,18035	1,19604	0,42712	0,37525	0,30095	0,87119
PO03					0,36191	0,40434	0,64264	0,06693
PO04					0,34278	0,42238	0,91945	0,43182
PO05					0,40428	0,37252	0,02955	0,94667
PO06					0,35685	0,40125	0,71586	0,15236
PO07					0,30581	0,43669	1,45441	0,82745
PO08					0,27306	0,47335	1,92831	1,84100
PO09					0,27163	0,46546	1,94900	1,62286
PO10					0,30670	0,45595	1,44153	1,35994
PO11					0,30670	0,45595	1,44153	1,35994
PO12	-0,191431	0,836522	0,16239	0,13269	0,29126	0,46483	1,66495	1,60544
PO13					0,40429	0,42728	0,02940	0,56729
PO14	-0,188356	0,837229	0,11362	0,14452	0,39734	0,43080	0,12997	0,66461
PO15					0,51696	0,36813	1,60094	1,06804
PO16	-0,205125	0,851894	0,37959	0,38992	0,47133	0,39724	0,94067	0,26323
PO17	-0,217227	0,862268	0,57154	0,56352	0,50709	0,37940	1,45812	0,75645
PO18					0,37111	0,41283	0,50952	0,16779
PO19	-0,272713	0,91672	1,45160	1,47469	0,35999	0,43898	0,67042	0,89076
PO20								
PO21	-0,090788	0,7462	1,43391	1,37871	0,45325	0,39085	0,67905	0,43989
PO22	-0,08555	0,738688	1,51699	1,50441				
PO23	-0,091437	0,743497	1,42362	1,42394	0,40238	0,41540	0,05704	0,23884
PO24	-0,090788	0,7462	1,43391	1,37871	0,45325	0,39085	0,67905	0,43989
PO25	-0,187093	0,831247	0,09358	0,04442	0,43798	0,37467	0,45810	0,88723
PO26	-0,15345	0,802987	0,44003	0,42847	0,34692	0,47370	0,85955	1,85067
PO27	-0,140902	0,787833	0,63905	0,68205	0,39659	0,41270	0,14082	0,16420
PO28	-0,140902	0,787833	0,63905	0,68205	0,38426	0,42001	0,31924	0,36630
PO29	-0,141847	0,788325	0,62406	0,67381	0,48645	0,35465	1,15946	1,44072
PO30	-0,196218	0,841955	0,23832	0,22361	0,48065	0,38775	1,07553	0,52560
PO31	-0,171535	0,822626	0,15318	0,09984				
PO32	-0,109156	0,759776	1,14257	1,15154	0,50591	0,36362	1,44105	1,19273
PO33	-0,141847	0,788325	0,62406	0,67381	0,48645	0,35465	1,15946	1,44072
PO34					0,34097	0,42628	0,94564	0,53964
PO35	-0,26022	0,902532	1,25345	1,23727	0,37627	0,44126	0,43485	0,95380
PO36	-0,284386	0,923141	1,63675	1,58214	0,49609	0,37876	1,29895	0,77415
PO37	-0,289281	0,932934	1,71439	1,74601	0,37456	0,42969	0,45960	0,63392
PO38	-0,268209	0,910386	1,38017	1,36870	0,38664	0,41566	0,28480	0,24603
PO39	-0,169039	0,817824	0,19277	0,18019	0,40037	0,41053	0,08612	0,10420
PO40	-0,169039	0,817824	0,19277	0,18019	0,50954	0,35261	1,49357	1,49712
PO41					0,29400	0,46847	1,62530	1,70608
PO42	-0,266512	0,911648	1,35325	1,38982				
PO43	-0,100031	0,756045	1,28731	1,21397	0,48119	0,35455	1,08335	1,44349
PO44	-0,232226	0,875346	0,80944	0,78236				
PO45	-0,268811	0,913728	1,38971	1,42462				
PO46	-0,236545	0,882551	0,87794	0,90292				
PO47								
PO48	-0,235482	0,881844	0,86108	0,89109				
PO49					0,44483	0,37985	0,55722	0,74401
PO50	-0,138432	0,783834	0,67823	0,74896	0,49779	0,36068	1,32355	1,27401
PO51								
PO52	-0,099448	0,751462	1,29655	1,29066	0,48037	0,33601	1,07148	1,95606
PO53					0,34598	0,43379	0,87315	0,74727
PO54	-0,113946	0,765212	1,06660	1,06057	0,42748	0,41900	0,30616	0,33837
PO55	-0,129504	0,777273	0,81983	0,85875	0,45673	0,38742	0,72941	0,53472
PO56					0,47066	0,35955	0,93098	1,30525
PO57	-0,131803	0,7807	0,78337	0,80141	0,42921	0,39150	0,33119	0,42192
PO58	-0,242314	0,885085	0,96944	0,94532	0,40757	0,43439	0,01806	0,76386
PO59	-0,165236	0,815684	0,25309	0,21600				
PO60	-0,194076	0,839849	0,20434	0,18837	0,42585	0,42188	0,28257	0,41800
MÉDIA	-0,18119	0,82859			0,40632	0,40676		
DESVPD	0,06305	0,05976			0,06911	0,03617		
VARIÂNCIA	0,00398	0,00357			0,00478	0,00131		

Tabela 5.4. – Logaritmo da amplitude (A_H) e expoente crítico da Análise de Hurst efetuada com o tratamento 1 para a categoria sem defeito das duas regiões encontradas e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Sem Defeito								
Sinal	**Região 1**				**Região 2**			
			Critério de Chauvenet				**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_{H1})	***H_1***	**r(Log (A_{H1}))**	**r(*H_1*)**	**Log (A_{H2})**	***H_2***	**r(Log (A_{H2}))**	**r(*H_2*)**
SD01	-0,24018	0,887065	0,71514	0,77513	0,49056	0,39826	0,66455	0,37369
SD02	-0,277178	0,919912	1,38032	1,39748	0,34053	0,49648	0,55420	0,90985
SD03	-0,236958	0,87964	0,65722	0,63445	0,33441	0,48765	0,60392	0,79446
SD04	-0,25935	0,90106	1,05980	1,04029	0,53243	0,37219	1,00467	0,71437
SD05	-0,198412	0,844704	0,03579	0,02748	0,57580	0,33094	1,35698	1,25342
SD06	-0,186727	0,837378	0,24587	0,16628				
SD07	-0,237667	0,882077	0,66996	0,68063	0,55957	0,33569	1,22514	1,19135
SD08	-0,268576	0,913418	1,22567	1,27444	0,43368	0,41322	0,20249	0,17819
SD09	-0,144793	0,792962	0,99979	1,00783	0,62974	0,29541	1,79516	1,71773
SD10					0,27644	0,51711	1,07483	1,17945
SD11	-0,265507	0,911435	1,17049	1,23687	0,28139	0,49238	1,03462	0,85627
SD12					0,27644	0,51711	1,07483	1,17945
SD13	-0,232382	0,878183	0,57495	0,60685				
SD14	-0,190398	0,832394	0,17987	0,26071	0,40728	0,41697	0,01197	0,12918
SD15	-0,247769	0,884931	0,85158	0,73470	0,46983	0,39043	0,49615	0,47601
SD16	-0,226694	0,869957	0,47268	0,45099	0,24262	0,53057	1,34956	1,35534
SD17	-0,241341	0,880674	0,73602	0,65404	0,27379	0,50596	1,09636	1,03374
SD18					0,58355	0,30781	1,41994	1,55569
SD19	-0,15631	0,799298	0,79273	0,88778	0,41368	0,42790	0,04002	0,01365
SD20	-0,15631	0,799298	0,79273	0,88778	0,41368	0,42790	0,04002	0,01365
SD21					0,26647	0,49337	1,15582	0,86921
SD22					0,30242	0,47521	0,86378	0,63190
SD23					0,61641	0,29953	1,68687	1,66389
SD24	-0,17775	0,821563	0,40727	0,46593	0,30325	0,49247	0,85704	0,85745
SD25					0,41935	0,44558	0,08608	0,24469
SD26					0,62654	0,30278	1,76916	1,62142
SD27	-0,118299	0,771142	1,47612	1,42125	0,51912	0,37310	0,89655	0,70248
SD28					0,59867	0,31460	1,54276	1,46695
SD29	-0,203074	0,847453	0,04803	0,02461	0,19501	0,55132	1,73632	1,62650
SD30	-0,22138	0,86404	0,37714	0,33888	0,41401	0,45402	0,04270	0,35499
SD31	-0,27491	0,91799	1,33955	1,36107	0,31653	0,51279	0,74916	1,12299
SD32	-0,27491	0,91799	1,33955	1,36107	0,31653	0,51279	0,74916	1,12299
SD33	-0,119711	0,77164	1,45073	1,41182	0,54073	0,34325	1,07210	1,09256
SD34	-0,16989	0,81796	0,54858	0,53419	0,44499	0,34382	0,29436	1,08511
SD35	-0,119121	0,77076	1,46134	1,42849	0,25690	0,49493	1,23356	0,88960
SD36	-0,15391	0,80159	0,83588	0,84436	0,34703	0,43312	0,50140	0,08186
SD37	-0,110412	0,765125	1,61792	1,53525	0,47183	0,40758	0,51240	0,25189
SD38					0,27627	0,52311	1,07621	1,25785
SD39	-0,286067	0,925877	1,54013	1,51050	0,29214	0,50266	0,94729	0,99061
SD40	-0,262471	0,90379	1,11591	1,09202	0,43232	0,44579	0,19144	0,24744
SD41	-0,276782	0,920496	1,37320	1,40855	0,50105	0,36324	0,74976	0,83133
SD42					0,21674	0,52387	1,55979	1,26779
SD43					0,37633	0,41426	0,26339	0,16460
SD44					0,58089	0,29363	1,39833	1,74099
SD45	-0,205464	0,85176	0,09100	0,10621	0,26415	0,52122	1,17467	1,23315
SD46	-0,26055	0,904017	1,08137	1,09632	0,55069	0,34060	1,15300	1,12719
SD47	-0,130525	0,779337	1,25631	1,26598	0,27222	0,51540	1,10911	1,15710
SD48	-0,099202	0,749536	1,81946	1,83062	0,34528	0,44427	0,51562	0,22757
SD49	-0,181065	0,82848	0,34767	0,33487	0,24026	0,52493	1,36873	1,28164
SD50	-0,143956	0,789782	1,01484	1,06808	0,51388	0,34776	0,85398	1,03362
SD51	-0,229586	0,87233	0,52468	0,49595	0,30596	0,50925	0,83503	1,07673
SD52	-0,138055	0,79111	1,12093	1,04292	0,50471	0,38663	0,77949	0,52567
SD53					0,25839	0,49102	1,22146	0,83850
SD54	-0,162243	0,811188	0,68606	0,66250	0,39386	0,43612	0,12098	0,12107
SD55					0,59806	0,30302	1,53781	1,61828
SD56	-0,144066	0,792737	1,01286	1,01209	0,49104	0,35533	0,66845	0,93470
SD57	-0,164066	0,81281	0,65329	0,63177	0,46012	0,39221	0,41727	0,45275
SD58	-0,176175	0,821432	0,43558	0,46841	0,49132	0,37260	0,67072	0,70901
SD59	-0,170094	0,818096	0,54491	0,53162	0,42034	0,43161	0,09412	0,06213
SD60	-0,277837	0,922525	1,39217	1,44699	0,43046	0,40485	0,17633	0,28757
MÉDIA	-0,20040	0,84615			0,40875	0,42686		
DESVPD	0,05562	0,05278			0,12310	0,07652		
VARIÂNCIA	0,00309	0,00279			0,01515	0,00586		

Tabela 5.5. – Logaritmo da amplitude (A_α) e expoente crítico da Análise de Flutuação das Não-tendências efetuada com o tratamento 1 para o defeito falta de fusão e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Fusão				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_α)	**α**	**r(Log (A_α))**	**r(α)**
FF01	-2,67784	2,1577	1,27950	1,34568
FF02				
FF03	-2,74113	2,17667	0,53110	0,08545
FF04	-2,70153	2,16522	0,99936	0,84610
FF05				
FF06				
FF07	-2,64752	2,15039	1,63803	1,83130
FF08	-2,66258	2,19833	1,45994	1,35348
FF09	-2,62885	2,15914	1,85880	1,25001
FF10	-2,70052	2,16041	1,01131	1,16564
FF11	-2,71620	2,16966	0,82589	0,55114
FF12	-2,71559	2,16631	0,83310	0,77369
FF13				
FF14				
FF15	-2,68167	2,16714	1,23421	0,71855
FF16	-2,64017	2,17185	1,72494	0,40565
FF17				
FF18	-2,69189	2,17443	1,11336	0,23426
FF19	-2,67473	2,16476	1,31627	0,87666
FF20				
FF21				
FF22				
FF23	-2,82392	2,18173	0,44789	0,25070
FF24	-2,77557	2,16439	0,12385	0,90124
FF25				
FF26				
FF27				
FF28	-2,92134	2,20132	1,59987	1,55212
FF29	-2,91290	2,19670	1,50007	1,24520
FF30	-2,87018	2,17272	0,99491	0,34786
FF31				
FF32	-2,82178	2,19716	0,42258	1,27576
FF33	-2,79571	2,19192	0,11431	0,92765
FF34	-2,69579	2,15203	1,06724	1,72235
FF35				
FF36				
FF37	-2,88552	2,19047	1,17631	0,83132
FF38	-2,85338	2,17569	0,79625	0,15055
FF39	-2,79312	2,20132	0,08368	1,55212
FF40	-2,84556	2,18615	0,70378	0,54433
FF41	-2,84019	2,18170	0,64028	0,24871
FF42	-2,80238	2,16698	0,19318	0,72918
FF43	-2,85556	2,17072	0,82203	0,48072
FF44	-2,72891	2,18018	0,67560	0,14773
FF45				
FF46	-2,78290	2,14550	0,03717	2,15615
FF47	-2,77096	2,17030	0,17836	0,50862
FF48				
FF49	-2,76773	2,18893	0,21655	0,72902
FF50	-2,76805	2,17826	0,21277	0,02018
FF51	-2,85227	2,16213	0,78313	1,05138
FF52				
FF53	-2,89701	2,18474	1,31217	0,45066
FF54	-2,83979	2,18016	0,63555	0,14640
FF55				
FF56	-2,89409	2,19168	1,27765	0,91170
FF57	-2,86840	2,19431	0,97386	1,08642
FF58	-2,81385	2,20076	0,32881	1,51491
FF59	-2,89409	2,19168	1,27765	0,91170
FF60	-2,86840	2,19431	0,97386	1,08642
MÉDIA	-2,78604	2,17796		
DESVIO-PADRÃO	0,08457	0,01505		
VARIÂNCIA	0,00715	0,00023		

Tabela 5.6. – Logaritmo da amplitude (A_α) e expoente crítico da Análise de Flutuação das Não-tendências efetuada com o tratamento 1 para o defeito falta de penetração e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Penetração				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_α)	**α**	**r(Log (A_α))**	**r(α)**
FP01	-2,89516	2,32946	1,70372	0,57551
FP02	-2,84697	2,14038	0,80723	1,85808
FP03	-2,80535	2,16011	0,03297	1,60414
FP04	-2,90575	2,32974	1,90072	0,57912
FP05	-2,85594	2,21398	0,97410	0,91080
FP06	-2,80089	2,16230	0,04999	1,57596
FP07	-2,87791	2,19083	1,38281	1,20875
FP08	-2,86791	2,20212	1,19678	1,06344
FP09	-2,83948	2,16646	0,66790	1,52241
FP10	-2,83538	2,16195	0,59162	1,58046
FP11	-2,87804	2,38868	1,38523	1,33772
FP12	-2,87804	2,38868	1,38523	1,33772
FP13	-2,72286	2,25107	1,50159	0,43342
FP14	-2,79573	2,32499	0,14599	0,51798
FP15	-2,82451	2,33134	0,38941	0,59971
FP16	-2,76870	2,33275	0,64883	0,61786
FP17	-2,90655	2,39058	1,91560	1,36217
FP18	-2,74692	2,32373	1,05400	0,50176
FP19	-2,80780	2,32704	0,07855	0,54437
FP20	-2,80372	2,33564	0,00265	0,65505
FP21	-2,71240	2,33571	1,69618	0,65595
FP22				
FP23				
FP24	-2,75146	2,23293	0,96954	0,66690
FP25	-2,80042	2,22065	0,05874	0,82495
FP26	-2,84641	2,28719	0,79682	0,03147
FP27	-2,80100	2,33643	0,04795	0,66522
FP28	-2,76261	2,33383	0,76212	0,63176
FP29	-2,83703	2,32686	0,62232	0,54205
FP30	-2,75462	2,28066	0,91076	0,05258
FP31	-2,75462	2,28066	0,91076	0,05258
FP32	-2,71171	2,19068	1,70902	1,21068
FP33	-2,75766	2,20572	0,85420	1,01711
FP34	-2,72073	2,17293	1,54122	1,43914
FP35	-2,77751	2,26183	0,48493	0,29493
FP36	-2,83276	2,33279	0,54288	0,61837
FP37	-2,85655	2,31755	0,98545	0,42222
FP38	-2,72234	2,40334	1,51126	1,52640
FP39				
FP40	-2,73502	2,41648	1,27538	1,69552
FP41				
FP42	-2,70733	2,41553	1,79050	1,68329
FP43				
FP44	-2,76808	2,33604	0,66036	0,66020
FP45	-2,77857	2,30609	0,46522	0,27472
FP46	-2,80192	2,22788	0,03083	0,73189
FP47	-2,74954	2,41929	1,00526	1,73169
FP48	-2,81960	2,33214	0,29807	0,61001
FP49	-2,83038	2,19240	0,49861	1,18855
FP50	-2,73471	2,23092	1,28115	0,69277
FP51	-2,84889	2,33776	0,84295	0,68234
FP52	-2,82527	2,33127	0,40355	0,59881
FP53	-2,84132	2,33411	0,70213	0,63536
FP54	-2,78101	2,29078	0,41982	0,07767
FP55	-2,80173	2,33622	0,03437	0,66252
FP56	-2,85152	2,33788	0,89188	0,68388
FP57	-2,84800	2,19198	0,82640	1,19395
FP58	-2,85629	2,27700	0,98061	0,09968
FP59	-2,80188	2,17941	0,03158	1,35574
FP60	-2,75226	2,19621	0,95466	1,13951
MÉDIA	-2,80358	2,28475		
DESVIO-PADRÃO	0,05375	0,07770		
VARIÂNCIA	0,00289	0,00604		

Tabela 5.7. – Logaritmo da amplitude (A_α) e expoente crítico da Análise de Flutuação das Não-tendências efetuada com o tratamento 1 para o defeito porosidade e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Porosidade				
Sinal			Critério de Chauvenet	
	Log (A_α)	α	r(Log (A_α))	r(α)
PO01	-2,70718	2,22770	1,91719	0,53982
PO02	-2,82703	2,33279	0,04455	0,77484
PO03	-2,70522	2,30858	1,94781	0,47198
PO04				
PO05	-2,73890	2,40530	1,42157	1,68194
PO06	-2,74720	2,40523	1,29188	1,68106
PO07	-2,79143	2,40665	0,60079	1,69882
PO08	-2,78703	2,36248	0,66954	1,14626
PO09	-2,75257	2,32012	1,20798	0,61634
PO10	-2,83262	2,37338	0,04279	1,28262
PO11	-2,83262	2,37338	0,04279	1,28262
PO12	-2,74435	2,33145	1,33641	0,75808
PO13	-2,93753	2,20057	1,68200	0,87921
PO14	-2,81141	2,13294	0,28861	1,72525
PO15	-2,89138	2,21360	0,96091	0,71621
PO16	-2,91123	2,17973	1,27106	1,13992
PO17	-2,88807	2,18545	0,90919	1,06836
PO18	-2,85947	2,32547	0,46232	0,68327
PO19	-2,76363	2,32991	1,03517	0,73882
PO20				
PO21	-2,80303	2,16219	0,41955	1,35934
PO22	-2,79500	2,15829	0,54501	1,40813
PO23	-2,77540	2,16078	0,85126	1,37698
PO24	-2,80303	2,16219	0,41955	1,35934
PO25	-2,81667	2,25724	0,20642	0,17028
PO26	-2,74817	2,27170	1,27673	0,01062
PO27	-2,75147	2,25734	1,22516	0,16903
PO28	-2,75147	2,25734	1,22516	0,16903
PO29	-2,87237	2,16649	0,66388	1,30555
PO30	-2,95129	2,33795	1,89699	0,83940
PO31	-2,85367	2,24696	0,37170	0,29888
PO32	-2,73725	2,12295	1,44735	1,85023
PO33	-2,87237	2,16649	0,66388	1,30555
PO34	-2,87873	2,16649	0,76326	1,30555
PO35	-2,91707	2,22665	1,36231	0,55295
PO36	-2,86396	2,20403	0,53248	0,83593
PO37	-2,77540	2,16097	0,85126	1,37460
PO38	-2,83584	2,32978	0,09311	0,73719
PO39	-2,90360	2,28530	1,15185	0,18075
PO40	-2,87179	2,17103	0,65482	1,24875
PO41	-2,93664	2,32483	1,66809	0,67527
PO42	-2,89913	2,33573	1,08200	0,81162
PO43	-2,91194	2,28687	1,28216	0,20039
PO44	-2,88386	2,26775	0,84341	0,03880
PO45	-2,91957	2,33679	1,40137	0,82488
PO46	-2,83049	2,20672	0,00951	0,80228
PO47	-2,78092	2,20870	0,76501	0,77751
PO48	-2,91825	2,39354	1,38075	1,53482
PO49	-2,82859	2,31703	0,02017	0,57769
PO50	-2,81976	2,31816	0,15814	0,59183
PO51	-2,77484	2,31213	0,86001	0,51639
PO52	-2,76717	2,31738	0,97985	0,58207
PO53	-2,82542	2,38089	0,06971	1,37657
PO54	-2,89474	2,32298	1,01341	0,65212
PO55	-2,83322	2,25117	0,05217	0,24621
PO56	-2,83256	2,25155	0,04186	0,24146
PO57	-2,86594	2,32581	0,56341	0,68753
PO58	-2,90245	2,18993	1,13388	1,01232
PO59	-2,76280	2,33495	1,04813	0,80187
PO60	-2,83837	2,33958	0,13264	0,85979
MÉDIA	-2,82988	2,27085		
DESVIO-PADRÃO	0,06400	0,07994		
VARIÂNCIA	0,00410	0,00639		

Tabela 5.8. – Logaritmo da amplitude (A_α) e expoente crítico da Análise de Flutuação das Não-tendências efetuada com o tratamento 1 para a categoria sem defeito e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Sem Defeito				
Sinal			Critério de Chauvenet	
	Log (A_α)	α	r(Log (A_α))	r(α)
SD01	-2,96888	2,23405	1,84881	0,60193
SD02	-2,93188	2,22296	0,93805	0,78488
SD03	-2,91824	2,22673	0,60230	0,72269
SD04	-2,87521	2,25092	0,45689	0,32362
SD05	-2,90441	2,19749	0,26188	1,20507
SD06	-2,89523	2,21329	0,03591	0,94441
SD07	-2,85946	2,34791	0,84457	1,27646
SD08	-2,92636	2,19940	0,80218	1,17356
SD09	-2,93125	2,21530	0,92254	0,91125
SD10	-2,90630	2,19250	0,30840	1,28739
SD11	-2,86948	2,34842	0,59793	1,28488
SD12	-2,91259	2,16932	0,46323	1,66980
SD13	-2,90935	2,32791	0,38347	0,94652
SD14	-2,91868	2,32513	0,61313	0,90065
SD15	-2,90745	2,26260	0,33671	0,13093
SD16				
SD17	-2,83004	2,23169	1,56875	0,64086
SD18	-2,88130	2,37336	0,30698	1,69632
SD19	-2,85831	2,31525	0,87288	0,73766
SD20	-2,85831	2,31525	0,87288	0,73766
SD21				
SD22	-2,87665	2,31921	0,42144	0,80299
SD23	-2,89303	2,31478	0,01824	0,72990
SD24	-2,84612	2,24332	1,17294	0,44900
SD25				
SD26				
SD27	-2,89563	2,31623	0,04576	0,75383
SD28	-2,92915	2,32615	0,87085	0,91748
SD29	-2,94153	2,33397	1,17559	1,04649
SD30	-2,90902	2,34112	0,37535	1,16445
SD31	-2,82111	2,19704	1,78856	1,21249
SD32	-2,82111	2,19704	1,78856	1,21249
SD33				
SD34	-2,87150	2,32381	0,54821	0,87888
SD35	-2,85310	2,31938	1,00112	0,80579
SD36	-2,89054	2,35872	0,07954	1,45480
SD37				
SD38				
SD39	-2,88562	2,18432	0,20064	1,42234
SD40	-2,92697	2,21399	0,81719	0,93286
SD41				
SD42	-2,82779	2,32371	1,62413	0,87723
SD43	-2,85063	2,28027	1,06192	0,16058
SD44	-2,91479	2,31807	0,51738	0,78418
SD45	-2,96074	2,23800	1,64844	0,53676
SD46	-2,91178	2,32647	0,44329	0,92276
SD47	-2,83790	2,25278	1,37527	0,29293
SD48	-2,82738	2,31467	1,63423	0,72809
SD49	-2,85486	2,32012	0,95780	0,81800
SD50	-2,89914	2,21863	0,13215	0,85632
SD51	-2,95471	2,35442	1,50001	1,38386
SD52	-2,95126	2,19543	1,41509	1,23906
SD53	-2,82318	2,32250	1,73761	0,85726
SD54	-2,94053	2,30325	1,15097	0,53969
SD55				
SD56	-2,87887	2,25274	0,36679	0,29359
SD57	-2,92904	2,18288	0,86815	1,44610
SD58	-2,93506	2,19071	1,01633	1,31692
SD59	-2,95319	2,26842	1,46260	0,03491
SD60	-2,90767	2,17572	0,34212	1,56422
MÉDIA	-2,89377	2,27054		
DESVIO-PADRÃO	0,04063	0,06062		
VARIÂNCIA	0,00165	0,00367		

Tabela 5.9. – Logaritmo da amplitude (A_μ) e expoente crítico da Análise de Dimensão de Cobertura Mínima efetuada com o tratamento 1 para o defeito falta de fusão e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Fusão				
Sinal			Critério de Chauvenet	
	Log (A_μ)	μ	r(Log (A_μ))	r(μ)
FF01	0,27715	0,60226	1,41988	0,63538
FF02	0,21932	0,5993	0,41976	0,57485
FF03				
FF04	0,15347	0,63597	0,71912	1,32478
FF05	0,12369	0,47915	1,23404	1,88219
FF06				
FF07				
FF08	0,27093	0,65145	1,31231	1,64133
FF09	0,25774	0,64724	1,08420	1,55523
FF10	0,26904	0,56355	1,27963	0,15635
FF11	0,24161	0,58117	0,80516	0,20417
FF12	0,16837	0,64602	0,46138	1,53028
FF13				
FF14				
FF15	0,20199	0,64681	0,12005	1,54644
FF16	0,20074	0,65747	0,09843	1,76444
FF17	0,27917	0,65091	1,45482	1,63029
FF18	0,25182	0,61432	0,98182	0,88201
FF19	0,20953	0,65515	0,25045	1,71700
FF20	0,16149	0,63929	0,58037	1,39265
FF21	0,14400	0,62345	0,88284	1,06872
FF22				
FF23	0,18781	0,55214	0,12518	0,38959
FF24	0,19988	0,56240	0,08356	0,17977
FF25				
FF26				
FF27				
FF28	0,12787	0,52491	1,16180	0,94645
FF29	0,11078	0,53561	1,45736	0,72763
FF30	0,12008	0,54954	1,29652	0,44276
FF31	0,13102	0,58797	1,10732	0,34315
FF32	0,23544	0,55445	0,69854	0,34235
FF33	0,29115	0,53867	1,66200	0,66505
FF34	0,27669	0,57987	1,41193	0,17750
FF35	0,09345	0,58871	1,75706	0,35828
FF36	0,14374	0,59593	0,88734	0,50593
FF37	0,18252	0,55028	0,21667	0,42763
FF38	0,16924	0,56606	0,44634	0,10492
FF39	0,23837	0,55211	0,74921	0,39020
FF40	0,20198	0,50711	0,11988	1,31046
FF41	0,21892	0,49130	0,41284	1,63378
FF42	0,15792	0,56759	0,64211	0,07363
FF43	0,11432	0,55861	1,39613	0,25727
FF44	0,25774	0,59331	1,08427	0,45227
FF45				
FF46	0,15634	0,57711	0,66943	0,12106
FF47	0,13196	0,61486	1,09106	0,89305
FF48	0,24711	0,52832	0,90036	0,87671
FF49	0,28710	0,55866	1,59196	0,25625
FF50	0,28095	0,54645	1,48553	0,50605
FF51	0,11572	0,56071	1,37192	0,21433
FF52	0,12879	0,53511	1,14589	0,73786
FF53	0,19490	0,48967	0,00257	1,66712
FF54	0,23711	0,51268	0,72742	1,19656
FF55	0,28175	0,47810	1,49943	1,90373
FF56	0,15401	0,55346	0,70973	0,36259
FF57	0,20893	0,54492	0,24007	0,53724
FF58	0,20926	0,54660	0,24578	0,50288
FF59	0,12696	0,57706	1,17754	0,12003
FF60	0,20893	0,54492	0,24007	0,53724
MÉDIA	0,19505	0,57119		
DESVIO-PADRÃO	0,05782	0,04890		
VARIÂNCIA	0,00334	0,00239		

Tabela 5.10. – Logaritmo da amplitude (A_μ) e expoente crítico da Análise de Dimensão de Cobertura Mínima efetuada com o tratamento 1 para o defeito falta de penetração e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Penetração				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_μ)	**μ**	**r(Log (A_μ))**	**r(μ)**
FP01	0,14778	0,58972	1,24067	0,55770
FP02				
FP03	0,13073	0,57457	1,43908	0,93977
FP04	0,15013	0,57555	1,21333	0,91506
FP05	0,14251	0,53904	1,30202	1,83589
FP06	0,13833	0,56700	1,35059	1,13071
FP07				
FP08				
FP09				
FP10	0,17226	0,53425	0,95581	1,95662
FP11	0,13456	0,65612	1,39451	1,11687
FP12	0,13456	0,65612	1,39451	1,11687
FP13	0,26039	0,64078	0,06972	0,72991
FP14	0,32447	0,57335	0,81541	0,97059
FP15				
FP16	0,37747	0,57213	1,43208	1,00121
FP17	0,12840	0,63946	1,46619	0,69672
FP18	0,36880	0,58269	1,33125	0,73499
FP19	0,35590	0,53751	1,18114	1,87440
FP20	0,35200	0,56449	1,13575	1,19398
FP21	0,35047	0,64940	1,11800	0,94740
FP22				
FP23				
FP24	0,31891	0,58977	0,75073	0,55633
FP25	0,25305	0,58544	0,01569	0,66561
FP26	0,26458	0,55395	0,11848	1,45980
FP27	0,28046	0,61887	0,30327	0,17745
FP28	0,33765	0,60249	0,96877	0,23564
FP29	0,25287	0,60878	0,01778	0,07701
FP30	0,29621	0,63440	0,48655	0,56908
FP31	0,29621	0,63440	0,48655	0,56911
FP32	0,20430	0,67792	0,58297	1,66666
FP33	0,19982	0,65335	0,63507	1,04702
FP34	0,19919	0,64959	0,64244	0,95219
FP35	0,22816	0,61409	0,30532	0,05690
FP36	0,12809	0,66403	1,46980	1,31636
FP37	0,13777	0,64780	1,35716	0,90705
FP38	0,27758	0,68347	0,26976	1,80663
FP39	0,33588	0,68559	0,94817	1,86009
FP40	0,33004	0,64842	0,88023	0,92268
FP41	0,41585	0,57010	1,87875	1,05250
FP42	0,41054	0,60238	1,81696	0,23842
FP43	0,25537	0,67270	0,01131	1,53501
FP44	0,24036	0,65433	0,16336	1,07173
FP45	0,38386	0,56762	1,50650	1,11505
FP46	0,31040	0,58926	0,65167	0,56930
FP47	0,40622	0,62396	1,76663	0,30582
FP48	0,20614	0,66464	0,56156	1,33182
FP49	0,20439	0,60688	0,58193	0,12493
FP50	0,32349	0,62346	0,80399	0,29321
FP51				
FP52	0,27199	0,58017	0,20474	0,79867
FP53	0,25389	0,59494	0,00591	0,42605
FP54	0,26974	0,60706	0,17853	0,12039
FP55	0,28323	0,60184	0,33549	0,25204
FP56	0,25768	0,58914	0,03817	0,57232
FP57	0,19257	0,59369	0,71947	0,45758
FP58	0,16371	0,60848	1,05530	0,08458
FP59	0,12931	0,63617	1,45560	0,61375
FP60	0,24043	0,62400	0,16254	0,30683
MÉDIA	0,25440	0,61183		
DESVIO-PADRÃO	0,08594	0,03965		
VARIÂNCIA	0,00738	0,00157		

Tabela 5.11. – Logaritmo da amplitude (A_μ) e expoente crítico da Análise de Dimensão de Cobertura Mínima efetuada com o tratamento 1 para o defeito porosidade e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Porosidade				
Sinal			Critério de Chauvenet	
	Log (A_μ)	μ	r(Log (A_μ))	r(μ)
PO01	0,13524	0,693904	0,16653	1,73423
PO02	0,18776	0,64102	0,65546	0,55296
PO03				
PO04				
PO05	0,25441	0,68689	1,27604	1,57760
PO06	0,22859	0,69069	1,03563	1,66244
PO07	0,25121	0,64096	1,24622	0,55166
PO08	0,22776	0,60502	1,02790	0,25110
PO09	0,18716	0,63618	0,64991	0,44489
PO10	0,24387	0,58951	1,17788	0,59754
PO11	0,24774	0,58712	1,21391	0,65092
PO12	0,29644	0,64077	1,66730	0,54742
PO13	0,05985	0,53839	0,53535	1,73936
PO14	0,01797	0,64141	0,92526	0,56171
PO15	0,05471	0,67976	0,58317	1,41830
PO16	-0,05530	0,67602	1,60741	1,33477
PO17	0,09116	0,61084	0,24386	0,12110
PO18	0,13752	0,58686	0,18776	0,65673
PO19	0,30818	0,61244	1,77661	0,08537
PO20				
PO21				
PO22	0,15462	0,56519	0,34696	1,14075
PO23	0,24582	0,53704	1,19604	1,76951
PO24				
PO25	0,11827	0,59855	0,00854	0,39562
PO26				
PO27				
PO28				
PO29	0,05067	0,57874	0,62082	0,83810
PO30	-0,06625	0,65971	1,70935	0,97046
PO31	-0,01516	0,64402	1,23370	0,62001
PO32	0,15777	0,57319	0,37629	0,96206
PO33	0,05067	0,57874	0,62082	0,83810
PO34	-0,00455	0,61881	1,13492	0,05691
PO35	-0,04296	0,62913	1,49252	0,28742
PO36	0,02190	0,63600	0,88872	0,44083
PO37	-0,06677	0,65342	1,71419	0,82997
PO38	0,05161	0,62411	0,61207	0,17530
PO39	0,07766	0,58863	0,36952	0,61719
PO40	0,05676	0,54042	0,56412	1,69402
PO41	0,01421	0,60507	0,96026	0,24998
PO42	0,19028	0,52985	0,67896	1,93011
PO43	-0,05369	0,63757	1,59242	0,47594
PO44	-0,06704	0,68358	1,71671	1,50363
PO45	0,04731	0,59552	0,65206	0,46329
PO46	0,09043	0,62139	0,25065	0,11454
PO47	0,12758	0,66243	0,09522	1,03122
PO48	0,05237	0,69726	0,60499	1,80919
PO49	0,13771	0,61779	0,18953	0,03413
PO50	0,20836	0,58736	0,84728	0,64556
PO51	0,20456	0,62650	0,81190	0,22868
PO52	0,09881	0,69343	0,17263	1,72364
PO53	0,07047	0,66640	0,43648	1,11989
PO54	0,18789	0,56020	0,65671	1,25221
PO55	0,19968	0,56208	0,76647	1,21022
PO56	0,05784	0,64680	0,55407	0,68210
PO57	0,16836	0,56931	0,47488	1,04873
PO58	0,15032	0,55220	0,30693	1,43090
PO59	0,29080	0,63532	1,61477	0,42568
PO60	0,27965	0,58972	1,51100	0,59284
MÉDIA	0,11735	0,61626		
DESVIO-PADRÃO	0,10741	0,04477		
VARIÂNCIA	0,01154	0,00200		

Tabela 5.12. – Logaritmo da amplitude (A_μ) e expoente crítico da Análise de Dimensão de Cobertura Mínima efetuada com o tratamento 1 para a categoria sem defeito e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Sem Defeito				
Sinal			Critério de Chauvenet	
	Log (A_μ)	μ	r(Log (A_μ))	r(μ)
SD01				
SD02				
SD03	0,07353	0,56673	0,20379	1,33030
SD04	-0,08856	0,67917	1,55289	1,35936
SD05	0,12090	0,54528	0,71717	1,84340
SD06				
SD07				
SD08	-0,04358	0,60205	1,06541	0,48541
SD09	0,09560	0,55252	0,44298	1,67021
SD10	-0,03665	0,62995	0,99031	0,18198
SD11	0,10450	0,67924	0,53944	1,36104
SD12	-0,03665	0,62995	0,99031	0,18198
SD13				
SD14				
SD15	0,16967	0,62210	1,24573	0,00580
SD16				
SD17	0,09273	0,65321	0,41188	0,73838
SD18	-0,03091	0,69962	0,92810	1,84854
SD19	0,21318	0,57259	1,71728	1,19012
SD20	0,21318	0,57259	1,71728	1,19012
SD21				
SD22	0,06308	0,64305	0,09056	0,49529
SD23	0,08125	0,59761	0,28743	0,59162
SD24	0,19980	0,54321	1,57222	1,89292
SD25	0,21950	0,67102	1,78577	1,16431
SD26				
SD27	0,05100	0,67095	0,04038	1,16273
SD28				
SD29				
SD30				
SD31				
SD32				
SD33				
SD34	-0,00760	0,67619	0,67547	1,28808
SD35	0,14619	0,61013	0,99126	0,29213
SD36	-0,00674	0,66343	0,66615	0,98285
SD37	-0,02533	0,59679	0,86762	0,61124
SD38	-0,05606	0,65802	1,20067	0,85344
SD39	0,03526	0,63871	0,21101	0,39153
SD40	0,03202	0,62539	0,24608	0,07290
SD41				
SD42	0,03664	0,68426	0,19601	1,48112
SD43	0,08280	0,57847	0,30420	1,04947
SD44	-0,08161	0,66593	1,47753	1,04265
SD45				
SD46	-0,00364	0,63873	0,63259	0,39200
SD47				
SD48	0,16925	0,60310	1,24118	0,46025
SD49	0,21253	0,58478	1,71023	0,89853
SD50	0,08631	0,61876	0,34230	0,08574
SD51	0,11280	0,60155	0,62940	0,49737
SD52	0,02135	0,61560	0,36175	0,16128
SD53	0,10390	0,62701	0,53293	0,11156
SD54	-0,01808	0,59541	0,78905	0,64425
SD55	0,08748	0,59849	0,35498	0,57057
SD56	0,08073	0,58872	0,28182	0,80428
SD57				
SD58	-0,09764	0,64482	1,65130	0,53768
SD59	-0,07862	0,68373	1,44512	1,46844
SD60	-0,04973	0,58719	1,13206	0,84088
MÉDIA	0,05473	0,62234		
DESVIO-PADRÃO	0,09227	0,04180		
VARIÂNCIA	0,00851	0,00175		

Tabela 5.13. – Logaritmo da amplitude (A_H) e expoente crítico da Análise de Hurst efetuada com o tratamento 2 para o defeito falta de fusão das duas regiões encontradas e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Fusão								
Sinal	**Região 1**				**Região 2**			
			Critério de Chauvenet				**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_{H1})	***H_1***	**r(Log (A_{H1}))**	**r (*H_1*)**	**Log (A_{H2})**	***H_2***	**r(Log (A_{H2}))**	**r(*H_2*)**
FF01	-0,24823	0,89599	1,56147	1,27853	0,37151	0,43479	0,91638	0,54537
FF02	-0,24774	0,88869	1,60169	1,98155	0,39636	0,42525	0,81811	0,51083
FF03	-0,26401	0,90587	0,26620	0,32705	0,39274	0,42070	0,56544	1,01456
FF04	-0,27764	0,91716	0,85260	0,76022	0,36274	0,43872	1,52851	0,98047
FF05	-0,25824	0,90571	0,73982	0,34246	0,38623	0,42065	0,11105	1,02010
FF06	-0,27731	0,91710	0,82551	0,75445	0,36932	0,44607	1,06924	1,79420
FF09	-0,26905	0,90985	0,14750	0,05624	0,39438	0,41996	0,67991	1,09649
FF11	-0,27343	0,91368	0,50703	0,42509	0,40485	0,43456	1,41069	0,51990
FF13	-0,27786	0,91843	0,87066	0,88253	0,37292	0,43431	0,81797	0,49223
FF15	-0,27902	0,92018	0,96588	1,05106	0,39534	0,42363	0,74691	0,69018
MÉDIA	-0,26725	0,90927			0,38464	0,42986		
DESVIO-PADRÃO	0,01218	0,01038			0,01433	0,00903		
VARIÂNCIA	0,00015	0,00011			0,00021	0,00008		

Tabela 5.14. – Logaritmo da amplitude (A_H) e expoente crítico da Análise de Hurst efetuada com o tratamento 2 para o defeito falta de penetração das duas regiões encontradas e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Penetração								
Sinal	**Região 1**				**Região 2**			
			Critério de Chauvenet				**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_{H1})	***H_1***	**r(Log (A_{H1}))**	**r(*H_1*)**	**Log (A_{H2})**	***H_2***	**r(Log (A_{H2}))**	**r(*H_2*)**
FP02	-0,28396	0,92479	0,76156	0,78209	0,52771	0,35818	0,26790	1,49598
FP04	-0,30486	0,94418	0,82692	0,81807	0,50937	0,34796	0,51746	0,01090
FP06	-0,30241	0,94230	0,64071	0,66292	0,52061	0,35133	0,03614	0,50060
FP07	-0,30550	0,94483	0,87557	0,87171	0,50468	0,35069	0,71830	0,40760
FP08	-0,28408	0,92532	0,75244	0,73835	0,51877	0,34802	0,11494	0,01962
FP09	-0,27932	0,91955	1,11422	1,21452	0,50539	0,35514	0,68790	1,05424
FP10	-0,27833	0,92175	1,18946	1,03297	0,48336	0,34728	1,63127	0,08791
FP11	-0,31539	0,95438	1,62725	1,65983	0,53973	0,33539	0,78262	1,81567
FP12	-0,28532	0,92589	0,65820	0,69131	0,53717	0,34642	0,67300	0,21288
FP14	-0,30063	0,93968	0,50543	0,44671	0,56775	0,33844	1,98250	1,37247
MÉDIA	-0,29398	0,93427			0,52145	0,34789		
DESVIO-PADRÃO	0,01316	0,01212			0,02335	0,00688		
VARIÂNCIA	0,00017	0,00015			0,00055	0,00005		

Tabela 5.15. – Logaritmo da amplitude (A_H) e expoente crítico da Análise de Hurst efetuada com o tratamento 2 para o defeito porosidade das duas regiões encontradas e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Porosidade								
Sinal	Região 1				Região 2			
			Critério de Chauvenet				Critério de Chauvenet	
	Log (A_{H1})	H_1	r(Log (A_{H1}))	r(H_1)	Log (A_{H2})	H_2	r(Log (A_{H2}))	r(H_2)
PO01	-0,34757	0,99121	0,80583	1,19705	0,39361	0,38916	1,02973	1,74040
PO03	-0,34208	0,98458	0,48774	0,12503	0,39525	0,39709	0,77478	0,95458
PO05	-0,34675	0,98662	0,61262	0,28176	0,39608	0,41014	0,64575	0,33862
PO07	-0,33860	0,98027	1,30771	0,98448	0,39997	0,41063	0,04101	0,38718
PO09	-0,34104	0,98130	0,73279	0,77909	0,39675	0,41602	0,54159	0,92130
PO10	-0,34277	0,98241	0,32516	0,55774	0,40813	0,41291	1,22723	0,61311
PO11	-0,34330	0,98375	0,20028	0,29054	0,39766	0,40666	0,40012	0,00623
PO13	-0,34757	0,99121	0,80583	1,19705	0,40862	0,39480	1,30372	1,18151
PO14	-0,35217	0,99251	1,88969	1,45628	0,39545	0,40830	0,74370	0,15618
PO15	-0,33965	0,97821	1,06030	1,39526	0,41082	0,42152	1,64573	1,46633
MÉDIA	-0,34415	0,98521			0,40023	0,40672		
DESVIO-PADRÃO	0,00424	0,00501			0,00643	0,01009		
VARIÂNCIA	0,00002	0,00003			0,00004	0,00010		

Tabela 5.16. – Logaritmo da amplitude (A_H) e expoente crítico da Análise de Hurst efetuada com o tratamento 2 para a categoria sem defeito das duas regiões encontradas e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Sem Defeito								
Sinal	Região 1				Região 2			
			Critério de Chauvenet		Coeficientes		Critério de Chauvenet	
	Log (A_{H1})	H_1	r(Log (A_{H1}))	r(H_1)	Log (A_{H2})	H_2	r(Log (A_{H2}))	r(H_2)
SD01	-0,30780	0,94561	1,56280	1,55656	0,46446	0,40941	1,64522	0,18484
SD02	-0,31262	0,95124	1,21548	1,18559	0,43293	0,41510	1,70234	0,63183
SD03	-0,34524	0,98582	1,13506	1,09294	0,45176	0,40374	0,29685	0,26057
SD04	-0,33111	0,97112	0,11688	0,12434	0,45452	0,40652	0,58988	0,04218
SD05	-0,33082	0,97072	0,09598	0,09798	0,45190	0,39339	0,31172	1,07364
SD06	-0,33883	0,97926	0,67317	0,66070	0,44338	0,40024	0,59286	0,53552
SD08	-0,31791	0,95588	0,83429	0,87985	0,45771	0,42473	0,92857	1,38833
SD10	-0,32176	0,96076	0,55687	0,55830	0,44684	0,42621	0,22551	1,50460
SD12	-0,34484	0,98600	1,10624	1,10480	0,43706	0,40568	1,26385	0,10817
SD14	-0,34395	0,98592	1,04211	1,09953	0,44908	0,38555	0,01232	1,68952
MÉDIA	-0,32949	0,96923			0,44896	0,40706		
DESVIO-PADRÃO	0,01388	0,01518			0,00942	0,01273		
VARIÂNCIA	0,00019	0,00023			0,00009	0,00016		

Tabela 5.17. – Logaritmo da amplitude (A_α) e expoente crítico da Análise de Flutuação das Não-tendências efetuada com o tratamento 2 para o defeito falta de fusão e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Fusão				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_α)	**α**	**r (Log(A_α))**	**r (α)**
FF01	-2,59872	1,99524	0,75211	0,02186
FF02	-2,60345	2,02710	0,61732	1,18517
FF03	-2,59696	2,03091	0,80222	1,32430
FF04	-2,59853	2,01334	0,75744	0,68262
FF05	-2,57524	1,99709	1,42053	0,08939
FF06	-2,64835	1,95683	0,66115	1,38043
FF09	-2,62991	2,00820	0,13616	0,49505
FF11	-2,67803	1,99742	1,50620	0,10162
FF12	-2,66051	1,96359	1,00739	1,13332
FF13	-2,66161	1,95667	1,03872	1,38627
MÉDIA	-2,62514	1,99464		
DESVIO-PADRÃO	0,03512	0,02739		
VARIÂNCIA	0,00123	0,00075		

Tabela 5.18. – Logaritmo da amplitude (A_α) e expoente crítico da Análise de Flutuação das Não-tendências efetuada com o tratamento 2 para o defeito falta de penetração e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Penetração				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_α)	**α**	**r (Log(A_α))**	**r (α)**
FP04	-2,58188	1,99189	0,65733	0,53865
FP05	-2,59930	1,99636	1,07361	0,67311
FP06	-2,52144	2,01435	0,78715	1,21370
FP07	-2,57818	1,94480	0,56893	0,87689
FP08	-2,54184	1,93218	0,29958	1,25609
FP09	-2,56678	1,92513	0,29626	1,46814
FP10	-2,47927	1,97496	1,79502	0,02992
FP11	-2,49880	1,98680	1,32834	0,38567
FP12	-2,59033	2,01855	0,85919	1,34001
FP14	-2,58596	1,95468	0,75477	0,57993
MÉDIA	-2,55438	1,97397		
DESVIO-PADRÃO	0,04184	0,03327		
VARIÂNCIA	0,00175	0,00111		

Tabela 5.19. – Logaritmo da amplitude (A_α) e expoente crítico da Análise de Flutuação das Não-tendências efetuada com o tratamento 2 para o defeito porosidade e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Porosidade				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_α)	α	**r (Log (A_α))**	**r (α)**
PO01	-2,59959	2,06416	1,04051	1,73652
PO03	-2,55658	1,98093	1,82404	1,63957
PO05	-2,62332	2,04863	0,60832	1,10661
PO07	-2,64171	2,03193	0,27331	0,42913
PO09	-2,73924	2,00570	1,50343	0,63473
PO10	-2,70296	1,99296	0,84246	1,15159
PO11	-2,71278	2,02583	1,02131	0,18180
PO12	-2,67472	2,02741	0,32805	0,24552
PO14	-2,66405	2,02088	0,13379	0,01906
PO15	-2,65216	2,01507	0,08286	0,25463
MÉDIA	-2,65671	2,02135		
DESVIO-PADRÃO	0,05489	0,02465		
VARIÂNCIA	0,00301	0,00061		

Tabela 5.20. – Logaritmo da amplitude (A_α) e expoente crítico da Análise de Flutuação das Não-tendências efetuada com o tratamento 2 para a categoria sem defeito e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Sem Defeito				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_α)	α	**r (Log (A_α)**	**r (α)**
SD01	-2,71807	1,96744	0,82377	1,32293
SD02	-2,73523	2,02589	1,45369	0,64962
SD03	-2,73387	2,01018	1,40398	0,11937
SD04	-2,66894	1,97762	0,98044	0,97955
SD05	-2,67158	2,04534	0,88358	1,30627
SD08	-2,67784	1,99231	0,65353	0,48372
SD11	-2,66559	2,04391	1,10331	1,25784
SD12	-2,69492	2,02330	0,02647	0,56244
SD13	-2,71292	1,96542	0,63463	1,39131
SD14	-2,67743	2,01499	0,66873	0,28198
MÉDIA	-2,69564	2,00664		
DESVIO-PADRÃO	0,02723	0,02963		
VARIÂNCIA	0,00074	0,00088		

Tabela 5.21. – Logaritmo da amplitude (A_μ) e expoente crítico da Análise de Cobertura Mínima efetuada com o tratamento 2 para o defeito falta de fusão e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Fusão				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_μ)	**μ**	**r (Log (A_μ))**	**r (μ)**
FF01	0,45366	0,61674	1,06975	0,29660
FF03	0,43895	0,62744	0,63551	0,95957
FF04	0,42830	0,63444	0,32109	1,39345
FF05	0,46876	0,63319	1,51556	1,31621
FF09	0,44623	0,61355	0,85047	0,09844
FF10	0,38788	0,59749	0,87265	0,89700
FF11	0,40019	0,59107	0,50912	1,29443
FF12	0,39811	0,59191	0,57045	1,24280
FF13	0,37783	0,61019	1,16934	0,10976
FF15	0,37439	0,60356	1,27080	0,52027
MÉDIA	0,41743	0,61196		
DESVIO-PADRÃO	0,03387	0,01613		
VARIÂNCIA	0,00115	0,00026		

Tabela 5.22. – Logaritmo da amplitude (A_μ) e expoente crítico da Análise de Cobertura Mínima efetuada com o tratamento 2 para o defeito falta de penetração e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Penetração				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_μ)	**μ**	**r (Log (A_μ))**	**r (μ)**
FP04	0,47855	0,63056	0,24733	0,44366
FP05	0,45780	0,62937	1,22993	0,49538
FP06	0,49959	0,67883	0,74839	1,65976
FP07	0,47028	0,62596	0,63912	0,64406
FP08	0,47268	0,64357	0,52522	0,12333
FP10	0,50856	0,64673	1,17336	0,26081
FP11	0,46051	0,67399	1,10168	1,44890
FP12	0,51625	0,63502	1,53732	0,24949
FP13	0,47615	0,62239	0,36128	0,79988
FP14	0,49219	0,61082	0,39816	1,30399
MÉDIA	0,48378	0,64075		
DESVIO-PADRÃO	0,02112	0,02295		
VARIÂNCIA	0,00045	0,00053		

Tabela 5.23. – Logaritmo da amplitude (A_μ) e expoente crítico da Análise de Cobertura Mínima efetuada com o tratamento 2 para o defeito porosidade e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Porosidade				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_μ)	**μ**	**r (Log (A_μ))**	**r (μ)**
PO01	0,35837	0,66574	0,54973	1,20866
PO03	0,36809	0,66531	0,87762	1,19361
PO05	0,37351	0,65298	1,06032	0,76522
PO06	0,33643	0,60660	0,19037	0,84568
PO08	0,30423	0,59740	1,27614	1,16566
PO09	0,29064	0,58716	1,73462	1,52148
PO12	0,31225	0,63554	1,00585	0,15934
PO13	0,35084	0,64788	0,29590	0,58802
PO14	0,36593	0,60847	0,80477	0,78089
PO15	0,36041	0,64243	0,61863	0,39886
MÉDIA	0,34207	0,63095		
DESVIO-PADRÃO	0,02965	0,02879		
VARIÂNCIA	0,00088	0,00083		

Tabela 5.24. – Logaritmo da amplitude (A_μ) e expoente crítico da Análise de Cobertura Mínima efetuada com o tratamento 2 para a categoria sem defeito e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Sem Defeito				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_μ)	**μ**	**r (Log (A_μ))**	**r (μ)**
SD02	0,35763	0,57166	1,13561	0,48017
SD03	0,36546	0,56905	0,84873	0,69649
SD04	0,41499	0,58400	0,96647	0,54515
SD05	0,41512	0,59298	0,97109	1,29104
SD08	0,41648	0,57542	1,02090	0,16760
SD10	0,35835	0,55991	1,10937	1,45583
SD11	0,40835	0,59778	0,72310	1,68906
SD12	0,41203	0,56692	0,85792	0,87304
SD13	0,38302	0,58462	0,20520	0,59681
SD14	0,35477	0,57203	1,24057	0,44894
MÉDIA	0,38863	0,57744		
DESVIO-PADRÃO	0,02729	0,01204		
VARIÂNCIA	0,00074	0,00015		

Tabela 5.25. – Logaritmo da amplitude (A_H) e expoente crítico da Análise de Hurst efetuada com o tratamento 3 para o defeito falta de fusão e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Fusão				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_H)	***H***	**r (Log (A_H))**	**r (H*)***
FF11	-0,34923	0,98011	0,36826	1,12636
FF16	-0,35202	0,97840	0,04904	0,74299
FF19	-0,35090	0,97420	0,17741	0,19940
FF20	-0,34477	0,97211	0,87913	0,66779
FF29	-0,35396	0,97563	0,17304	0,12161
FF30	-0,36855	0,98273	1,84237	1,71297
FF33	-0,35954	0,97681	0,81137	0,38564
FF35	-0,35608	0,97089	0,41595	0,94147
FF45	-0,35396	0,97104	0,17327	0,90782
FF53	-0,33547	0,96897	1,94217	1,37307
MÉDIA	-0,35245	0,97509		
DESVIO-PADRÃO	0,00874	0,00446		
VARIÂNCIA	0,00008	0,00002		

Tabela 5.26. – Logaritmo da amplitude (A_H) e expoente crítico da Análise de Hurst efetuada com o tratamento 3 para o defeito falta de penetração e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Penetração				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_H)	***H***	**r (Log (A_H))**	**r (H*)***
FP01	-0,30707	0,93951	0,88441	0,42843
FP19	-0,29712	0,93824	0,14206	0,22786
FP23	-0,30899	0,94902	1,08178	1,92896
FP32	-0,31390	0,94468	1,58810	1,24505
FP35	-0,28840	0,93230	1,04055	0,70837
FP40	-0,29105	0,92924	0,76759	1,19219
FP42	-0,29880	0,93753	0,03160	0,11614
FP51	-0,30405	0,93357	0,57267	0,50875
FP57	-0,28603	0,93345	1,28588	0,52706
FP60	-0,28955	0,93039	0,92248	1,01009
MÉDIA	-0,29850	0,93680		
DESVIO-PADRÃO	0,00970	0,00634		
VARIÂNCIA	0,00009	0,00004		

Tabela 5.27. – Logaritmo da amplitude (A_H) e expoente crítico da Análise de Hurst efetuada com o tratamento 3 para o defeito porosidade e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Porosidade				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_H)	***H***	**r (Log (A_H))**	**r (*H*)**
PO05	-0,34630	0,96729	0,03401	0,12656
PO12	-0,33854	0,96460	0,88907	0,56553
PO14	-0,34998	0,97214	0,47148	1,37742
PO23	-0,33486	0,96600	1,32725	0,20608
PO25	-0,35903	0,97017	1,54685	0,86867
PO27	-0,35894	0,96285	1,53638	1,01730
PO31	-0,33935	0,96525	0,79361	0,39818
PO38	-0,33916	0,96599	0,81501	0,20711
PO39	-0,34471	0,96087	0,15512	1,52760
PO40	-0,34931	0,97280	0,39136	1,54916
MÉDIA	-0,34602	0,96680		
DESVIO-PADRÃO	0,00841	0,00388		
VARIÂNCIA	0,00007	0,00002		

Tabela 5.28. – Logaritmo da amplitude (A_H) e expoente crítico da Análise de Hurst efetuada com o tratamento 3 para a categoria sem defeito e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Sem Defeito				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_H)	***H***	**r (Log (A_H))**	**r (*H*)**
SD05	-0,27110	0,91584	0,79366	1,09424
SD06	-0,27641	0,92841	0,39907	1,21029
SD08	-0,28047	0,92942	1,31068	1,39576
SD14	-0,26584	0,91151	1,97472	1,88859
SD19	-0,27163	0,92274	0,67488	0,17048
SD25	-0,27555	0,92425	0,20395	0,44841
SD30	-0,27825	0,92348	0,81086	0,30605
SD40	-0,27174	0,92318	0,64974	0,25157
SD45	-0,27858	0,91832	0,88474	0,64074
SD59	-0,27679	0,92094	0,48372	0,15900
MÉDIA	-0,27464	0,92181		
DESVIO-PADRÃO	0,00445	0,00545		
VARIÂNCIA	0,00002	0,00003		

Tabela 5.29. – Logaritmo da amplitude (A_α) e expoente crítico da Análise de Flutuação das Não-tendências efetuada com o tratamento 3 para o defeito falta de fusão e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Fusão				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_α)	α	**R (Log (A_α))**	**r (α)**
FF11	-3,12046	1,80749	0,04757	0,58815
FF17	-3,09177	1,80528	1,71418	0,26942
FF19	-3,11020	1,81646	0,64339	1,87713
FF20	-3,11384	1,80288	0,43207	0,07445
FF29	-3,11645	1,79620	0,28079	1,03422
FF30	-3,13413	1,80156	0,74575	0,26428
FF33	-3,11561	1,79209	0,32957	1,62583
FF35	-3,14079	1,80098	1,13297	0,34849
FF52	-3,11673	1,80071	0,26459	0,38671
FF53	-3,15286	1,81035	1,83343	0,99927
MÉDIA	-3,12129	1,80341		
DESVIO-PADRÃO	0,01722	0,00696		
VARIÂNCIA	0,00030	0,00005		

Tabela 5.30. – Logaritmo da amplitude (A_α) e expoente crítico da Análise de Flutuação das Não-tendências efetuada com o tratamento 3 para o defeito falta de penetração e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Penetração				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_α)	α	**r(Log (A_α))**	**r (α)**
FP01	-3,13405	1,89691	0,33243	0,41793
FP19	-3,14909	1,88670	0,42344	0,95303
FP29	-3,15461	1,88960	0,70134	0,80079
FP32	-3,15937	1,91296	0,94058	0,42291
FP35	-3,17072	1,88329	1,51112	1,13178
FP40	-3,10927	1,93715	1,57864	1,69009
FP42	-3,13050	1,93607	0,51098	1,63351
FP49	-3,14210	1,89625	0,07228	0,45267
FP51	-3,11102	1,90895	1,49065	0,21257
FP60	-3,14591	1,90102	0,26395	0,20288
MÉDIA	-3,14067	1,90489		
DESVIO-PADRÃO	0,01989	0,01909		
VARIÂNCIA	0,00040	0,00036		

Tabela 5.31. – Logaritmo da amplitude (A_α) e expoente crítico da Análise de Flutuação das Não-tendências efetuada com o tratamento 3 para o defeito porosidade e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Porosidade				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_α)	**α**	**r (Log (A_α))**	**r (α)**
PO05	-3,26248	1,98866	0,19461	1,08344
PO06	-3,26352	2,00920	0,16804	0,04248
PO12	-3,20377	2,00585	1,70050	0,14109
PO23	-3,21889	1,99129	1,31278	0,93929
PO25	-3,33114	2,01756	1,56644	0,50102
PO27	-3,25165	1,99812	0,47227	0,56503
PO31	-3,29073	2,01322	0,53009	0,26295
PO39	-3,27680	2,04322	0,17269	1,90794
PO40	-3,30886	1,98759	0,99515	1,14221
PO58	-3,29283	2,02952	0,58383	1,15667
MÉDIA	-3,27007	2,00843		
DESVIO-PADRÃO	0,03899	0,01824		
VARIÂNCIA	0,00152	0,00033		

Tabela 5.32. – Logaritmo da amplitude (A_α) e expoente crítico da Análise de Flutuação das Não-tendências efetuada com o tratamento 3 para a categoria sem defeito e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Sem Defeito				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_α)	**α**	**r (Log (A_α))**	**r (α)**
SD05	-3,38313	2,04538	0,70074	0,35413
SD08	-3,38873	2,04593	0,85375	0,43018
SD14	-3,39932	2,04105	1,14299	0,23892
SD19	-3,31321	2,04015	1,20827	0,36170
SD20	-3,31321	2,04015	1,20827	0,36170
SD29	-3,34750	2,04534	0,27192	0,34934
SD30	-3,32780	2,03467	0,81007	1,11343
SD43	-3,41394	2,05348	1,54218	1,46447
SD45	-3,33319	2,05211	0,66273	1,27633
SD54	-3,35459	2,02967	0,07839	1,79871
MÉDIA	-3,35747	2,04280		
DESVIO-PADRÃO	0,03662	0,00730		
VARIÂNCIA	0,00134	0,00005		

Tabela 5.33. – Logaritmo da amplitude (A_μ) e expoente crítico da Análise de Cobertura Mínima efetuada com o tratamento 3 para o defeito falta de fusão e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Fusão				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_μ)	**μ**	**r (Log (A_μ))**	**r (μ)**
FF03	0,22571	0,22280	0,53308	0,28518
FF16	0,23435	0,26930	0,36353	1,40989
FF17	0,22344	0,26786	0,76850	1,35761
FF20	0,24444	0,23313	1,40976	0,09130
FF29	0,23656	0,19828	0,59272	1,17909
FF30	0,22755	0,20662	0,34280	0,87501
FF33	0,21909	0,23268	1,21992	0,07501
FF35	0,21859	0,21631	1,27148	0,52193
FF45	0,24572	0,26116	1,54288	1,11324
FF52	0,23304	0,19809	0,22689	1,18584
MÉDIA	0,23085	0,23063		
DESVIO-PADRÃO	0,00964	0,02743		
VARIÂNCIA	0,00009	0,00075		

Tabela 5.34. – Logaritmo da amplitude (A_μ) e expoente crítico da Análise de Cobertura Mínima efetuada com o tratamento 3 para o defeito falta de penetração e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Falta de Penetração				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_μ)	**μ**	**r (Log (A_μ))**	**r (μ)**
FP22	0,35643	0,30714	1,16366	1,44777
FP23	0,35643	0,30714	1,16366	1,44777
FP29	0,25461	0,25259	0,95910	0,86286
FP32	0,25424	0,24993	0,96681	0,97549
FP40	0,34448	0,25432	0,91436	0,78976
FP41	0,36059	0,25296	1,25027	0,84732
FP49	0,26621	0,26348	0,71741	0,40152
FP51	0,27853	0,29685	0,46056	1,01168
FP57	0,24733	0,28537	1,11104	0,52569
FP60	0,28733	0,25984	0,27703	0,55595
MÉDIA	0,30062	0,27297		
DESVIO-PADRÃO	0,04797	0,02361		
VARIÂNCIA	0,00230	0,00056		

Tabela 5.35. – Logaritmo da amplitude (A_μ) e expoente crítico da Análise de Cobertura Mínima efetuada com o tratamento 3 para o defeito porosidade e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Porosidade				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A_μ)	**μ**	**r (Log (A_μ))**	**r (μ)**
PO03	0,27700	0,14189	1,33468	0,30691
PO05	0,37620	0,13649	1,54014	0,12043
PO13	0,30875	0,09409	0,41464	1,34415
PO14	0,27243	0,10839	1,46714	0,85031
PO23	0,34317	0,17039	0,58295	1,29155
PO25	0,37202	0,09387	1,41880	1,35189
PO27	0,31553	0,15634	0,21816	0,80614
PO31	0,31220	0,12558	0,31455	0,25650
PO39	0,32574	0,12786	0,07766	0,17773
PO58	0,32753	0,17514	0,12962	1,45554
MÉDIA	0,32306	0,13300		
DESVIO-PADRÃO	0,03451	0,02895		
VARIÂNCIA	0,00119	0,00084		

Tabela 5.36. – Logaritmo da amplitude (A_μ) e expoente crítico da Análise de Cobertura Mínima efetuada com o tratamento 3 para a categoria sem defeito e seus respectivos valores r do Critério de Chauvenet.

Sem Defeito				
Sinal			**Critério de Chauvenet**	
	Log (A	**μ**	**r (Linear)**	**r (μ)**
SD05	0,14108	0,15709	0,56668	1,04208
SD06	0,16465	0,15971	0,21567	0,95421
SD19	0,15448	0,22822	0,12205	1,34710
SD20	0,15448	0,22822	0,12205	1,34710
SD29	0,21600	0,17923	1,92002	0,29856
SD36	0,13957	0,15875	0,61680	0,98646
SD40	0,18961	0,22575	1,04416	1,26423
SD45	0,16497	0,19091	0,22623	0,09379
SD54	0,15389	0,16320	0,14160	0,83697
SD59	0,10281	0,19008	1,83689	0,06608
MÉDIA	0,15815	0,18811		
DESVIO-PADRÃO	0,03013	0,02977		
VARIÂNCIA	0,00091	0,00089		

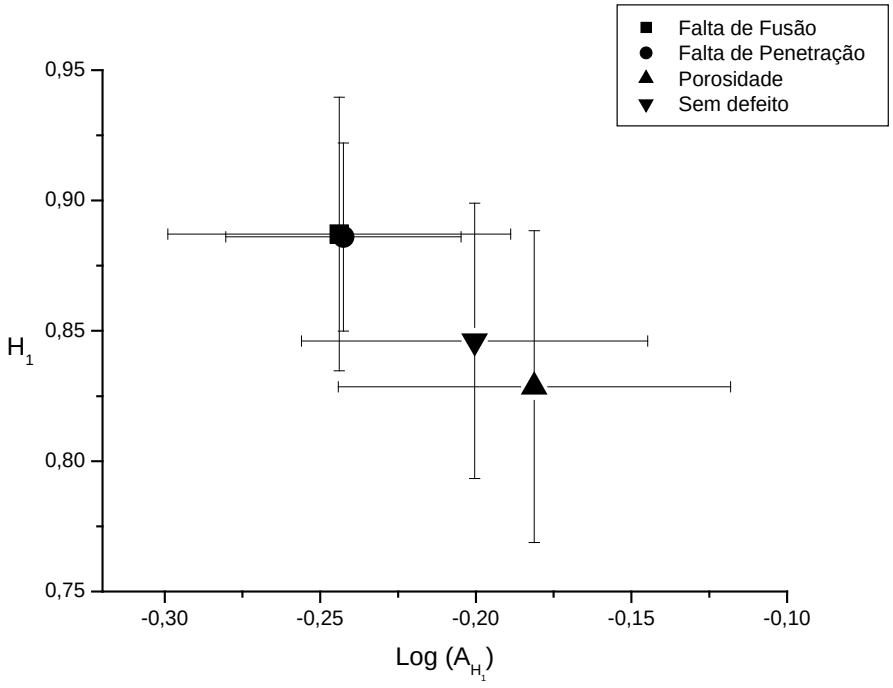

*Figura 69 – Log (A_H) versus expoente de Hurst (H) da Análise R/S para a **Região 1** – Tratamento 1.*

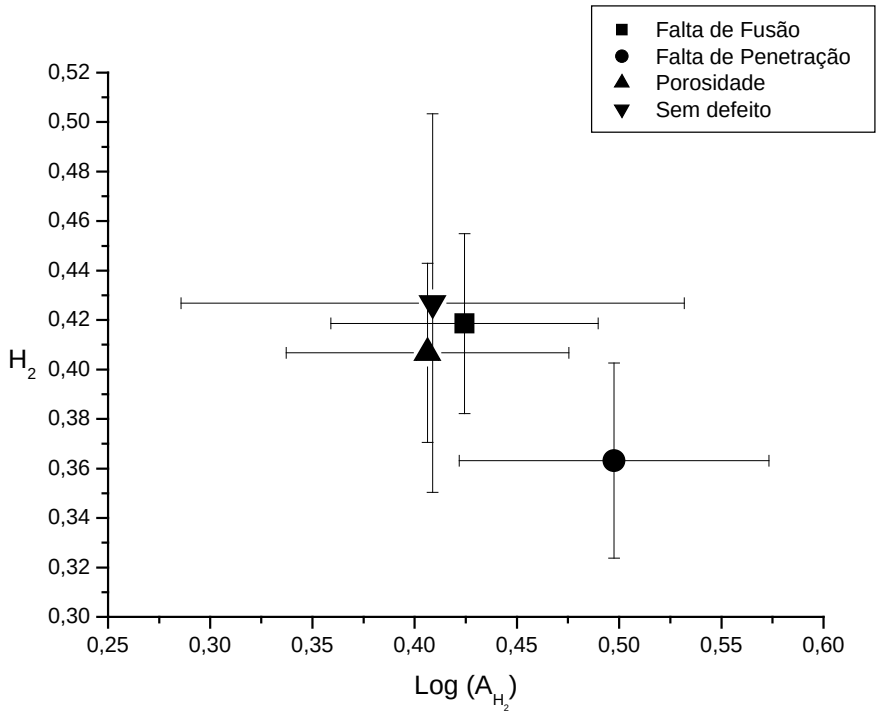

*Figura 70 – Log (A_H) versus expoente de Hurst (H)da Análise R/S para a **Região 2** – Tratamento 1.*

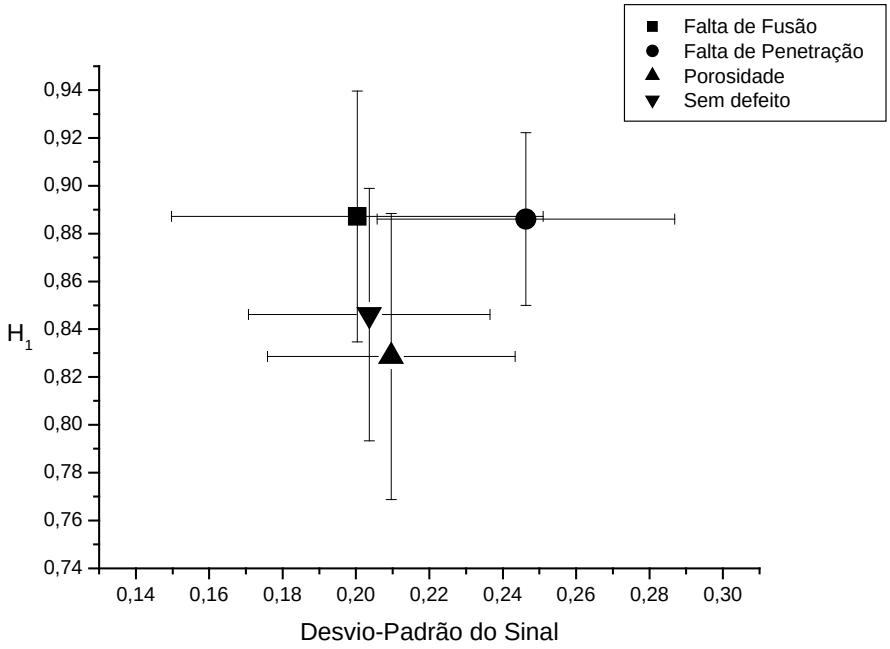

*Figura 71 – Desvio-Padrão do sinal tratado versus expoente de Hurst (H) para a **Região 1** – Tratamento 1.*

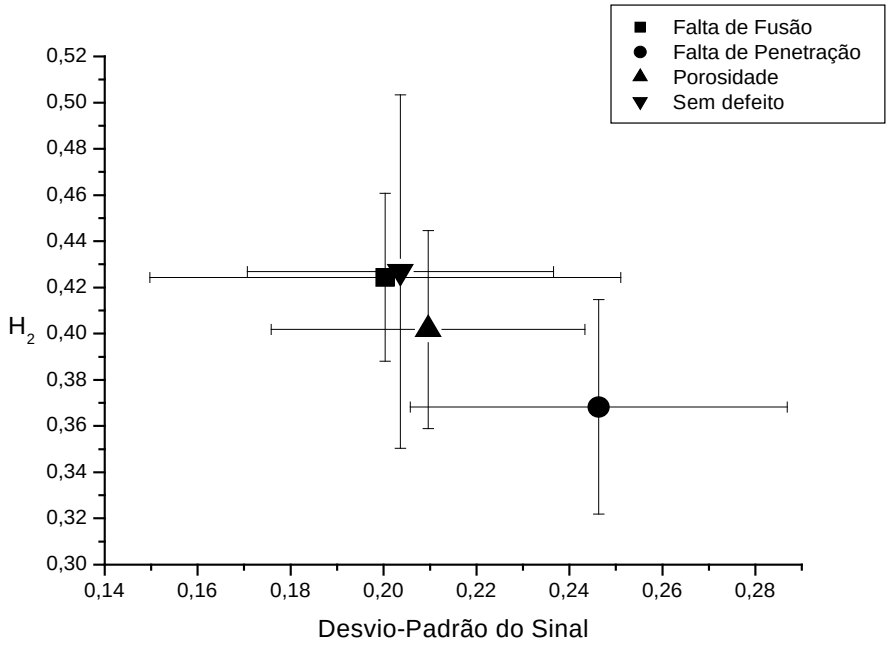

*Figura 72 – Desvio-Padrão do sinal tratado versus expoente de Hurst (H) para a **Região 2** – Tratamento 1.*

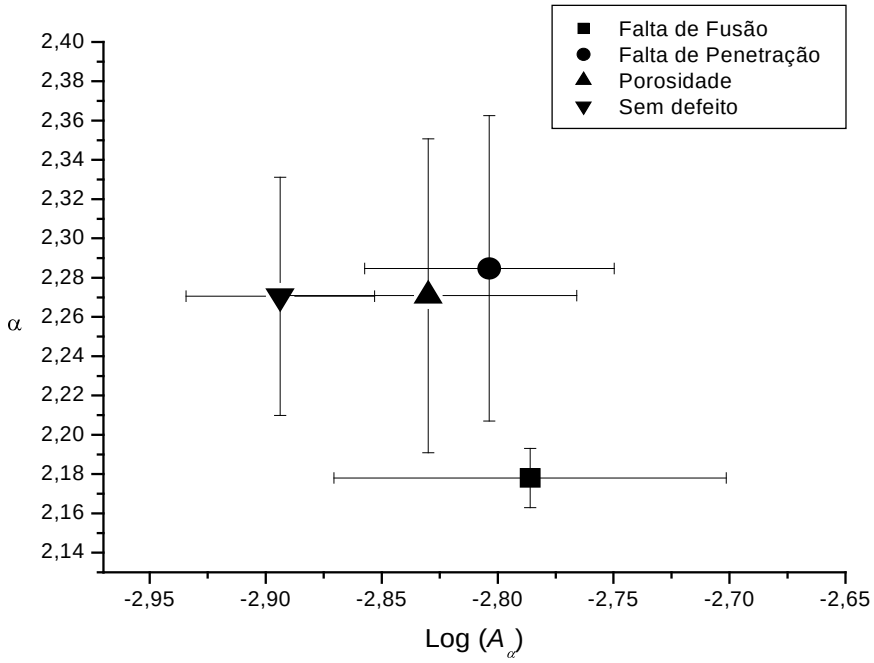

Figura 73 – Log (A_α) versus expoente de escala (α) da DFA – Tratamento 1.

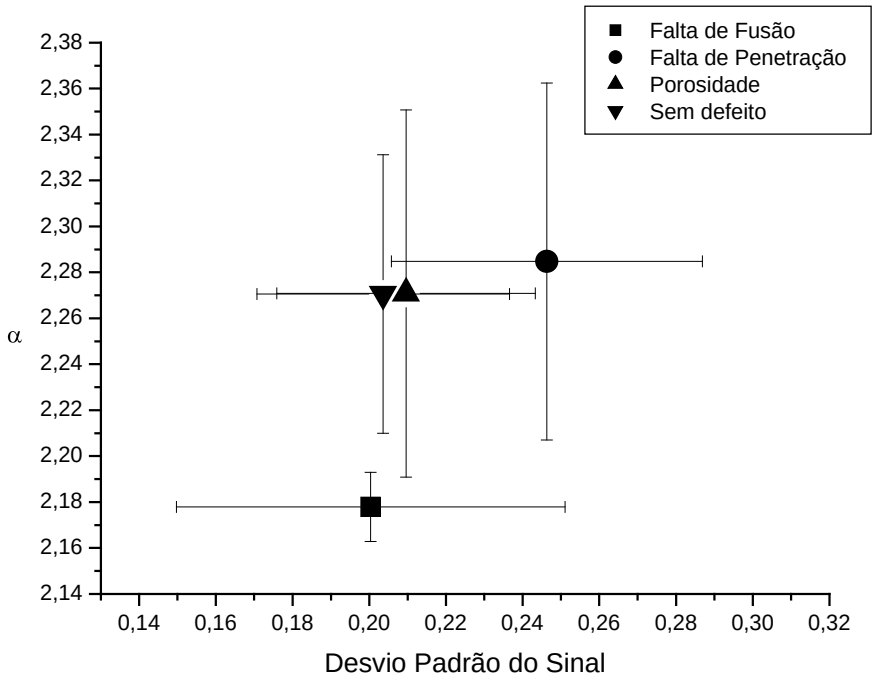

Figura 74 – Desvio-Padrão do sinal tratado versus expoente de escala (α) – Tratamento 1.

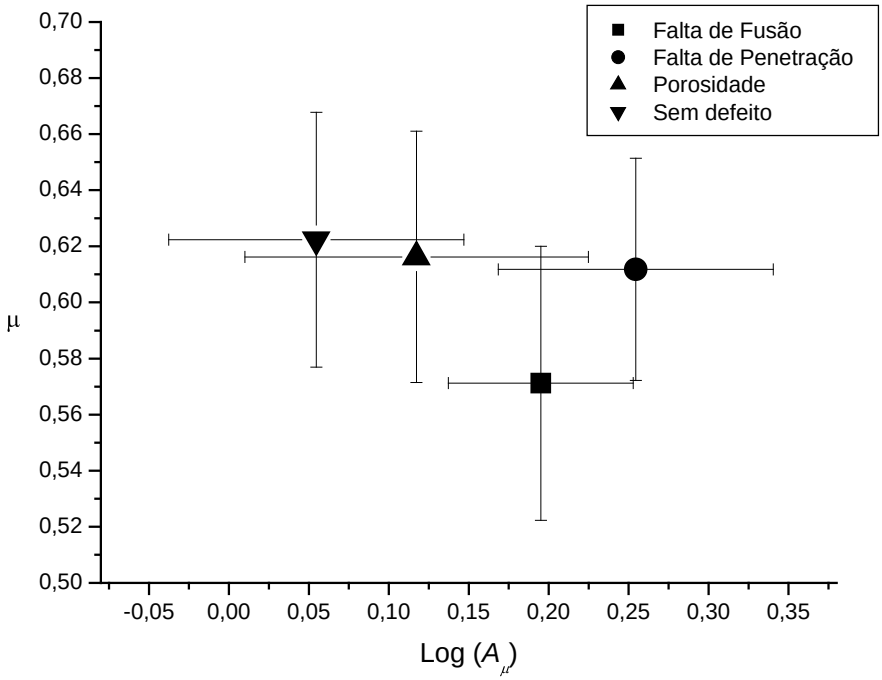

Figura 75 – Log (A_μ) versus índice de variação (μ) da Análise de Cobertura Mínima – Tratamento 1.

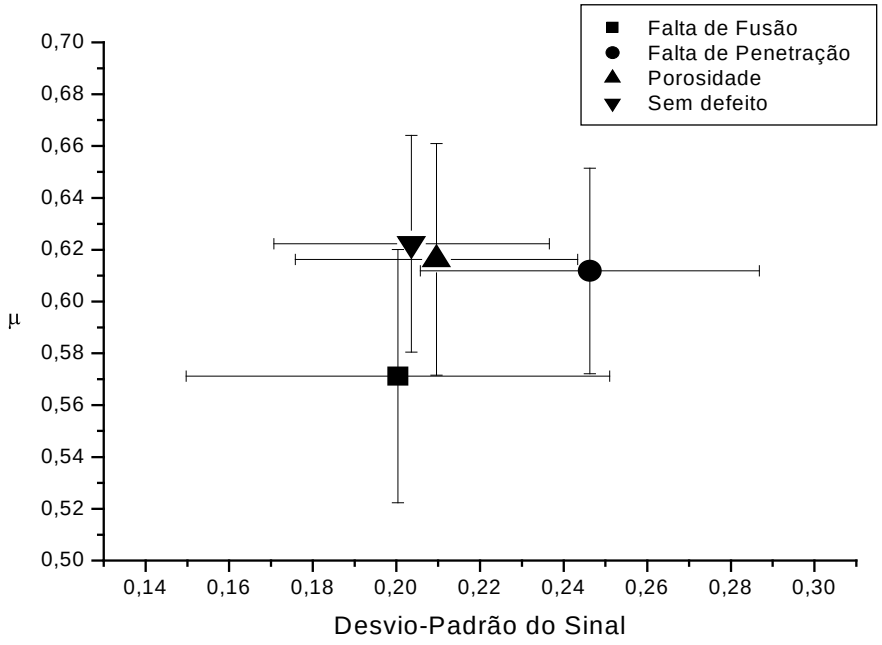

Figura 76 – Desvio-Padrão do sinal tratado versus índice de variação (μ) – Tratamento 1.

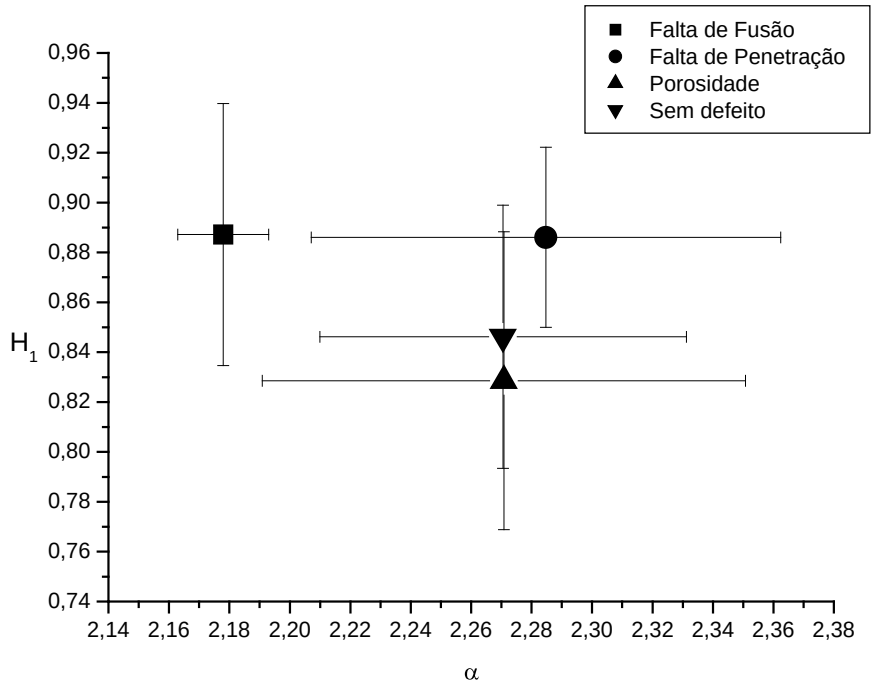

*Figura 77 – Expoente de escala (α) versus expoente de Hurst (H) para a **Região 1** – Tratamento 1.*

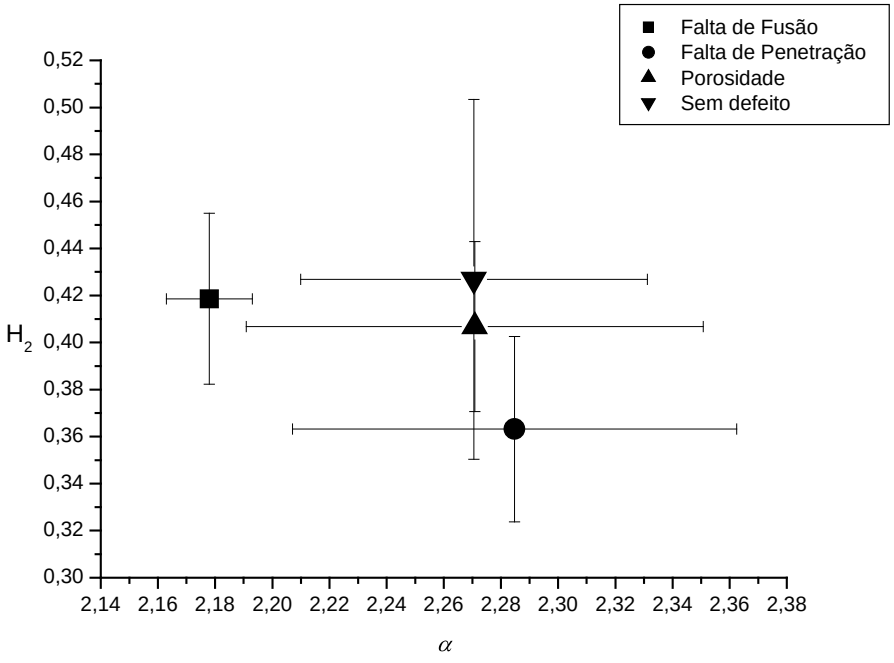

*Figura 78 – Expoente de escala (α) versus expoente de Hurst (H) para a **Região 2** – Tratamento 1.*

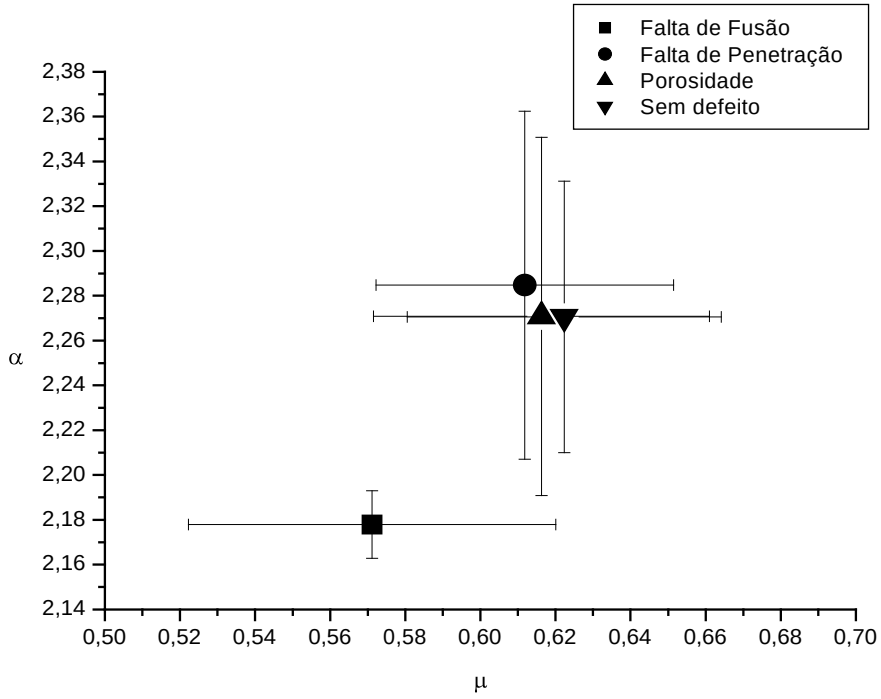

Figura 79 – Índice de variação (μ) versus expoente de escala (α)– Tratamento 1.

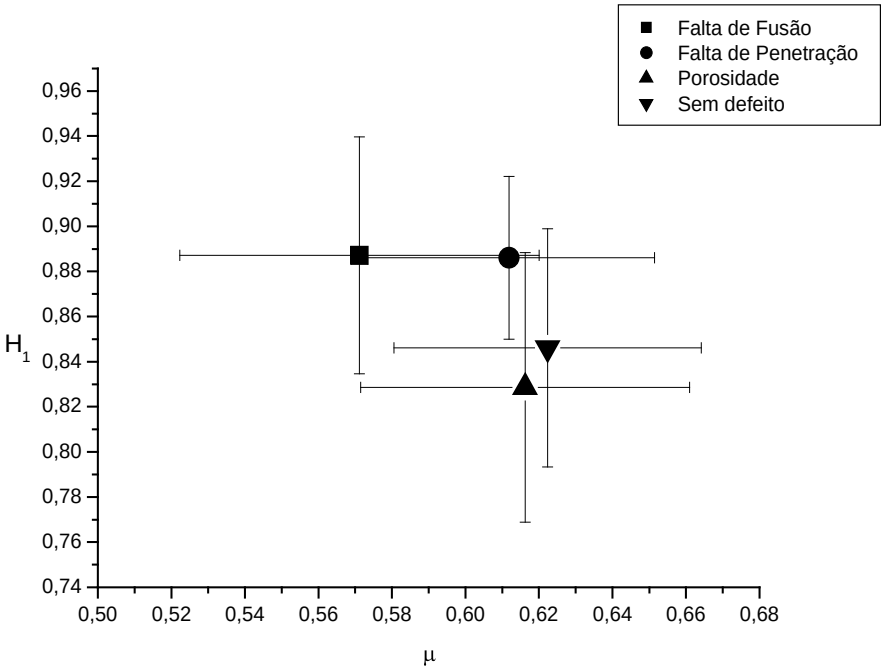

*Figura 80 – Índice de variação (μ) versus expoente de Hurst (H) para a **Região 1** – Tratamento 1.*

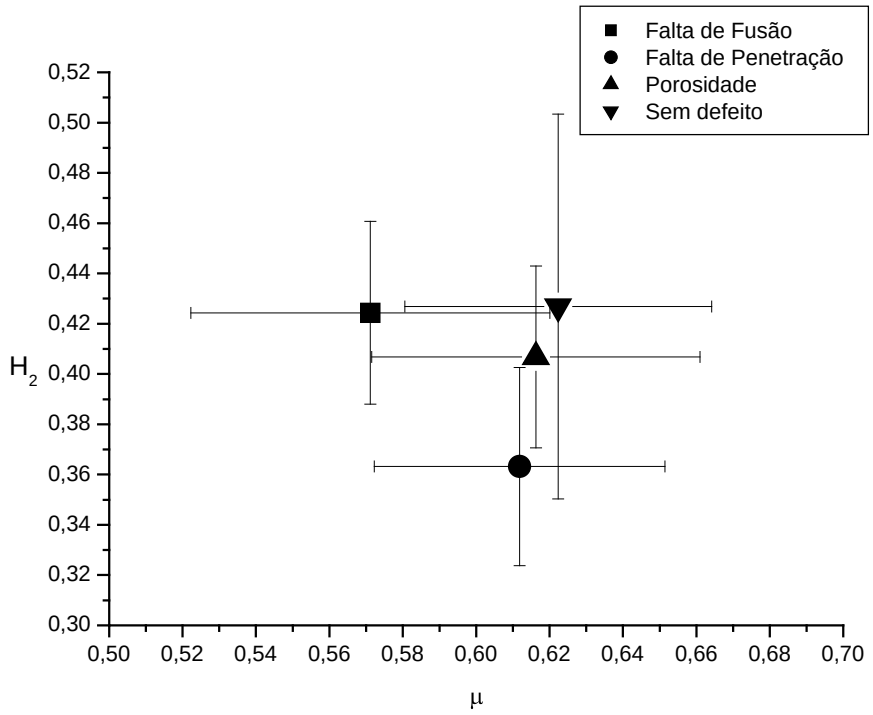

*Figura 81 – Índice de variação (μ) versus expoente de Hurst (H) para a **Região 2** – Tratamento 1.*

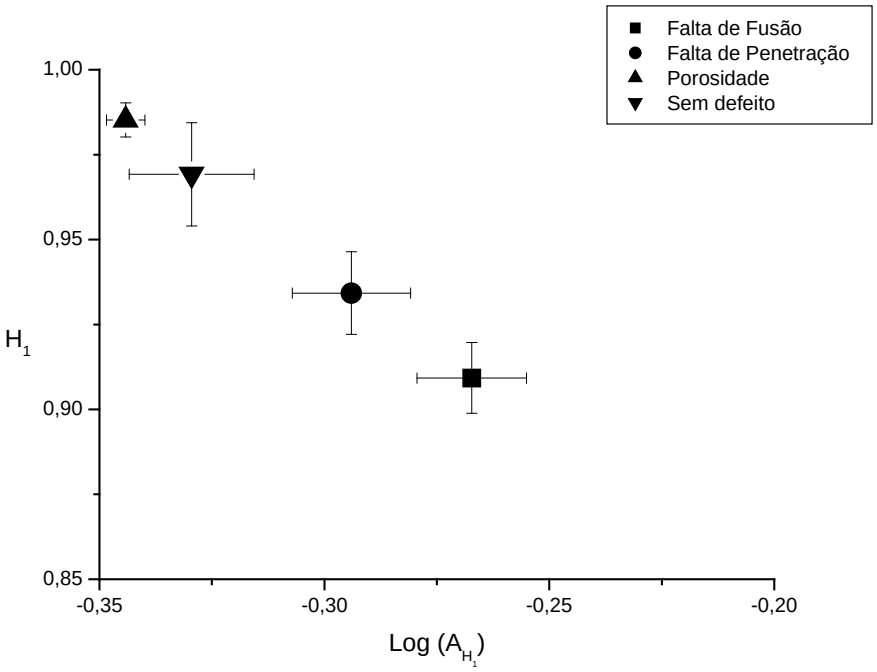

*Figura 82 – Log (A_H) versus expoente de Hurst (H) da Análise R/S para a **Região 1** – Tratamento 2.*

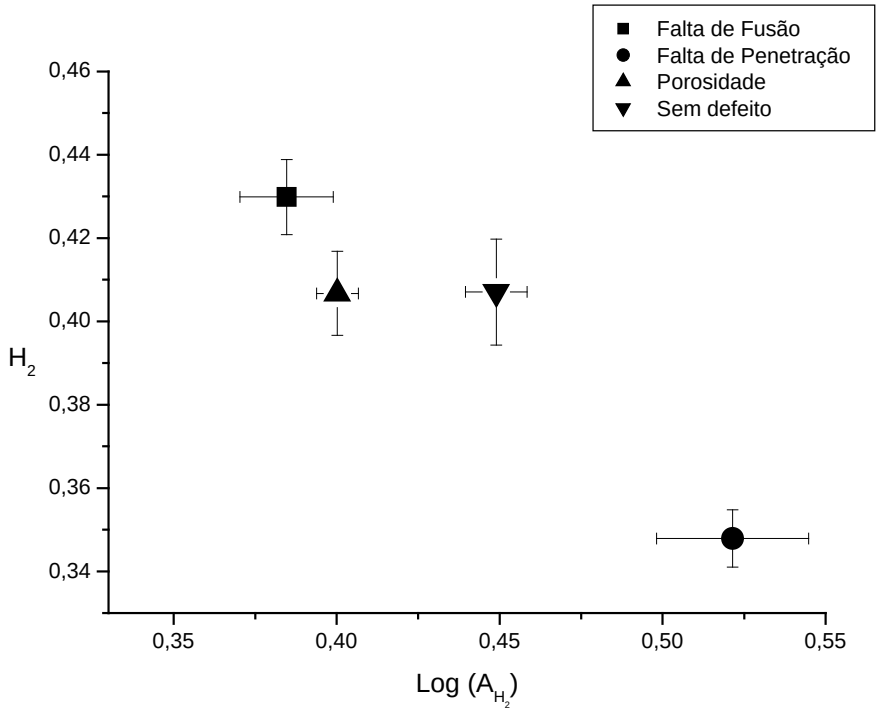

*Figura 83 – Log (A_H) versus expoente de Hurst (H) da Análise R/S para a **Região 2** – Tratamento 2.*

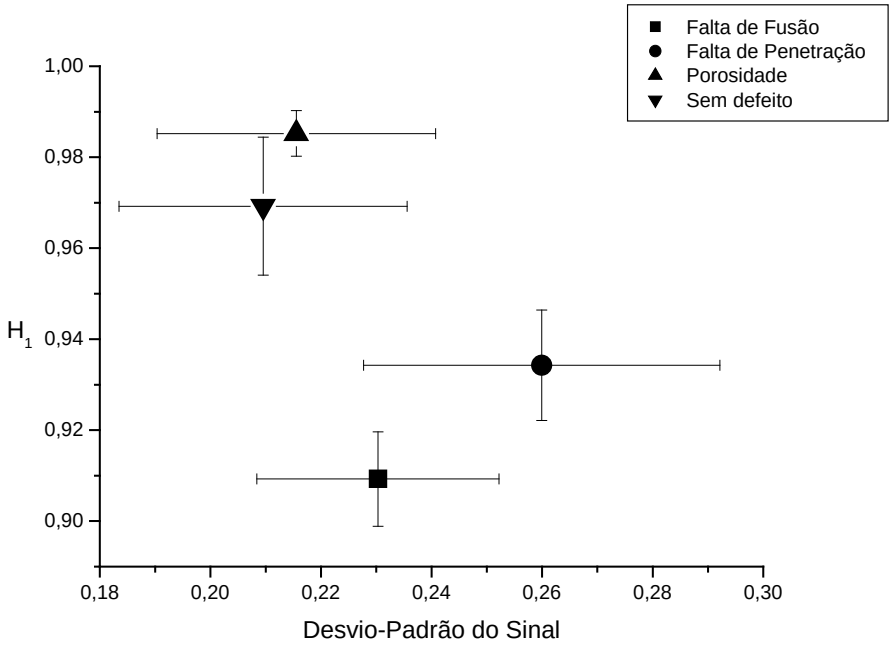

*Figura 84 – Desvio-Padrão do sinal tratado versus expoente de Hurst (H) para a **Região 1** – Tratamento 2.*

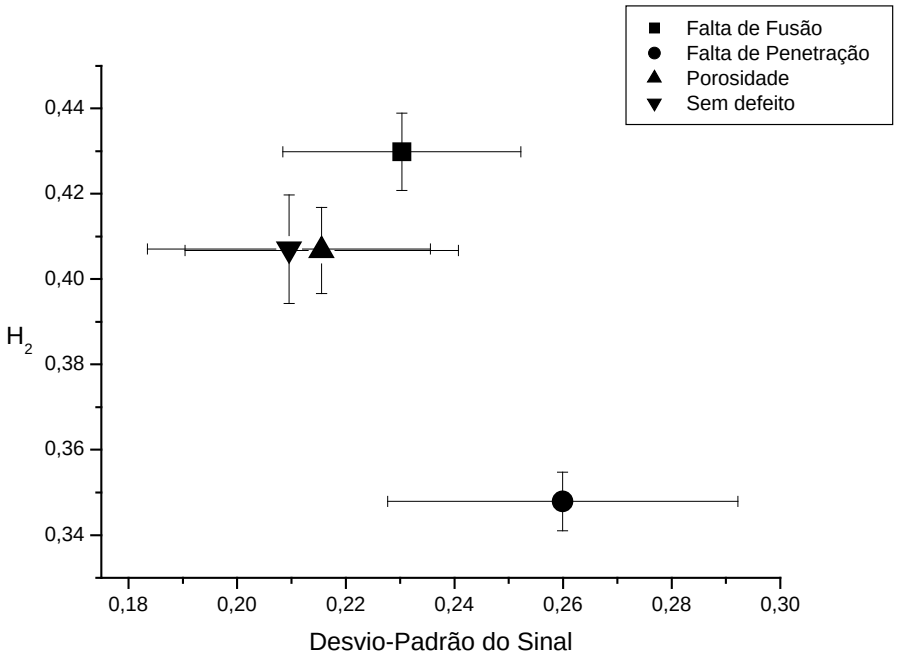

*Figura 85 – Desvio-Padrão do sinal tratado versus expoente de Hurst (H) para a **Região 2** – Tratamento 2.*

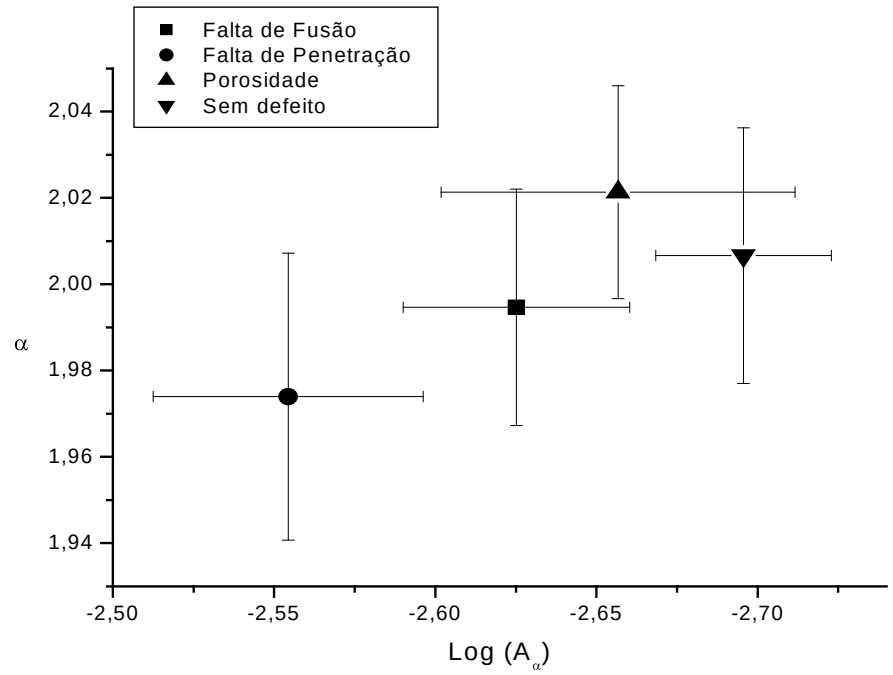

Figura 86 – Log (A_α) versus expoente de escala (α) da DFA – Tratamento 2.

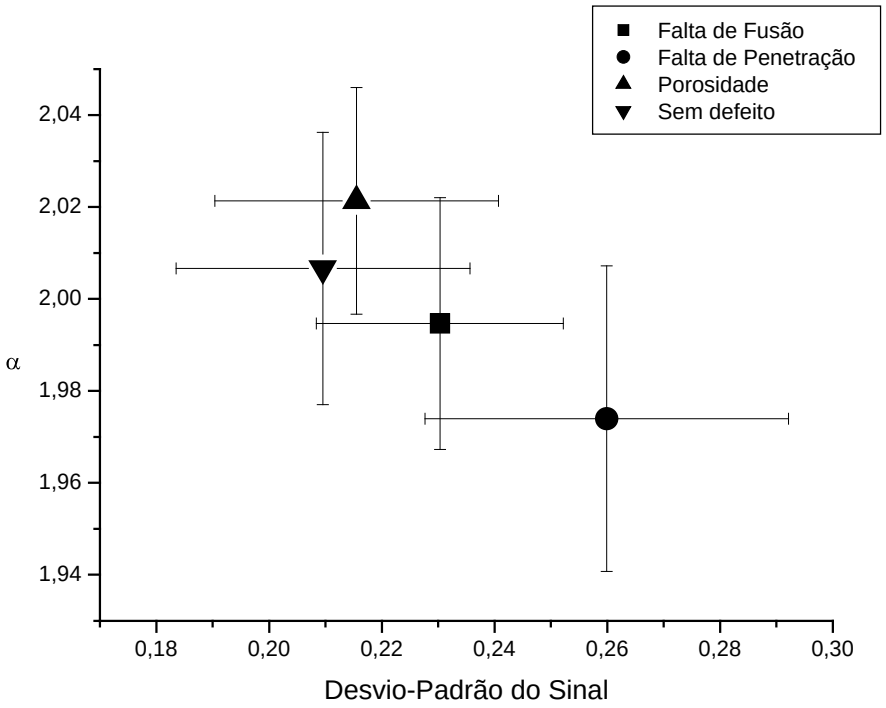

Figura 87 – Desvio-Padrão do sinal tratado versus expoente de escala (α) – Tratamento 2.

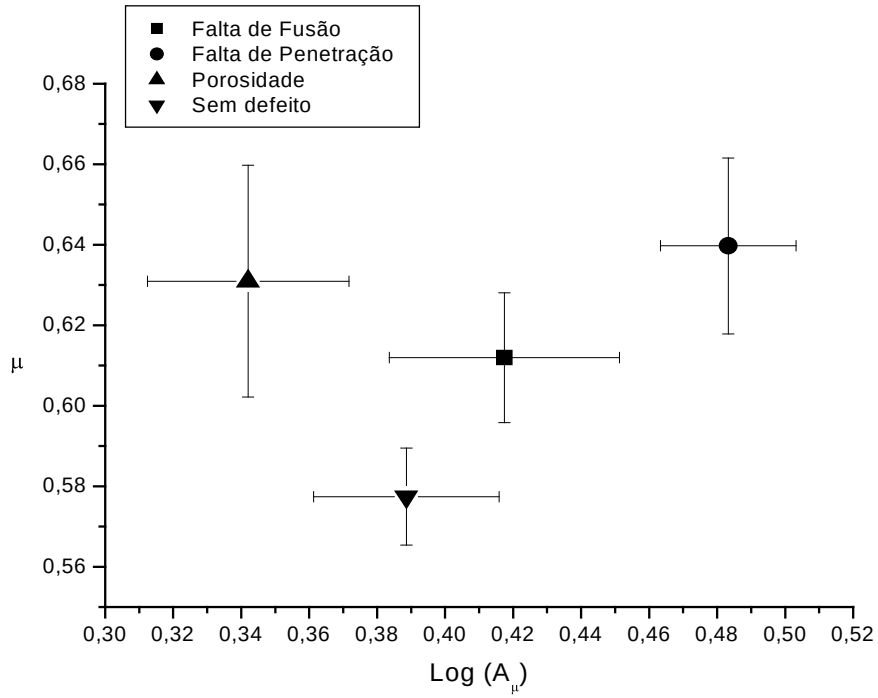

Figura 88 – Log (A_μ) versus índice de variação (μ) da Análise de Cobertura Mínima – Tratamento 2.

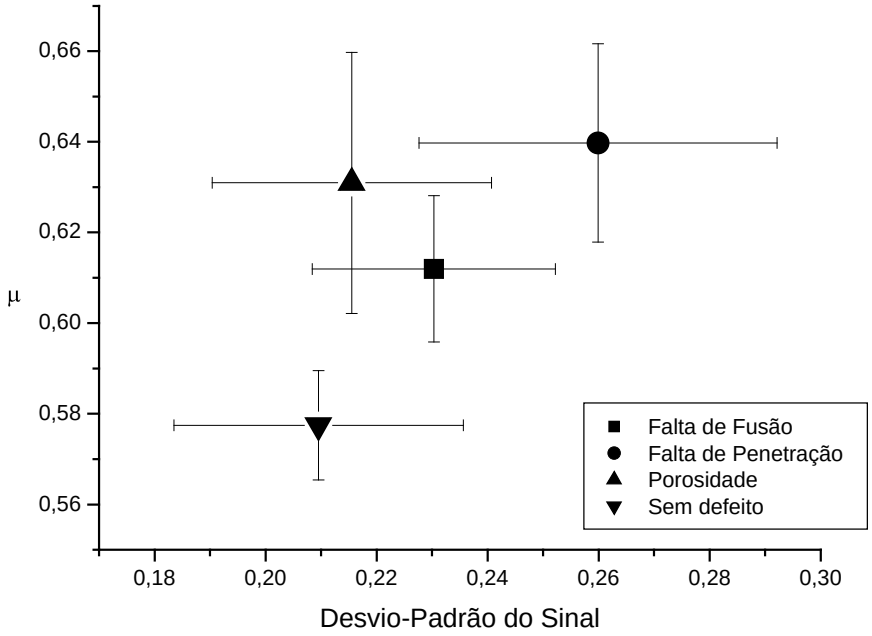

Figura 89 – Desvio-Padrão do sinal tratado versus índice de variação (μ) – Tratamento 2.

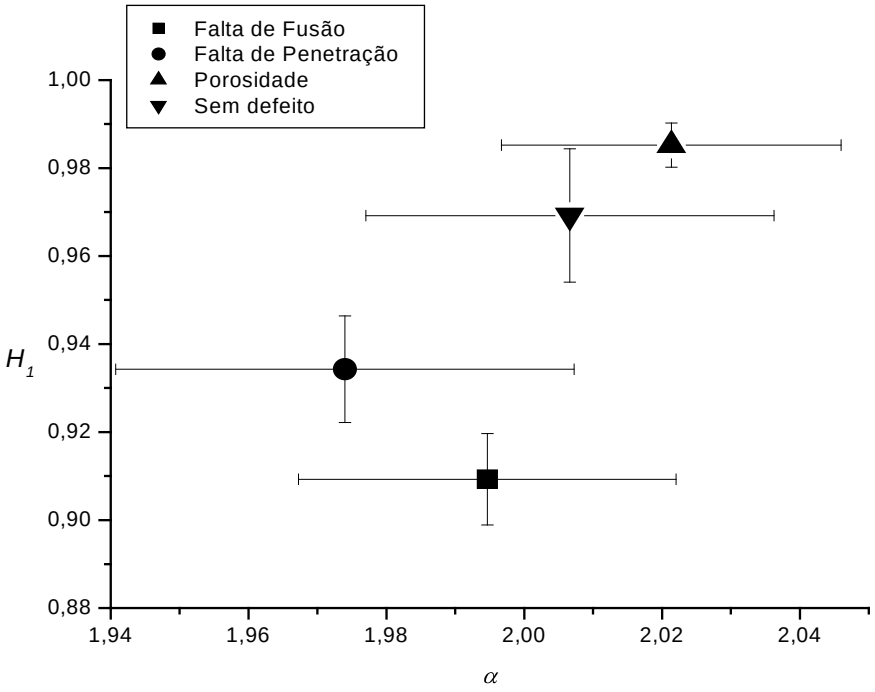

*Figura 90 – Expoente de escala (α) versus expoente de Hurst (H) para a **Região 1** – Tratamento 2.*

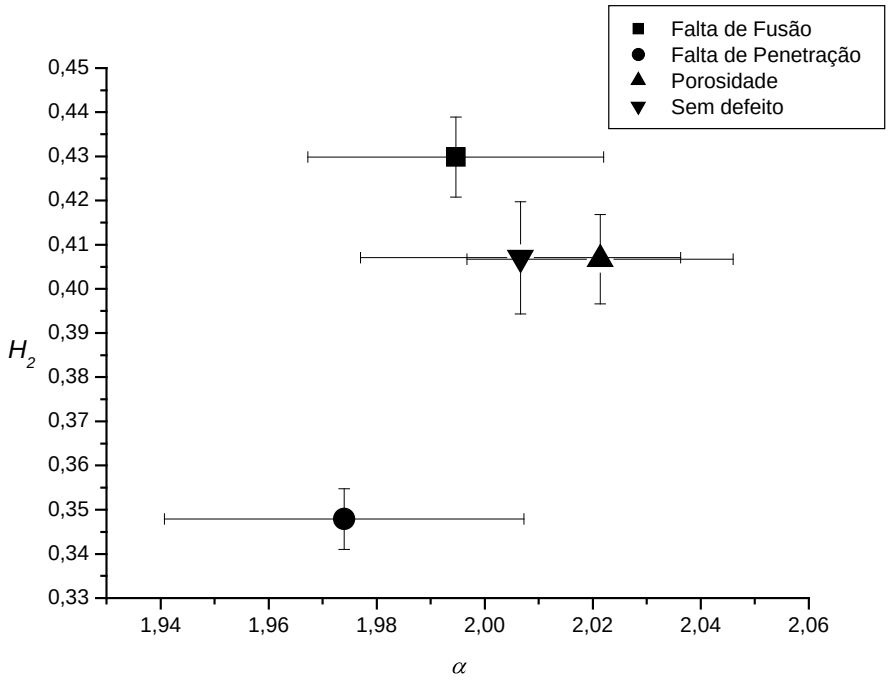

*Figura 91 – Expoente de escala (α) versus expoente de Hurst (H) para a **Região 2** – Tratamento 2.*

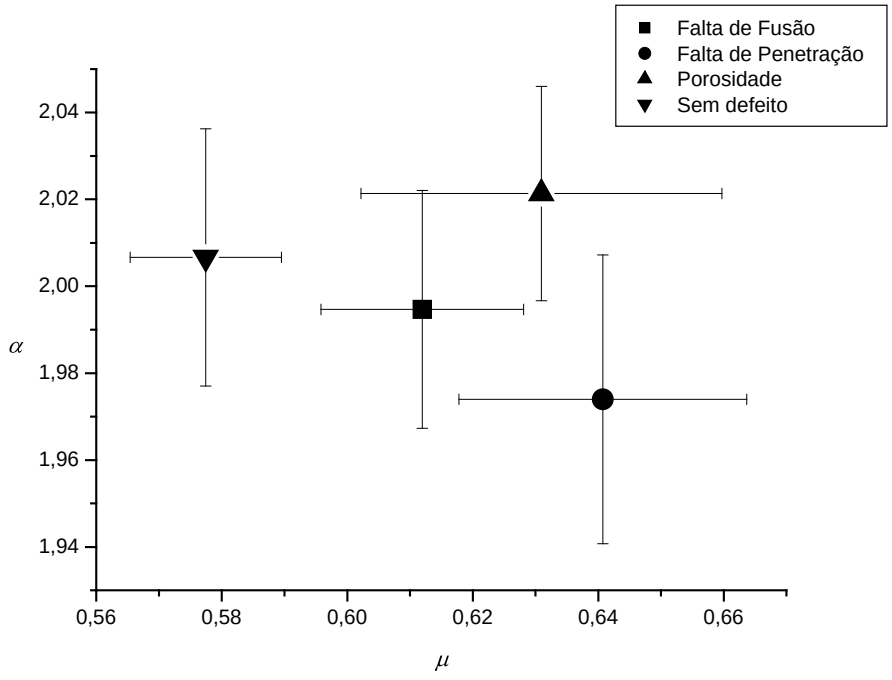

Figura 92 – Índice de variação (μ) versus expoente de escala (α) – Tratamento 2.

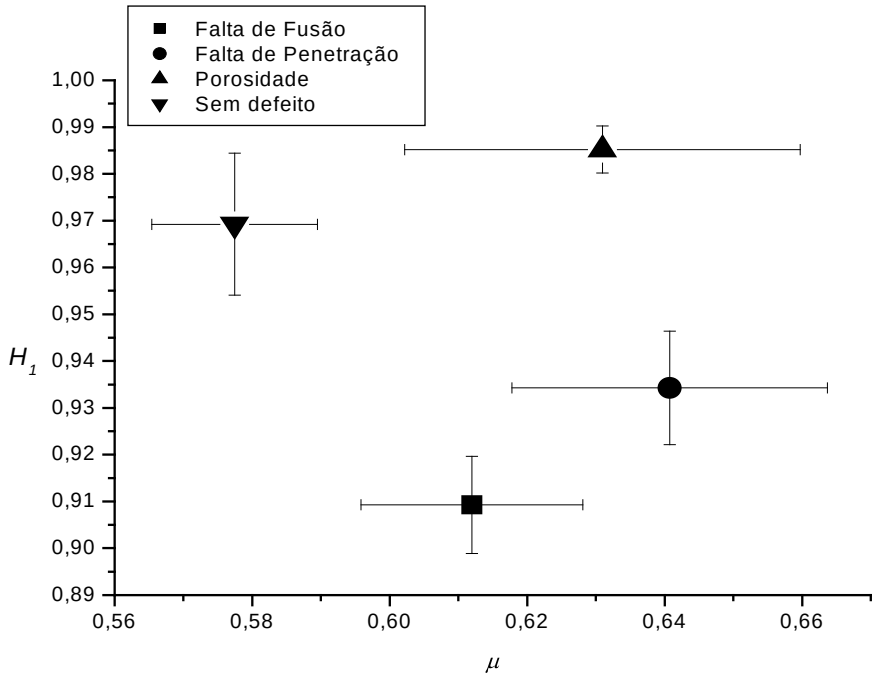

*Figura 93 – Índice de variação (μ) versus expoente de Hurst (H) para a **Região 1** – Tratamento 2.*

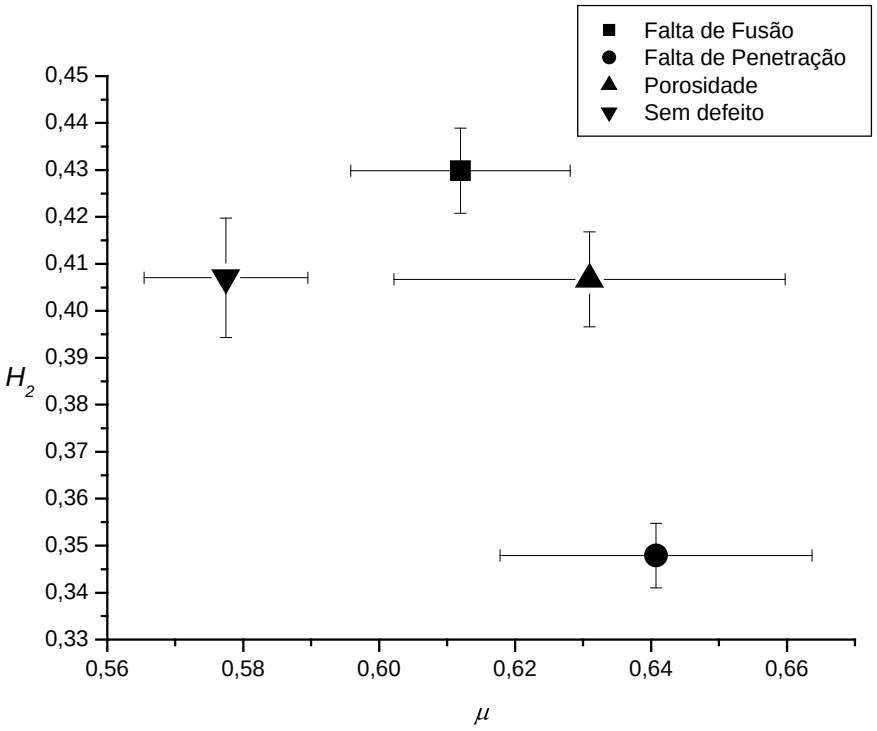

*Figura 94 – Índice de variação (μ) versus expoente de Hurst (H) para a **Região 2** – Tratamento 2.*

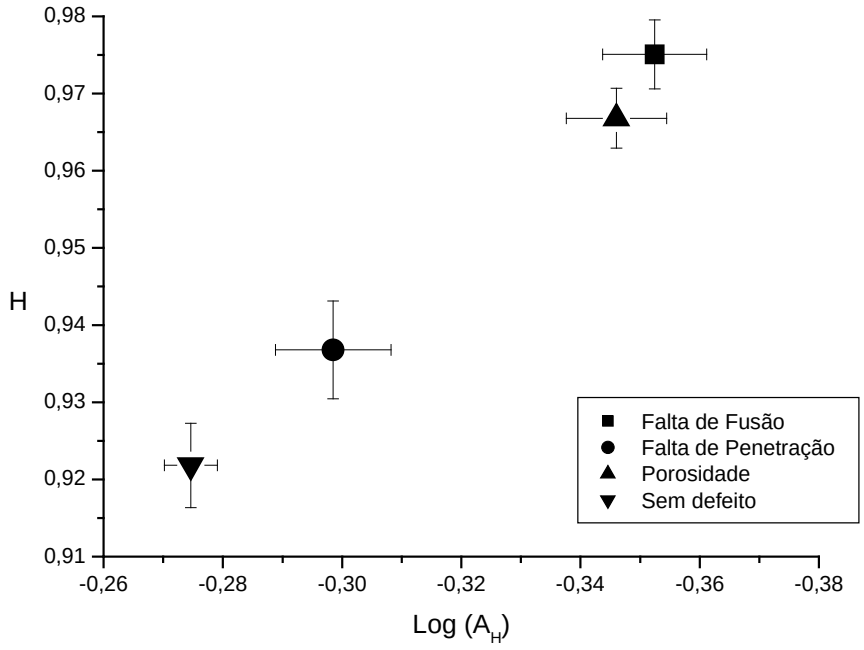

Figura 95 – Log (A_H) versus expoente de Hurst (H) da Análise R/S – Tratamento 3.

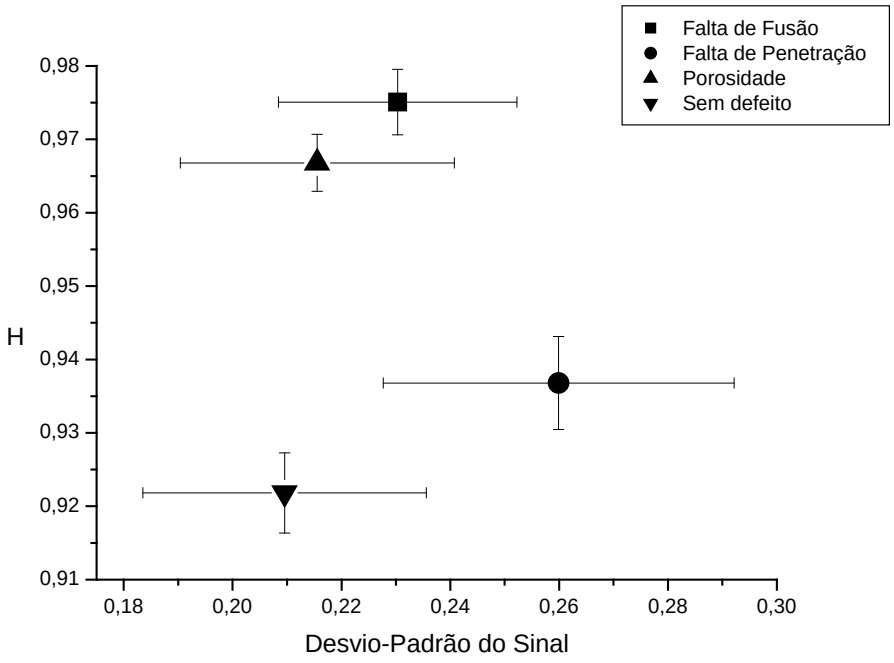

Figura 96 – Desvio-Padrão do sinal tratado versus expoente de Hurst (H) – Tratamento 3.

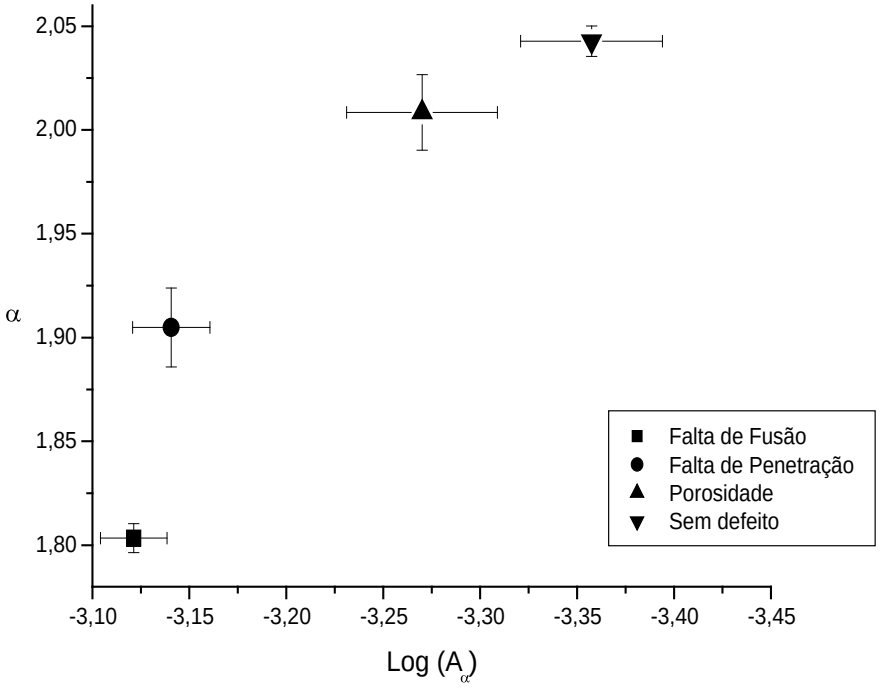

Figura 97 – Log (A_α) versus expoente de escala (α) da DFA – Tratamento 3.

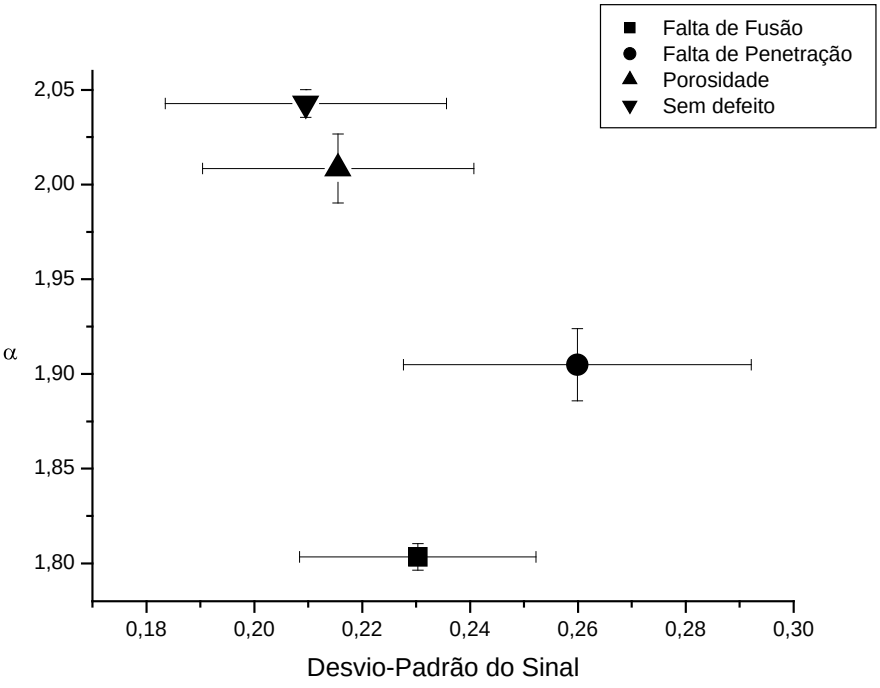

Figura 98 – Desvio-Padrão do sinal tratado versus expoente de escala (α) – Tratamento 3.

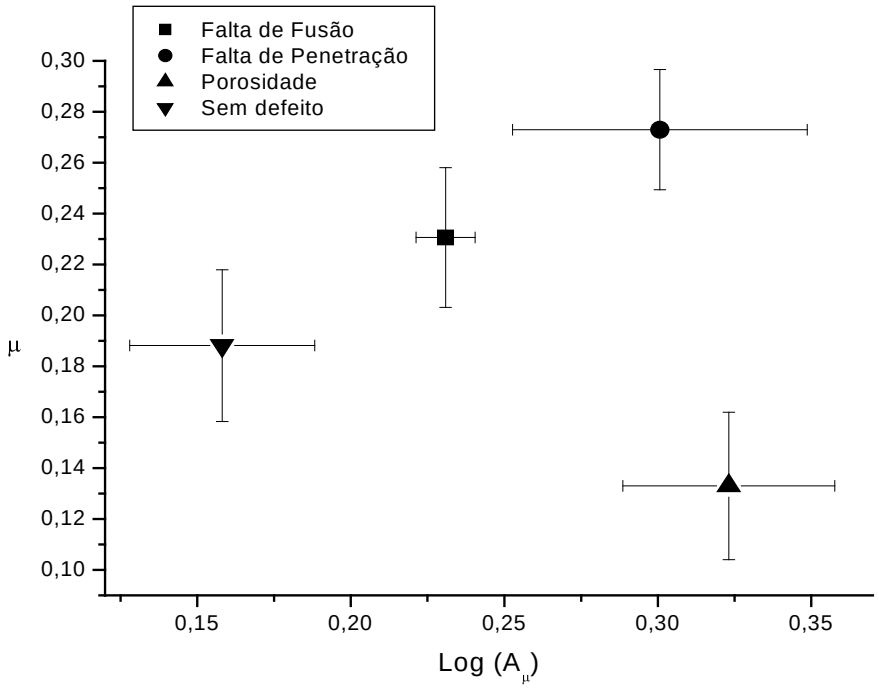

Figura 99 – Log (A_μ) versus índice de variação (μ) da Análise de Cobertura Mínima – Tratamento 3.

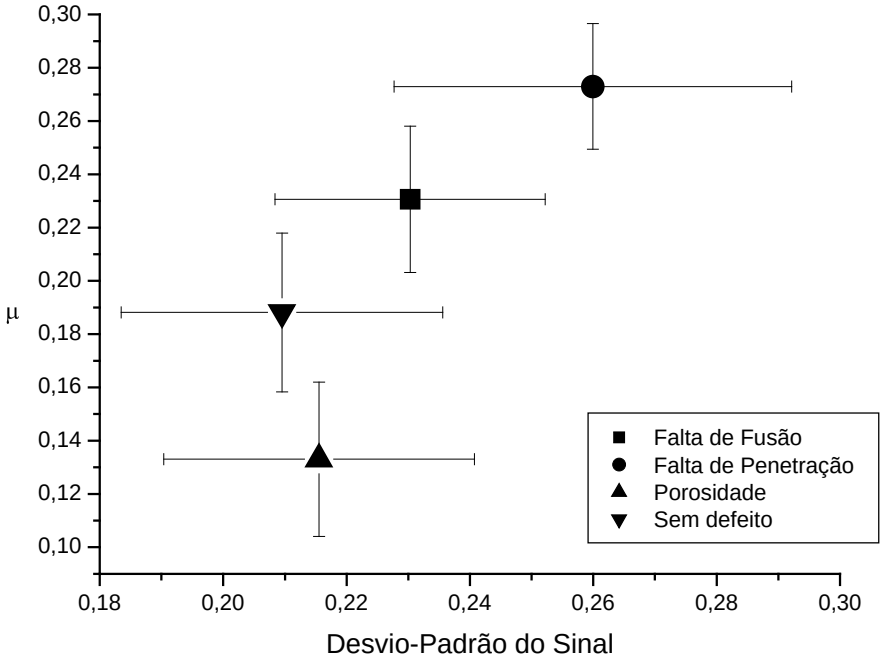

Figura 100 – Desvio-Padrão do sinal tratado versus índice de variação (μ) – Tratamento 3.

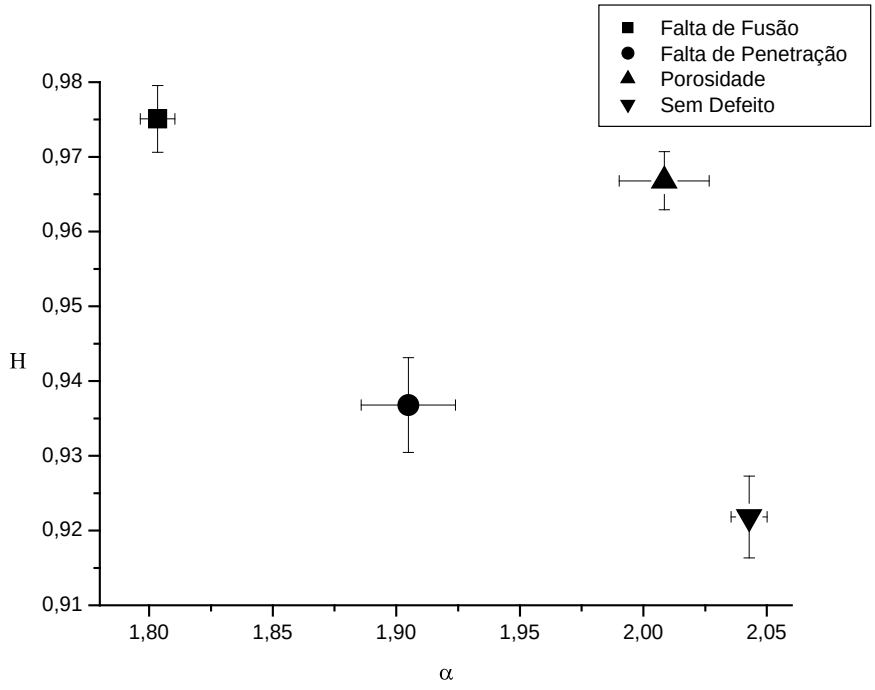

Figura 101 – Expoente de escala (α) versus expoente de Hurst(H) – Tratamento 3.

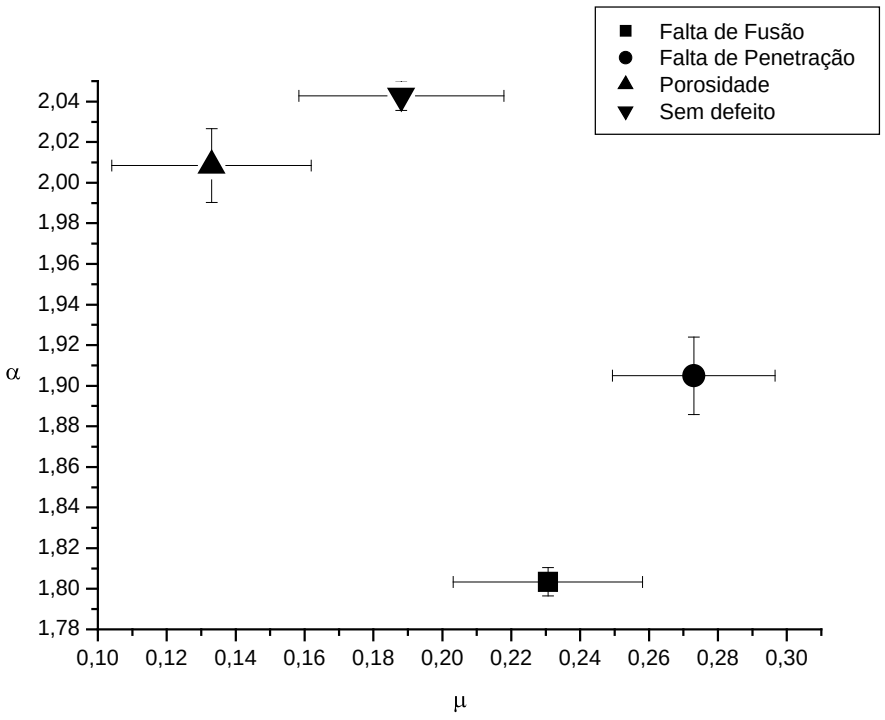

Figura 102 – Índice de variação (μ) versus Expoente de escala (α) – Tratamento 3.

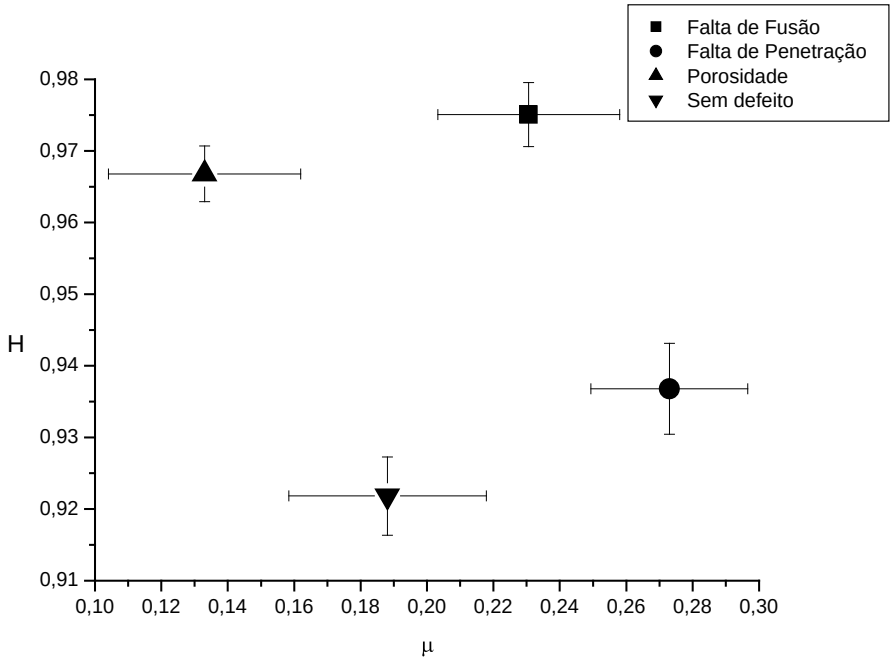

Figura 103 – Índice de variação (μ) versus expoente de Hurst (H) – Tratamento 3.

6.3 Análise dos Resultados

A análise de Hurst, obtida pelos tratamentos 1 e 2 mostradas nas figs. 33-36 e 45-48, foi a única a apresentar um “crossover” entre as regiões de escala para tempos longos e curtos. Este “crossover”, no entanto foi suprimido quando da utilização do tratamento 3, como pode ser verificado nas figs. 57-60. Deve ainda ser notado, que a maior dispersão dos pontos que definem a região de escala foi apresentado pela análise de cobertura mínima quando também usando o tratamento 3. (figs. 65-68).

Os resultados obtidos para os parâmetros através do tratamento 1 mostrado nas tabelas 5.1-5.12 apresentaram elevados desvios-padrões para todos os tipos de defeitos, apesar da aplicação do critério de Chauvenet.

Por outro lado, os resultados obtidos com o tratamento 2, tabelas 5.13-5.24 apresentaram uma boa redução do desvio-padrão dos parâmetros para todos os tipos de defeitos quando comparados com os do tratamento 1, observa-se ainda que não houve eliminação de sinais pelo uso do critério de Chauvenet.

Os resultados com menor desvio padrão foram obtidos através do tratamento 3 e são apresentados nas tabelas 5.25-5.36. Deve ser notado, que novamente não houve eliminação de sinais pelo uso do critério de Chauvenet.

Analisando as figs. 69 –81, observamos que para o tratamento 1 podemos concluir que os parâmetros obtidos não conseguiram caracterizar os defeitos. No entanto, apresentaram forte tendência de separação do defeito falta de fusão com uma confiabilidade estimada em 90%, sendo esta estimativa obtida a partir das figs. 73, 74, 77, 78 e 79. Observamos também grande superposição do defeito porosidade com a categoria sem defeito na maior parte das figuras.

Os resultados para o tratamento 2, figs. 82–94, mostram que os parâmetros calculados discriminam de forma inequívoca os vários tipos de defeitos. A separação completa dos de todos os tipos de defeito e da categoria sem defeito é apresentada nas figs. 83, 88, 93 e 94. Este tratamento consegue ainda diferenciar os defeitos falta de fusão e falta de penetração nas figs. 82, 84, 85, 90 e 91, e diferenciar a categoria sem defeito dos demais tipos de defeitos nas figs. 89 e 92. Ressaltamos aqui, que para esse tratamento, pode-se diferenciar os defeitos aplicando critérios de hierarquia nas figuras que não separam todos os defeitos.

Os resultados obtidos para tratamento 3, figs. 95-103, apresentam total caracterização e diferenciação de todos os defeitos e da categoria sem defeito nas figs. 95, 96, 97, 98, 99, 101, 102 e 103. Deve ser notado que, na fig. 101 a separação entre os vários defeitos é a maior dentre as possíveis figuras onde foi observada a separação.

A partir da análise acima fica evidente que, muito embora o tratamento 2 tenha possibilitado a discriminação dos defeitos, os melhores resultados foram obtidos com o tratamento 3. Este resultado é análogo ao obtido por Moura(2003) utilizando redes neurais.

7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos dependeram fortemente do tipo de tratamento aplicado nos sinais.

Da análise feita com o tratamento 1 podemos concluir:

- A quantidade de pontos dos sinais utilizada nesse tratamento foi baixa e a filtragem passa-banda realizada foi ineficiente, já que não se conseguiu caracterizar e distinguir os defeitos.
- O critério de Chauvenet se mostrou eficiente na depuração dos valores dos coeficientes das análises, reduzindo os desvios-padrões, os quais seriam bem maiores sem a aplicação de tal critério.
- O defeito porosidade e a categoria sem defeito encontraram-se na maioria dos gráficos sobrepostos, conseqüência dos sinais ruidosos da categoria sem defeito citados por Moura (2003) em sua tese de doutorado, que em alguns casos inclusive podem se confundir com sinais característicos de defeitos de soldagem. Isso vem a confirmar a ineficiência do tratamento realizado nos sinais que poderia ter eliminado ou reduzido esses ruídos.

Usando os resultados do tratamento 2 concluímos:

- O aumento na quantidade de pontos dos sinais teve grande influência para que se conseguisse a separação de todos os defeitos e da categoria sem defeito neste tratamento, uma vez que foi utilizada a mesma filtragem do tratamento 1.
- A análise de Hurst e a análise de cobertura mínima foram as únicas capazes de caracterizar todos os defeitos.
- É possível também caracterizar os defeitos utilizando as figuras que não diferenciaram todos os defeitos, aplicando para isso critérios de hierarquia nas mesmas.

Através da análise com o tratamento 3, podemos concluir que a utilização da filtragem Savitzky-Golay possibilitou a separação de todos os defeitos, em todos os métodos utilizados, sendo portanto o tratamento que melhor caracterizou defeitos no contexto da análise fractal apresentada.

Finalmente podemos concluir que, tendo em vista os resultados obtidos, é possível caracterizar defeitos de soldagem utilizando a análise fractal de sinais ultra-sônicos, desde que esses sinais passem por uma filtragem adequada e que possuam boa quantidade de pontos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDISON, P. S., *"Fractals and Chaos*" (IOP Publishing Ltd, London, 1997).
- ALVES, M. LIMA, FREITAS, M. CASTILHO, SILVA, L.R. OLIVEIRA, "*Investigação da Reprodutibilidade de Resultados de Medição da Rugosidade de Massas Padrão Classe F2*". In: METROLOGIA – 2003 – METROLOGIA PARA A VIDA – SOCIEDADE BRASILEIRA DE METROLOGIA (SBM), Recife, 1-5 Set. 2003.
- ASM, "*ASM Handbook – Welding, Brazing, and Soldering*" **vol.6**, 1073-1075 (American Society for Metals, USA, 1993).
- ASM, "*ASM Handbook – Nondestructive Evaluation and Quality Control*" **vol.17**, 231-233 (American Society for Metals, USA, 1992).
- ASNT, "*Nondestructive Testing Handbook – Ultrasonic Testing*" **vol.7** (American Society for Nondestructive Testing, USA, 1991).
- ASNT, *"Non-Destructive Testing Handbook – Nondestructive Testing – an Overview"* **vol.10** (American Society for Nondestructive Testing, USA, 1996).
- AWS, *"Welding Handbook - Fundamentals of Welding"* **vol.1**, 209-215 (American Welding Society, Miami, 1981).
- AWS, *"Welding Handbook – Engineering, Costs, Quality and Safety"* **vol.5**, 278-300 (American Welding Society, Miami, 1984).
- BARAT, P., "*Fractal Characterization of Ultrasonic Signals from Polycrystalline Materials*", Chaos, Solitons & Fractals **9**, 1827-1834, (1998).
- BLITZ, J., SIMPSON, G., "*Ultrasonics Methods of Non-destructive Testing*" (Chapman & Hall, London, 1996).
- BSI, "*BS7706 - Guide to Calibration and Setting-up of Ultrasonic time of Flight Diffraction (TOFD) Technique for Defect Detection, Location and Sizing of Flaws*", (British Standard Institute, London, 1993).
- CARY, H.B., "*Modern Welding Technology*" (Prentice-Hall, New Jersey, 1998).
- CEN, "*European Prestandard: Nondestructive Testing – Ultrasonic Examination – Part 6: Time-of-Flight Diffraction Technique as a Method for Defect Detection and Sizing",* Comité Europeu de Normalização – CEN/TC138/WG 2 N 173, work item 00138051, final draft (1996).

- CEN, "*NP ENV583-6 – Ensaios Não Destrutivos – Ensaios por ultrasons - Parte 6: Técnica do Tempo de Percurso difractado utilizado como método para a detecção e dimensionamento de descontinuidades*", (Instituto Português da Qualidade, Monte de Caparica, 2001).
- CHEN, Z., IVANOV, P. C., HU, K., STANLEY, H. E., "*Effect of nonstationarities on detrended fluctuation analysis*", Physical Review E **65**, 041107-1-041107-5 (2002).
- COSTA, L. da F., BIANCHI, A. G. C., "*Dimensão fractal multiescala: o mundo visto de outro ângulo*", Ciência Hoje **31**, 40-47 (2002).
- DIEDERICHS, R., GINZEL, E., "*TOFD Principles"*. In: "*Nondestructive Testing Encyclopedia",* NDTnet, Dec. 1999. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/az/ut/info/tofdp.htm>. Acesso em 17 set. 2004.
- DUBOVIKOV, M.M., STARCHENKO, N.V., DUBOVIKOV, M.S., "*Dimension of the minimal cover and fractal analysis of time series*", Physica A **339**, 591-608 (2004).
- FEDER, J., "*Fractals*", (Plenum Press, New York, 1988).
- HECKHÄUSER, H., GISCHLER, K. H, "*Das Zipscan-System bei der Ultraschallprüfung an plattierten Bauteilen und Rohrleitungen",* In: DGZfP-Seminar, 7. "*Automatisierung in der Ultraschallprufung"*, Berlin: 8 nov.1988.
- KRAUTKRÄMER GMBH & CO.OHG, "*Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing"*. USA, 2001. p. 12. Disponível em: <http://www.geinspectiontechnologies.com/products/Ultrasonics/IndustrialProbes/docs/probecatalog.pdf>. Acesso em 21 set. 2004.
- KRAUTKRÄMER, J., KRAUTKRÄMER, H., "*Ultrasonic Testing of Materials*", (Springer-Verlag, Berlim, 1977).
- KURNAZ, M.L., "*Detrended fluctuation analysis as a statistical tool to monitor the climate*", Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment **P07009**, 1-10 (2004).
- MATOS, J. MAURICIO O., MOURA, ELINEUDO P. de, KRÜGER, SILVIO E., REBELLO, J. MARCOS A., "*Rescaled range analysis and detrended fluctuation analysis study of cast irons ultrasonic backscattered signals*", Chaos, Solitons & Fractals **19,** 55-60 (2004).

- MOSHKOVIC, V., PASSI, A., PASSI, G., "*Recent Advances in the Ultrasonic Inspection Recording and Reporting – Instrumentation: Part 1. Simplified Rapid Imaging of the Separate Sections of the Test Objects – Classification of the B-Scans"*, NDT.net, **9**, Nº 9. Sep. 2003. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/v08n09/passi/passi.htm>. Acesso em 14 out. 2004.
- MOURA, E. P. de, "*Reconhecimento de Padrões de Defeito de Soldagem em Sinais Ultra-Sônicos obtidos pela Técnica TOFD utilizando Redes Neurais Artificiais*", Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e Materiais, PEMM/COPPE/UFRJ (2003).
- PEITGEN, JURGENS, SAUPE, "*Chaos and Fractals – New Frontiers of Science*", (Springer-Verlag, New York, 1992).
- PENG, C.K., BULDYREV, S.V., HAVLIN, S., SIMONS, M., STANLEY, H.E., GOLDBERGER, A.L., "*Mosaic organization of DNA nucleotides*", Physical Review E **49,** 1685-1689 (1994).
- RAJ, B., JAYAKUMAR, T., "*NDE Methodologies for characterisation of defects, stresses and microstructures in pressure vessels and pipes"*, International Journal of Pressure Vessels and Piping **73**, 133-146 (1997).
- RAYLEIGH, L., "*Theory of Sound*" (London, 1926).
- SANTIN, J. L. "*Ultra-som. Técnica e aplicação*". (Qualitymark, Rio de Janeiro, 1996).
- SOLAR INFLUENCES DATA ANALYSIS CENTER - SIDC. Department of Solar Physics. Royal Observatory of Belgium, Brussels. Disponível em: <http://sidc.oma.be/index.php3>. 2002.
- SILK, M.G., LIDINGTON, B.H., "*Defect sizing using an Ultrasonic Time Delay Approach*", British Journal of NDT, p. 33-36 (1975).
- SILVA, F.E. da, "*Análise da Integridade Estrutural de Compósitos através da Caracterização Fractal de Sinais de Emissão Acústica*", Dissertação de Mestrado em Engenharia de Ciência e de Materiais, UFC (2002).
- TESSER, J. A., "*Caracterização de Defeitos de Soldagem Por Análise Fractal Utilizando Emissão Acústica em Ensaios de Tração*", Dissertação de Mestrado em Engenharia de Ciência e de Materiais, UFC (2003).
- VERKOOIJEN, J., "*TOFD used to replace radiography*", INSIGHT **37**, 433-435 (1995).

- ZAHRAN, O., SHIHAB, S., AL-NUAIMY, W., "*Comparison between Surface Impulse Ground Penetrating Radar Signals and Ultrasonic Time-of-Flight Diffraction Signals*", High Frequency Postgraduate Student Colloquium, IEEE, 7. p.7, 8-9 Sep. 2002.

APÊNDICE

PROGRAMA DE RETIRADA DA MÉDIA DO SINAL

```
      PROGRAM retiram
c     PARAMETER(N=303)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      DIMENSION Y(3000000),B(3000000),x(3000000)
    write(*,*)'numero de pontos da serie = nmax'
      read(*,*)nmax
      AN=DFLOAT(nmax)
*************dados de entrada*********************************************
      open (1, file='FF60_9P01.dat')
*****************************************************************************
      soma=0.0d0
      DO 9 I=1,nmax
        READ(1,*) B(I)
       x(i)=dfloat(i)
     SOMA=SOMA+B(I)
  9   CONTINUE
    CLOSE(1)
************dados de saída**************************************************
      OPEN(2,FILE='FF60_9P01smt.DAT')
*****************************************************************************
      c=0.0d0
    c=SOMA/AN
    open (1, file='FF60_9P01.dat')
      b=0.0d0
      DO 11 I=1,nmax
       READ(1,*) B(I)
c      do 10 ii=1,i
c      bbb=bbb+b(ii)
```

```
c 10   continue
          f=100000000
          t=1/f
          a=t*i
c         write (*,*) f
          y(i)=B(i)-c
          write (2,*) a,y(i)
c         write (2,*) y(i)
 11       CONTINUE
          CLOSE(1)
          CLOSE(2)
          STOP
      end
```

PROGRAMA NORMALIZAÇÃO DO SINAL

```
      implicit double precision (a-h,o-z)
      dimension x(50000),y(50000)
c      write(*,*)'numero de pontos da serie'
c      read(*,*)nmax
          nmax=512
      open (1, file='FP60_4T-02FLT.DAT')
      read(1,*) (y(i),i=1,nmax)
      open (2, file='FP60_4T-02FLTn.dat')

      m =nmax
          mm=100
c         dp=2.d0*dasin(1.d0)/dfloat(m)
      do 2 j=1,m
          x(j)=dfloat(j)/dfloat(m)
c         y(j)=dcos(dfloat(j)*dp)
c         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
c       rmax=ymax-ymin
        do i=1,nmax
        y(i)=y(i)/ymax
        write (2,*) y(i)
        enddo
      close(unit=2)
        stop
        end
```

PROGRAMA ANÁLISE *R/S*

```
        implicit real*8 (a-h,o-z)
        dimension h(10000000)
        dimension x(10000000)
        write(*,*)'number of points'
        read(*,*) n
      j=n
       nmax=n
        open(1, file='FP60_4T-02.dat')
        open(2, file='FP60_4T-02RSA4.dat')
        read(1,*) (h(i),i=1,nmax)
 44   continue
      m=j
        icount=0
        rs=0.d0
        k=1
 12   continue
```

```
          s=0.d0
          soma=0.d0
          sh=0.d0
c********** Influx (h(i)) average (xmedia) ************************
        do i=k,m
        s=s+h(i)
              end do
      xmedia=s/dfloat(j)
c*******Accumulated departure of the influx h(i) from the mean******
      if(k.eq.1)then
      do i=k,m
      sh=sh+h(i)
      x(i)=sh-dfloat(i)*xmedia
      soma=soma+(h(i)-xmedia)*(h(i)-xmedia)
      enddo
      go to 55
      endif
            do i=k,m
          sh=sh+h(i)
          x(i)=sh-dfloat(i-icount*j)*xmedia
          soma=soma+(h(i)-xmedia)*(h(i)-xmedia)
             enddo
c*********The range (R)    ***************************************
  55  continue
      xmax=-1.0d20
      xmin=1.0d20
      do i=k,m
          xmax=dmax1(xmax,x(i))
          xmin=dmin1(xmin,x(i))
          enddo
          range=xmax-xmin
c         write(*,*) xmin,xmax
c***********The standard deviation *******************************
          sigma=dsqrt(soma/dfloat(j))
```

```
c*****************************************************************
c     write(*,*) sigma
          rs=rs+dlog10(range/sigma)
      icount=icount+1
      if(k.eq.1)then
      k=j+1
      go to 22
      endif
      k=k+j
 22   m=m+j
          if(m.gt.n)go to 99
          go to 12
 99   continue
 33   continue
      rs=rs/dfloat(icount)
      if(j.lt.n)then
      xlag=dlog10(dfloat(j))
      write(2,*)xlag,rs
      endif
      if(j.lt.10) go to 999
      divider=dsqrt(2.0d0)
      j=int(j/divider)
      go to 44
 999  CONTINUE
          close(unit=1)
          close(unit=2)
          stop
          end
```

PROGRAMA DFA

```
      PROGRAM dfa
c     PARAMETER(N=303)
      implicit real*8(a-h,o-z)
      DIMENSION Y(3000000),B(3000000),x(3000000)
    write(*,*)'numero de pontos da serie = nmax'
      read(*,*)nmax
      AN=DFLOAT(nmax)
*************dados de entrada*********************************************
      open (1, file='FP60_4T-02FLTn.dat')
*****************************************************************************
      soma=0.0d0
      DO 9 I=1,nmax
        READ(1,*) B(I)
c     B(I)=2.D0*DFLOAT(I)+2.0d0
      x(i)=dfloat(i)
    SOMA=SOMA+B(I)
 9    CONTINUE
      CLOSE(1)
************dados de saída*************************************************
      OPEN(2,FILE='FP60_4T-02FLTnDFA.DAT')
*****************************************************************************
    SOMA=SOMA/AN
      DO 11 I=1,nmax
      bbb=0.0d0
      do 10 ii=1,i
       bbb=bbb+b(ii)
 10   continue
      y(i)=bbb-dfloat(i)*soma
 11   CONTINUE
    c=2.0d0
    c=dsqrt(c)
```

```
          c=dsqrt(c)
      xm=dlog10(an)/dlog10(c)
          npt=nmax
          m=int(xm)
      do 21 ll=1,m-3
c         r=c**ll
c         write(*,*) r
          n=(dfloat(npt)/dfloat(c))
          npt=int(n)
          if(npt.eq.2) goto 22
          fn=0.0d0
          w=an/npt
          do 20 l=1,w
      k1=(l-1)*npt+1
          k2=l*npt
          xx=0.0d0
          xy=0.0d0
          xb=0.0d0
          yb=0.0d0
c     Calculo de a e b em cada subintervalo
          do 19 k=k1,k2
      xb=xb+x(k)
          yb=yb+y(k)
          xx=xx+x(k)*x(k)
          xy=xy+x(k)*y(k)
 19   continue
      xb=xb/dfloat(npt)
          yb=yb/dfloat(npt)
          xx=xx/dfloat(npt)
      xy=xy/dfloat(npt)
          a=(xy-xb*yb)/(xx-xb*xb)
          bb=(xx*yb-xb*xy)/(xx-xb*xb)
          ff=0.0d0
          do 18 kk=k1,k2
```

```
      ff=ff+(y(kk)-a*x(kk)-bb)**2
   18  continue
          fn=fn+ff
   20  continue
      write(*,*) npt,fn
          NP=INT(w)*npt
      fn=dsqrt(fn/NP)
c         fn=fn*dfloat(n)
      write(2,*) dlog10(dfloat(npt)),dlog10(fn)
   21  continue
   22  CLOSE(2)
      end
```

PROGRAMA DIMENSÃO DE COBERTURA MÍNIMA

```
     implicit double precision (a-h,o-z)
      dimension x(50000),y(50000)
c      write(*,*)'numero de pontos da serie'
c      read(*,*)nmax
c         Minimal cover fractal dimension
          nmax=512
      open (1, file='FP26_6f02FLTn.dat')
      read(1,*) (y(i),i=1,nmax)
      open (2, file='FP26_6f02FLTnMC.dat')
      m =nmax
          mm=20
      do 2 j=1,m
          x(j)=dfloat(j)/dfloat(m)
   2      continue
          ymax=-1.0d20
      ymin=1.0d20
      do i=1,nmax
          ymax=dmax1(ymax,y(i))
```

```
          ymin=dmin1(ymin,y(i))
          enddo
c         write(*,*) ymax,ymin
          rmax=ymax-ymin
c     do i=1,nmax
c     y(i)=(y(i)-ymin)/rmax
c         write (2,*) y(i)
c         enddo
          do 10 i=1,mm
          delta=1.d0/dfloat(10*i)
          n1=10*i
      vmin=0.0d0
          do 11 ii=1,n1
          x1=dfloat(ii-1)*delta
          x2=dfloat(ii)*delta
c         write(2,*) x1,x2
          yymax=-1.0d20
      yymin=1.0d20
          do 20 j=1,m
          if(x(j).lt.x1) goto 20
          if(x(j).ge.x2) goto 20
      yymax=dmax1(yymax,y(j))
          yymin=dmin1(yymin,y(j))
 20       continue
          rrmax=yymax-yymin
c      write(2,*) yymax,yymin,rrmax
          vmin=vmin+rrmax
 11    continue
          vvmin=vmin
c      vvmin=vmin*delta
      write(2,*) dlog10(delta),dlog10(vvmin)
c      write(2,*) delta,vmin
 10       continue
      close(unit=2)
```

```
stop
end
```

PROGRAMA CONCATENAÇÃO DE SINAIS (matlab)

```
close all
clear all

for i=57:60
arq=eval(['fopen(''FF' num2str(i) '_9P01' '.DAT'',''r'')']);
pont=fopen('FF15.dat','a');
A=fread(arq,'int8');
dados=char(A');
fwrite(pont,A,'int8');
fclose(arq);
fclose(pont);
end
```

This document was created with Win2PDF available at http://www.win2pdf.com.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.