



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DE
MATERIAIS

Marcos Daniel Gouveia Filho

CARACTERIZAÇÃO DO SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA PROVENIENTE DA
DEFORMAÇÃO AXIAL EM POÇO DE VISITA DE POLIETILENO

FORTALEZA – CE
Fevereiro de 2015

Marcos Daniel Gouveia Filho

CARACTERIZAÇÃO DO SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA PROVENIENTE DA
DEFORMAÇÃO AXIAL EM POÇO DE VISITA DE POLIETILENO

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais. Área de concentração: Processos de Transformação e Degradação de Materiais. Linha de Pesquisa: Mecânica do dano Contínuo.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pontes de Deus

Co-Orientador: Prof. Dr. Lindberg Lima Gonçalves.

FORTALEZA – CE
Fevereiro de 2015

Marcos Daniel Gouveia Filho

CARACTERIZAÇÃO DO SINAL DE EMISSÃO ACÚSTICA PROVENIENTE DA
DEFORMAÇÃO AXIAL EM POÇO DE VISITA DE POLIETILENO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia e Ciência de Materiais.

Aprovado em __/__/__

Prof. Dr. Enio Pontes de Deus (orientador)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Elineudo Pinho de Moura.
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Washington Queiroz. (Externo)
Universidade Federal do Cariri

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- G789c Gouveia Filho, Marcos Daniel.
Caracterização do sinal de emissão acústica proveniente da deformação axial em poço de visita de polietileno / Marcos Daniel Gouveia Filho. – 2015.
130 f. : il. , enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Fortaleza, 2015.
Área de Concentração: Processo de Transformação e Degradação de Materiais.
Orientação: Prof. Dr. Ênio Pontes de Deus.
Coorientação: Prof. Dr. Lindberg Lima Gonçalves.
1. Ciência dos materiais. 2. Polietileno. 3. Análise de Fourier. 4. Emissão acústica. I. Título.

CDD 620.11



Universidade Federal do Ceará
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais

PARECER DA COMISSÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MARCOS DANIEL GOUVEIA FILHO

Caracterização do sinal de emissão acústica proveniente da deformação axial em poço de visita de polietileno

A Comissão de Dissertação de Mestrado composta pelos professores **Enio Pontes de Deus**, Presidente e Orientador, da Universidade Federal do Ceará; **Elineudo Pinho de Moura**, da Universidade Federal do Ceará e **Washington Luiz Rodrigues de Queiroz**, da Universidade Federal do Cariri, considera o candidato:

APROVADO

NÃO APROVADO

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais da Universidade Federal do Ceará, em 02 de fevereiro de 2015.

Prof. Enio Pontes de Deus

Presidente e Orientador

Prof. Elineudo Pinho de Moura

Membro

Prof. Washington Luiz Rodrigues de Queiroz

Membro

RESUMO

A utilização de novos materiais na indústria do saneamento, visa melhorar as condições do tratamento de água e otimizar o desempenho das estruturas de redes coletoras de esgoto. Estudos comprovam que os investimentos realizados em saneamento básico são quatro vezes mais efetivos que na saúde. Poço de visita (PV) é uma estrutura integrante das redes coletoras de esgotos de grande importância, pois nele ocorre o encontro do fluxo de esgotos provenientes de diversas instalações que são orientados e seguem para o posterior tratamento. Os ensaios não destrutivos são largamente utilizados na indústria moderna em todo o mundo para avaliação da qualidade e detecção de variações na estrutura, pequenas falhas superficiais, presença de trincas e outras interrupções físicas, sendo capaz de detectar prematuramente falhas em estruturas permitindo a monitoração constante da estrutura e em tempo real. A técnica de emissão acústica (EA) é eficaz tanto na fase de testes subsequentes à implementação da estrutura, garantindo sua integridade estrutural, quanto no monitoramento em tempo real da estrutura sujeita a carregamento usual de serviço, enquanto desempenha sua função, sem necessidade de interrupção. Para investigar corretamente a estrutura é necessário conhecer como os defeitos se manifestam e sua respectiva atividade acústica. Neste trabalho, os sinais de emissão acústica gerados em poços de visita de polietileno por deformação axial durante carregamento variável são caracterizados tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência criando a assinatura do defeito.

Palavras-chave: Emissão acústica, polietileno, poço de visita, análise de Fourier, análise de ondaletas.

ABSTRACT

The use of new materials in the sanitation industry aims to improve water treatment conditions and optimize the performance of the structures of sewage systems. Studies show that investments in sanitation are four times more effective than health. Manhole (PV) is an integral structure of the collection networks of major importance sewage because it is the sewage flow of the meeting from various facilities that are guided and follow for further processing. Non-destructive tests are widely used in modern industry worldwide to evaluate the quality and detection of changes in structure, small surface flaws, presence of cracks and other physical disruptions, being capable of detecting flaws in structures prematurely allowing constant monitoring and real time frame. The technique of acoustic emission (AE) is effective both during subsequent tests the implementation of the structure, guaranteeing their structural integrity, and in the real-time monitoring of the frame subject to the usual charging service, while performing its function without need of interrupting. To properly investigate the structure is necessary to know how the defects are and their respective acoustic activity. In this study, the acoustic emission signals generated in polyethylene manholes by variable axial deformation during loading are characterized both in time domain and in the frequency domain creating the signature of the defect.

Key words: Acoustic emission, polyethylene, manhole, Fourier analysis, Wavelet analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura intermolecular dos polímeros.	8
Figura 2 - Produção mundial de plástico em milhões de toneladas.	11
Figura 3 - Consumo por segmento produtivo no ano de 2011.	11
Figura 4 - Segmentação do mercado de plásticos no Brasil no ano de 2003.	12
Figura 5 - A) Etileno B) Polietileno.	13
Figura 6 - Esquema de obtenção de alguns polímeros através da destilação do carvão mineral.	14
Figura 7 - Destilação fracionada do petróleo e pirólise do nafta para obtenção das frações gasosas.	14
Figura 8 - Representação da conformação da cadeia polimérica do PE.	18
Figura 9 - Representação da estrutura do esferulito.	18
Figura 10 - Esferulitos (cruz de malta) visto sob microscopia ótica com luz polarizada.	19
Figura 11 - Célula unitária do polietileno.	19
Figura 12 - Poço de visita.	23
Figura 13 - Poço de visita em concreto, alvenaria e tijolos cerâmicos.	24
Figura 14 - Processo de formação de ácidos em redes coletoras de esgoto.	24
Figura 15 - Gráfico de abrasão por número de ciclos da carga (água com areia).	25
Figura 16 - Poço de visita em polietileno.	26
Figura 17 - Etapas do processo de rotolmodagem.	27
Figura 18 - Molde para produção do PV em polietileno.	28
Figura 19 - Consumo dos produtos rotolmodados por segmento.	28
Figura 20 - Processo de coalescência.	29
Figura 21 - Ilustração de uma fonte de emissão acústica.	31
Figura 22 - Fenômenos de reflexão nas fronteiras do material que contém a fonte de emissão acústica (L, onda longitudinal; S, onda transversal; e R, onda superficial).	32
Figura 23 - Analogia à atenuação geométrica.	33
Figura 24 - Onda Longitudinal.	35
Figura 25 - Onda Transversal.	35
Figura 26 - A) Movimento de uma partícula em função do tempo. B) Movimento instantâneo.	36
Figura 27 - Sinal de emissão acústica.	39
Figura 28 - Efeito Kaiser.	41
Figura 29 - Efeito Felicity.	42
Figura 30 - Processo estocástico.	45
Figura 31 - Comparação entre operações FFT e FT.	53
Figura 32 - ilustração dos parâmetros.	55
Figura 33 - Quadrature mirror filter relation, filtro passa baixo "A" e filtro passa alto "D"	60
Figura 34 - Medição da massa A) corpo de prova e B) proveta.	71
Figura 35 - A) Manuseio do macropipetador e B) inserção do líquido.	71
Figura 36 - Corpo de prova para ensaio de tração.	73
Figura 37 - Representação do equipamento de termogravimetria.	75
Figura 38 - Representação do equipamento de DSC.	77
Figura 39 - Parâmetros temporais de aquisição: PDT, HDT e HLT.	80
Figura 40 - Ilustração do ensaio para determinação da velocidade de propagação.	81
Figura 41 - Calibração da carga aplicada pela célula de carga.	82
Figura 42 - Gráfico Tensão x Deformação CP 01.	84
Figura 43 - Gráfico Tensão x Deformação CP 02.	85
Figura 44 - Gráfico Tensão x Deformação CP 03.	85
Figura 45 - Gráfico Tensão x Deformação CP 04.	86
Figura 46 - Gráfico Tensão x Deformação CP 05.	86
Figura 47 - Resultado da termogravimetria.	88
Figura 48 - Resultado da calorimetria diferencial de varredura.	88
Figura 49 - Resultado da espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier.	89
Figura 50 - Resultado de EA durante tração CP 05, tela 1.	91
Figura 51 - Resultado de EA durante tração CP 05, tela 2.	91

Figura 52 - Resultado de EA durante tração CP 05, tela 3.	92
Figura 53 - Resultado de EA durante tração CP 05, tela 4.	92
Figura 54 - Resultado de EA durante tração CP 05, tela 5.	93
Figura 55 - Resultado de EA durante tração CP 05, tela 6.	93
Figura 56 - Resultado de EA durante tração CP 05, tela 7.	94
Figura 57 - Hits e Tensão em função do tempo, CP 05.....	94
Figura 58 - Resultado de EA durante tração CP 05 em função do tempo.	96
Figura 59 - Comparação das reconstruções a partir do 1º nível com o sinal da região elástica.	98
Figura 60 - Comparação das reconstruções a partir do 2º nível com o sinal da região elástica.	99
Figura 61 - Comparação das reconstruções a partir do 3º nível com o sinal da região elástica.	99
Figura 62 - Comparação das reconstruções a partir do 1º nível com o sinal da região plástica.	100
Figura 63- Comparação das reconstruções a partir do 2º nível com o sinal da região plástica.	100
Figura 64- Comparação das reconstruções a partir do 3º nível com o sinal da região plástica.	101
Figura 65 - Comparação das reconstruções a partir do 4º nível com o sinal da região plástica.	101
Figura 66 - Transformada de Fourier sinal da região elástica.	102
Figura 67 - Transformada de Fourier das Reconstruções do sinal da região elástica.	103
Figura 68 - Transformada de Fourier dos Detalhes do sinal da região elástica.	103
Figura 69 - Espectrograma de ondaletas com comparação de picos de frequência do sinal da região elástica em Hz.	104
Figura 70 - Transformada de Fourier sinal da região plástica.	104
Figura 71 - Transformada de Fourier das Reconstruções do sinal da região plástica.	105
Figura 72 - Transformada de Fourier dos Detalhes do sinal da região plástica.	105
Figura 73 - Espectrograma de ondaletas com comparação de picos de frequência do sinal da região plástica em Hz.	106
Figura 74 - Método de ensaio do Poço de Visita.	107
Figura 75 - Método de ensaio do segmento do Poço de Visita.	107
Figura 76 - Transformada de Fourier ensaio PV (região elástica).	108
Figura 77 -Transformada de Fourier dos Detalhes ensaio PV (região elástica).....	108
Figura 78 - Espectrograma de ondaleta e correlação dos picos de frequência ensaio PV (região elástica).....	109
Figura 79 - Transformada de Fourier ensaio segmento PV (região plástica).	109
Figura 80 - Transformada de Fourier do Detalhes ensaio segmento PV (região plástica).....	110
Figura 81 - Espectrograma de ondaleta e correlação dos picos de frequência ensaio segmento PV (região plástica).....	110
Figura 82 - Medida de diâmetro (altura) ANTES e DEPOIS do ensaio.	111
Figura 83 - Medida do diâmetro (largura) ANTES e DEPOIS do ensaio.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Primeira ocorrência e primeira produção industrial de alguns polímeros.....	6
Tabela 2 - Consumo de plásticos em alguns países no ano de 2002 (em 1000 toneladas).....	12
Tabela 3 - Comparação de propriedades do PE alta e baixa densidade, HDPE e LDPE respectivamente.....	16
Tabela 4 - Comparação de propriedades entre PEBD, PEMD e PEAD.....	17
Tabela 5 - Consumo e crescimento de polietileno na Europa, Estados Unidos e Brasil no ano 2010.....	20
Tabela 6 - Velocidades de onda (c) e impedâncias acústicas (Z) de materiais para ondas longitudinais (l), transversais (s) e Rayleigh (r).....	38
Tabela 7 - Escala de dB_{EA}	39
Tabela 8 - Algoritmo para obter os coeficientes de ondaleta.....	67
Tabela 9 - Medidas para cada tipo de corpo de prova.....	73
Tabela 10 - Resultados da medição de densidade indireta.....	83
Tabela 11 - Resultado do ensaio de tração.....	84
Tabela 12 - Resultado da análise térmica.....	88
Tabela 13 - Resultado do ensaio de velocidade de propagação.....	90
Tabela 14 - Energia dos coeficientes de ondaleta do sinal da região elástica.....	97
Tabela 15 - Erro associado ao sinal referente a região elástica.....	97
Tabela 16 - Energia dos coeficientes de ondaleta do sinal da região plástica.....	97
Tabela 17 - Erro associado ao sinal referente a região plástica.....	98

Sumário

1. Introdução.....	1
2. Objetivo.....	4
2.1 Objetivo Geral.....	4
2.2 Objetivo Específico.....	4
3. Revisão Bibliográfica.....	5
3.1 Polímeros.....	5
3.1.1 Conceito Histórico.....	5
3.1.2 Definição.....	6
3.1.3 Mercado.....	10
3.2 Polietileno.....	13
3.2.1 Conceito.....	13
3.2.2 Mercado.....	20
3.2.3 Propriedades.....	21
3.3 Poço De Visita (PV).....	22
3.3.1 Conceito.....	22
3.3.2 Rotomoldagem.....	26
3.4 Emissão Acústica.....	30
3.4.1 Conceito.....	30
3.4.2 Atenuação De Sinais De Emissão Acústica.....	32
3.4.3 Propagação Das Ondas.....	33
3.4.4 Características Da Onda De Emissão Acústica.....	36
3.4.5 Efeito Kaiser.....	41
3.4.6 Efeito Felicity.....	42
3.5 Análise de Séries Temporais.....	43
3.5.1 Processos estocásticos.....	44
3.5.2 Análise de Fourier.....	45
3.5.2.1 Análise Espectral.....	54
3.5.3 Análise de Ondaletas.....	55
3.5.3.1 Ondaletas.....	57
3.5.3.2 Análise Multirresolução.....	61
3.5.3.3 Transformada de Ondaletas.....	63
4. Materiais e Métodos.....	69
4.1 Amostras.....	69

4.2	<i>Densidade</i>	69
4.3	<i>Ensaio de Tração</i>	72
4.4	<i>Análise Térmica</i>	74
4.4.1	<i>Análise Termogravimétrica (TGA)</i>	74
4.4.2	<i>Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)</i>	76
4.5	<i>Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier</i>	77
4.6	<i>Emissão Acústica</i>	79
4.7	<i>Procedimento Experimental</i>	80
4.7.1	<i>Velocidade de Propagação</i>	80
4.7.2	<i>Ensaio no Poço de Visita</i>	81
5.	<i>Resultados e Discussão</i>	83
5.1	<i>Densidade</i>	83
5.2	<i>Ensaio de Tração</i>	84
5.3	<i>Análise Térmica</i>	87
5.4	<i>Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier</i>	89
5.5	<i>Emissão Acústica</i>	90
6.	<i>Conclusão</i>	113
7.	<i>Sugestão de Trabalhos Futuros</i>	115
8.	<i>Bibliografia</i>	116

1. Introdução

A preservação do meio ambiente e da saúde pública é o principal papel da indústria do saneamento, através da prestação de serviços públicos de abastecimentos de água tratada e esgotamento sanitário. Estudos comprovam que os investimentos realizados em saneamento básico são quatro vezes mais efetivos que na saúde (Teixeira, 2011).

A integridade estrutural de equipamentos é de importância vital na operação das instalações industriais e sanitárias. Redução de custos, menor número de paradas para manutenções, aumento de produtividade e longevidade, menores riscos aos operadores e redução nas ocorrências de danos ambientais, são os benefícios diretos mais tácitos, mas outras vantagens podem ser levantadas quando da utilização confiável das instalações. A pesquisa “A situação da manutenção no Brasil”, realizada em 2011 pela Associação Brasileira de manutenção (ABRAMAN), mostra que os custos com esta atividade no país representam 3,95% do PIB, o equivalente R\$ 140 bilhões anuais. Neste âmbito, a manutenção preditiva ocupa lugar de destaque, tendo em vista que evita paradas desnecessárias para manutenções, enquanto mantém os equipamentos em condições operacionais satisfatórias.

Durante a operação e a manutenção de redes coletoras de esgoto com os materiais convencionalmente utilizados, as falhas ocorrem por desgaste prematuro das juntas de vedação ou danos no concreto, oriundos dos agentes agressivos presentes no meio. Desta forma, o solo que ora está submetido também a esforços mecânicos devido ao fluxo de automóveis, fica susceptível a ser carregado para dentro dos poços de visita, entupindo os dutos coletores ligados ao mesmo, havendo o transbordamento de esgoto, e o abatimento da pavimentação próximo ao PV (com o surgimento de “buracos” na via pública). Os prejuízos são incalculáveis, pois além da poluição ambiental, trazendo problemas de saúde pública, podem até causar acidentes com vítimas fatais no trânsito.

Não obstante, a areia, carregada para dentro da rede coletora ainda causa graves problemas nas unidades de bombeamento das estações elevatórias e

estações de tratamento de esgoto. Inicialmente há o desgaste prematuro das peças do conjunto motor/bomba, responsáveis por bombear o esgoto bruto para as unidades adjacentes e tratamento. Já no índice de eficiência do tratamento do esgoto, com a presença de chuvas, as vazões aumentam significativamente, diluindo o esgoto a ser tratado e danificando os equipamentos de tratamento com a presença de areia.

Visando solucionar esses problemas, melhorar a qualidade e condições de tratamento de esgoto, busca-se implementar poços de visita produzidos de polietileno, material polimérico com características apreciáveis para essa finalidade, como, por exemplo, seu caráter inerte, peso, resistência e vida útil.

Após instalados os PV estão sujeitos a diversas solicitações, dentre elas a mais frequente e comum é a carga compressiva exercida pelos veículos que trafegam na região. A técnica não destrutiva de emissão acústica tem, neste caso, como principal objetivo monitorar o PV sujeito a cargas usuais de serviço investigando sua integridade estrutural para assegurar seu correto desempenho mecânico e/ou detectando defeitos, através da análise tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência dos sinais de emissão acústica gerados espontaneamente pelo próprio PV perante solicitação.

Os sinais de emissão acústica podem ser entendidos como variáveis aleatórias de um processo estocástico não estacionário. Por tanto, faz-se necessária a análise tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência. No domínio do tempo serão consideradas características como amplitude, contagem, duração, *root mean square* (RMS), tempo de subida, dentre outros. No domínio da frequência as características ou espectros serão obtidos por duas maneiras: análise de Fourier e análise de Ondaletas.

A análise das séries temporais no domínio da frequência é feita estudando-se o espectro de potência obtido através da transformada de Fourier. O teorema de Fourier diz que se pode expressar uma função periódica como uma soma de uma constante e de uma série de termos de senos e co-senos, onde as frequências

associadas com essas funções são múltiplos inteiros (harmônicos) da frequência fundamental (Hilborn, 1994).

A análise de ondaletas é capaz de revelar aspectos de dados que faltam em outras técnicas de análise de sinal, aspectos como tendências, pontos de degradação, descontinuidades em derivados mais altas, e de auto-similaridade. Além disso, porque proporciona uma visão diferente de dados do que aqueles apresentados por técnicas tradicionais, a análise de ondaletas muitas vezes pode comprimir ou retirar o ruído de um sinal sem degradação apreciável (Misiti et. al, 2001).

Ondaletas são funções matemáticas que separam os diferentes componentes de frequência e os estuda cada qual com sua resolução e escala correspondentes. O procedimento de análise de ondaletas inicia-se com a adoção de uma função padrão, chamada de ondaleta mãe. Os algoritmos das ondaleta processam os dados em diversas escalas(resoluções). A análise temporal é realizada com uma versão contraída(versão de alta frequência) da ondaleta mãe, enquanto que a análise de frequência é realizado com uma versão dilatada (de baixa frequência). Assim são construídas janelas de diversos tamanhos. Portanto, características locais podem ser melhor descritas com pequenas ondas que têm extensão local (Venkataramanan, 2004).

Apenas olhando para fotos de ondaletas e ondas senoidais, você pode ver intuitivamente que sinais com mudanças bruscas pode ser melhor analisado com uma ondaleta irregular do que com um senóide suave (Misiti et. al, 2001).

2. *Objetivo*

2.1 *Objetivo Geral*

Diagnosticar a presença de defeitos no poço de visita composto de polietileno através de uma técnica não destrutiva que permita o monitoramento constante e análise em tempo real da integridade estrutural do mesmo, sem a necessidade de qualquer intervenção em sua função ou em seu desempenho, sob carregamento habitual de serviço visando criar um banco de dados que sirva como referência segura para testes, aplicações e estudos posteriores, contribuindo, assim, para utilização dos poços de visita compostos de polietileno no Brasil.

2.2 *Objetivo Específico*

Caracterizar os sinais de emissão acústica, tanto no domínio do tempo quanto da frequência, provenientes do defeito de deformação plástica axial em poço de visita composto de polietileno em regime de carga de compressão. Estabelecendo, assim, a assinatura do defeito de deformação plástica em poço de visita composto de polietileno.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 *Polímeros*

3.1.1 *Conceito Histórico*

Os materiais poliméricos estão presentes na sociedade desde a antiguidade, em forma de graxas e materiais resinosos utilizados, por exemplo, pelos egípcios e romanos para vedar vasilhames, carimbar e colar documentos. No século XVI os portugueses e espanhóis tiveram o primeiro contato com o produto derivado do látex, proveniente de uma árvore natural das Américas, a “*Havea brasilienses*”, que apresentava características de alta elasticidade e flexibilidade desconhecidas até então. Levado a Europa recebeu o nome de borracha pela sua capacidade de apagar marcas de lápis. Após levar à Europa uma bola de borracha, perceberam que ela não pulava mais quando arremessada ao chão. Havia a percepção, influenciada pela teoria do vitalismo, de que a borracha pulava porque estaria viva, já que havia sido retirada de uma árvore, e teria morrido durante a travessia do oceano. Sua utilização foi restrita até a descoberta da vulcanização por Charles Goodyear, em 1839. A vulcanização (nome dado em honra ao deus Vulcano - das profundezas e do fogo), feita principalmente com enxofre, confere à borracha as características de elasticidade, não pegajosidade e durabilidade tão comuns nas aplicações dos dias atuais (Canevarolo Jr., 2006).

O primeiro polímero sintético foi produzido por Leo Baekeland (1863-1944), em 1912, obtido através da reação entre fenol e formaldeído. Esta reação gerava um produto sólido (resina fenólica), hoje conhecido por baquelite, termo derivado do nome de seu inventor. Até o final da Primeira Grande Guerra Mundial, todas as descobertas nesta área foram por acaso, por meio de regras empíricas. Somente em 1920, Hermann Staudinger (1881-1965), cientista alemão, propôs a teoria da macromolécula. Este século foi repleto de grandes descobertas na área como as reações de condensação que deram origem aos poliésteres e às poliamidas por Wallace H. Carothers, esta última classe de novos materiais foi batizada de náilon. E finalmente em 1933 os químicos ingleses Reginald Gibson e Eric Fawcett produzem as primeiras amostras de polietileno.

A Tabela 1 mostra, de forma bastante resumida, a evolução dos principais polímeros comerciais (Canevarolo Jr., 2006).

Tabela 1- Primeira ocorrência e primeira produção industrial de alguns polímeros.

Polímero	1ª Ocorrência	1ª Produção industrial
PVC	1915	1933
PS	1900	1936/7
PEBD (LDPE)	1933	1939
Nylon	1930	1940
PEAD (HDPE)	1953	1955
PP	1954	1959
PC	1953	1958

Fonte: Ciência dos Polímeros.

3.1.2 Definição

Começando pelo termo mais importante, seria polímero ou seria macromolécula? Se existe alguma diferença entre estes dois termos, qual seria ela? Pois bem, macromolécula, como próprio nome já diz, é uma molécula grande, uma molécula com alto peso molecular. E polímero também é uma molécula grande, porém seu alto peso molecular origina-se da repetição de segmentos ao longo da cadeia (Lucas., Soares., & Monteiro., 2001).

Canevarolo Jr., 2006, traz a seguinte definição para os termos:

Polímero - material orgânico (ou inorgânico) de alta massa molar (acima de dez mil, podendo chegar a dez milhões), cuja estrutura consiste na repetição de pequenas unidades (meros). Macromolécula formada pela união de moléculas simples ligadas por ligação covalente.

Macromolécula - uma molécula de alta massa molar, mas que não tem necessariamente, em sua estrutura, uma unidade de repetição.

Monômero - molécula simples que dá origem ao polímero. Deve ter funcionalidade de no mínimo 2 (ou seja, ser pelo menos bifuncional).

Mero - unidade de repetição da cadeia polimérica.

A palavra polímero origina-se do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição). Assim polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. A matéria-prima para a produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição. Dependendo do tipo do monômero (estrutura química), do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, poderemos dividir os polímeros em três grandes classes: Plásticos, Borrachas e Fibras (Canevarolo Jr., 2006).

Os Plásticos são materiais poliméricos de alta massa molar, sólido como produto acabado, que pode ser subdividido em duas principais classes:

Termoplásticos - plásticos com a capacidade de amolecer e fluir quando sujeitos a um aumento de temperatura e pressão. Quando estes são retirados, o polímero solidifica-se em um produto com formas definidas. Novas aplicações de temperatura e pressão produzem o mesmo efeito de amolecimento e fluxo. Esta alteração é uma transformação física, reversível. Quando o polímero é semicristalino, o amolecimento se dá com a fusão da fase cristalina. São fusíveis, solúveis, recicláveis. Exemplos: polietileno (PE), poliestireno (PS), poliamida (Náilon), etc.

Termofixo (ou termorrígido ou termoendurecido) - plástico que amolece uma vez com o aquecimento, sofre o processo de cura no qual se tem uma transformação química irreversível, com a formação de ligações cruzadas, tornando-se rígido. Posteriores aquecimentos não mais alteram seu estado físico, ou seja, não amolece mais, tornando-se infusível, insolúvel e não recicláveis. Exemplos: baquelite, resina epóxi (Canevarolo Jr., 2006).

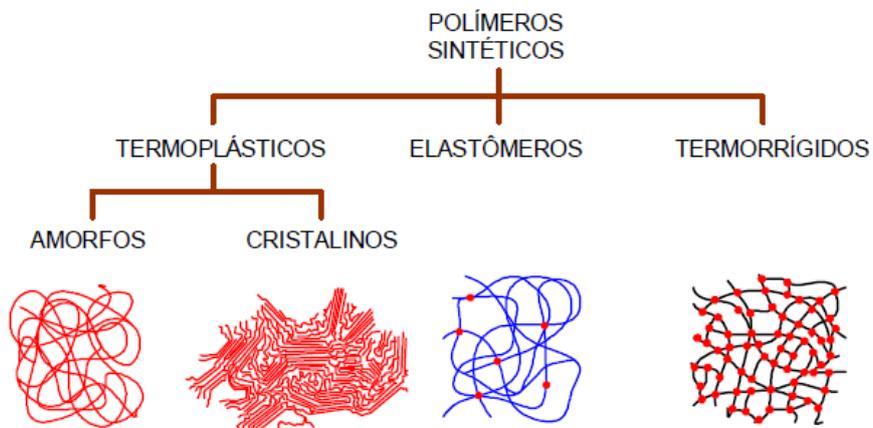
As Borrachas são elastômeros, tanto de origem natural como sintética. E por sua vez elastômero é um polímero que, à temperatura ambiente, pode ser deformado repetidamente com pelo menos duas vezes o seu comprimento original. Retirado o esforço, deve voltar rapidamente ao tamanho original. Para apresentar estas características, os elastômeros normalmente possuem cadeias flexíveis amarradas umas às outras, com uma baixa densidade de ligação cruzada. Isso define as seguintes propriedades básicas:

- a) aceitar grandes deformações (> 200%), mantendo boa resistência mecânica e módulo de elasticidade quando deformado.
- b) recuperar rapidamente a deformação, depois de retirado o esforço.
- c) ter recuperação total da deformação.

As Fibras são termoplásticos orientados com a direção principal das cadeias poliméricas posicionadas paralelas ao sentido longitudinal (eixo maior). Deve satisfazer a condição geométrica de o comprimento ser, no mínimo, cem vezes maior que o diâmetro ($L/D > 100$). A orientação das cadeias e dos cristais, feita de modo forçado durante a fiação, aumenta a resistência mecânica desta classe de materiais, tornando-os possíveis de serem usados na forma de fios finos. Como exemplos, têm-se as fibras de poliácrlonitrila (PAN), náilons, o poliéster, etc.

A Figura 1 representa os polímeros sintéticos de acordo com sua estrutura intermolecular.

Figura 1 - Estrutura intermolecular dos polímeros.



Fonte: Cristalinidade dos Polímeros.

Reforçando a definição quanto à classificação dos polímeros o autor Paoli descreve de forma semelhante, como seguinte:

Uma outra forma genérica de classificar os polímeros está relacionada com a sua forma de processamento, podendo ser divididos em termoplásticos, termofixos, plásticos de engenharia e elastômeros. Os termoplásticos são aqueles que podem ser moldados por aquecimento por diversas vezes. Os termofixos são os polímeros que são moldados na forma de pré-polímero e depois são submetidos a um processo de “cura”, quando assumem a sua forma definitiva sem poderem ser

moldados novamente por aquecimento. Os plásticos de engenharia podem ser classificados como materiais poliméricos que podem ser moldados a frio (por usinagem, por exemplo), mas a maioria deles também é moldada como termoplástico. Os elastômeros, gomas ou borrachas, são materiais com alta elasticidade, podendo sofrer grandes deformações sem se romperem. De um modo geral, os elastômeros necessitam passar por um processo químico de reticulação (vulcanização no caso da reação ser feita com enxofre) para serem usados. No entanto, também existem elastômeros que são moldados pelos mesmos processos usados para os termoplásticos, são os chamados “elastômeros termoplásticos”.

Todas essas formas de classificar os polímeros são bastante genéricas e comportam muitas exceções. A maioria dos termos usados na área dos polímeros foi cunhado pelos usos de mercado, podendo haver muita superposição nestas classificações (Paoli, 2008).

Canevarolo Jr. ,2006, descreve que: “De um modo geral, os polímeros podem apresentar pelo menos três temperaturas de transição importantes: transição vítrea, fusão cristalina e cristalização”.

- Temperatura de transição vítrea ou T_g .

Esta temperatura é o valor médio da faixa de temperatura que, durante o aquecimento de um material polimérico de uma temperatura muito baixa para valores mais altos, permite que as cadeias poliméricas da fase amorfa adquiram mobilidade, ou seja, adquiram possibilidade de mudança de conformação. Abaixo de T_g o polímero não tem energia interna suficiente para permitir o deslocamento de uma cadeia com relação a outra por mudanças conformacionais. Ele está no estado vítreo caracterizado por se apresentar duro, rígido e quebradiço como um vidro, por isto g , do inglês “*glass*”.

- Temperatura de fusão cristalina ou T_m .

Esta temperatura é o valor médio da faixa de temperatura em que, durante o aquecimento, desaparecem as regiões cristalinas com a fusão dos cristalitos (m do inglês “*melt*”). Neste ponto, a energia do sistema atinge o nível necessário para vencer as forças intermoleculares secundárias entre as cadeias da fase cristalina,

destruindo a estrutura regular de empacotamento, mudando do estado borrachoso para o estado viscoso (fundido). Esta transição só ocorre na fase cristalina, portanto, só tem sentido se aplicada para polímeros semicristalinos.

- Temperatura de cristalização ou T_c .

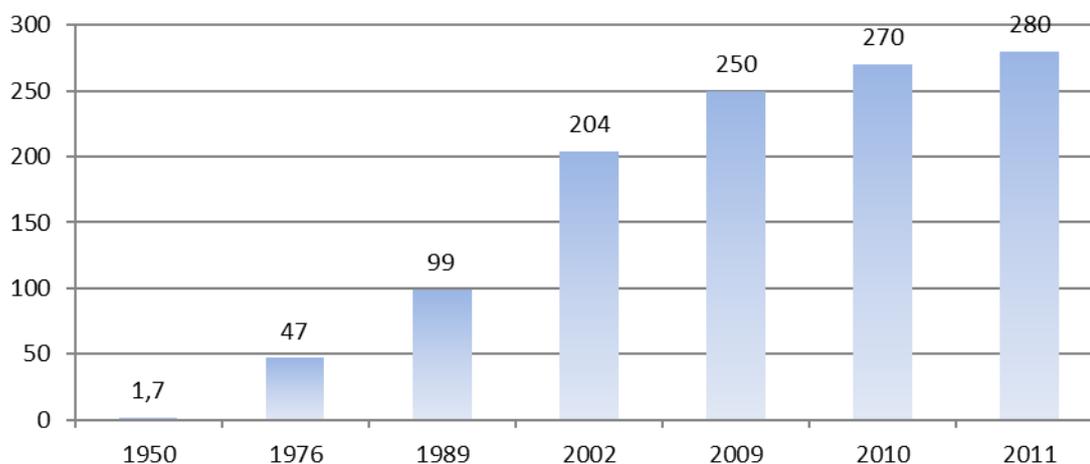
Durante o resfriamento de um polímero semicristalino a partir de seu estado fundido, isto é, de uma temperatura acima de T_m , ele atingirá uma temperatura baixa o suficiente para que, em um dado ponto dentro da massa polimérica fundida, um número grande de cadeias poliméricas se organize espacialmente de forma regular. Esta ordenação espacial permite a formação de uma estrutura cristalina (cristalito ou lamela) naquele ponto. Cadeias em outros pontos também estarão aptas para se ordenarem formando novos cristais. Isto se reflete em toda a massa polimérica produzindo-se a cristalização da massa fundida.

Dentro deste mundo de materiais poliméricos discutiremos particularmente o polietileno, abordando de uma forma abrangente e atual suas principais características e propriedades quanto a um polímero.

3.1.3 Mercado

A indústria do plástico cresce continuamente nos últimos 60 anos. A produção mundial cresceu de 1,7 milhão de toneladas, em 1950, para 280 milhões de toneladas, em 2011 (Figura 2). Destaca-se o aumento exponencial entre os anos 50 e os anos 70, e é possível observar como a produção de polímeros dobrou dos anos 70 para os 90, depois da qual os valores de produção praticamente triplicaram nos anos 2000. Apesar da crise econômica mundial e da queda no consumo e produção de plásticos em 2008, 2009 e 2010, o mercado vem se recuperando e a produção de plásticos em 2011 foi recorde, com um crescimento em relação a 2010 de 3,7%. (PLASTICS EUROPE, 2012).

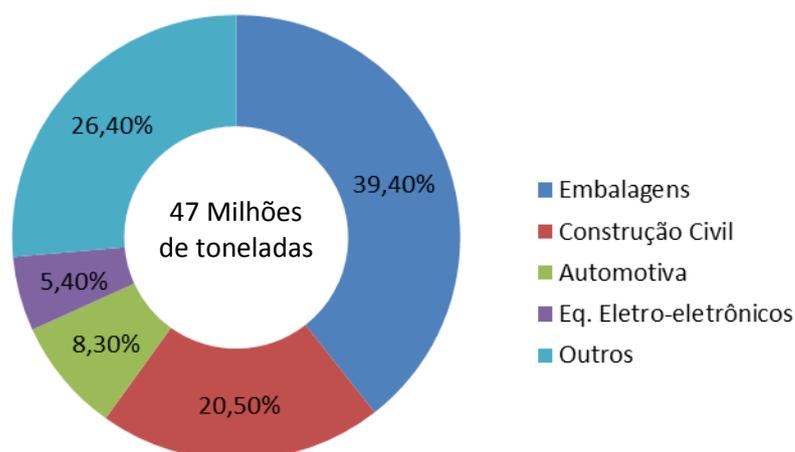
Figura 2 - Produção mundial de plástico em milhões de toneladas.



Fonte: PLASTICS EUROPE, 2012.

Com relação ao consumo por segmento em 2011, a liderança está com as embalagens plásticas (39,4%), seguidas por: indústria da construção civil (20,5%), indústria automotiva (8,3%) e indústria de equipamentos eletroeletrônicos (5,4%). A Figura 3 mostra a representatividade destes segmentos no total da demanda europeia, em 47 milhões de toneladas. A categoria “outros” inclui segmentos menores, como eletrodomésticos, agricultura, esporte, saúde, segurança, dentre outros. (PLASTICS EUROPE, 2012).

Figura 3 - Consumo por segmento produtivo no ano de 2011.



Fonte: PLASTICS EUROPE, 2012.

A Tabela 2 apresenta o consumo de plástico nos principais países no mundo, em 2002, em milhares de toneladas. Os EUA foram (e são) os maiores

consumidores, com 43 milhões de toneladas. O Brasil, em oitavo lugar, consumiu apenas um décimo deste valor. O consumo mundial estimado, para 2002, foi de 120 milhões de toneladas anuais. Para uma simples comparação, assumindo-se a densidade média de 1g/cm³, esta quantidade seria suficiente para formar uma cinta em volta de toda a Terra de um metro de altura por três metros de largura (Canevarolo Jr., 2006).

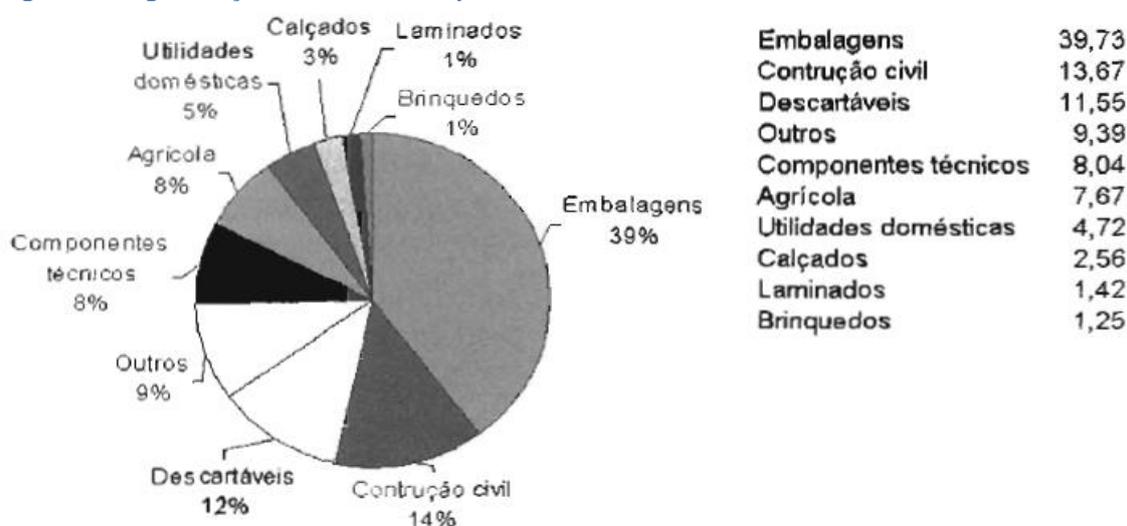
Tabela 2 - Consumo de plásticos em alguns países no ano de 2002 (em 1000 toneladas).

1º EUA	43 000	4º Itália	7 000	7º Inglaterra	4 700
2º Alemanha	13 000	5º França	5 300	8º Brasil	4 200
3º Japão	11 000	6º Coreia do Sul	5 000		

Fonte: Ciência dos Polímeros.

Em 2002, existiam no Brasil 7898 empresas no setor de transformação do plástico, empregando 220000 pessoas. Classificando-as pelo número de empregados, constatamos que 34% delas têm até quatro empregados, 37% têm entre cinco e nove, 23% entre 20 e 100, e apenas 5% têm mais de 100 empregados, evidenciando o fato de que a maioria delas são micro e pequenas, normalmente operadas por núcleos familiares. A segmentação do mercado de plástico no Brasil, em 2003, está apresentada na Figura 4. O setor de embalagens é o segmento que mais utilizam plásticos, correspondendo a mais de um terço de todo o consumo brasileiro (Canevarolo Jr., 2006).

Figura 4 - Segmentação do mercado de plásticos no Brasil no ano de 2003.



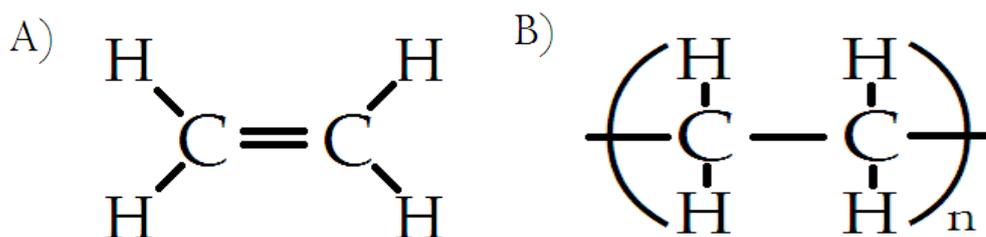
Fonte: Ciência dos Polímeros.

3.2 Polietileno

3.2.1 Conceito

O Polietileno foi produzido primeiramente em laboratórios das indústrias Imperial Chemical, Ltd. (ICI), Inglaterra, em um experimento fortuito onde o etileno (e outros elementos químicos que permaneceram inertes) foram submetidos a pressão de 1400atm a 170°C. O oxigênio presente na reação permitiu que houvesse iniciação no processo de polimerização. O fenômeno foi descrito pela primeira vez em 1936 por E. W. Fawcett em Staudinger (Billmeyer, 1984).

O Polietileno, como o próprio nome sugere, tem o etileno como monômero (Figura 5). A transformação do etileno em polietileno só é possível devido a sua bifuncionalidade da molécula, que possui uma dupla ligação reativa podendo assim ter a ligação π instabilizada e dissociada, levando a formação de duas ligações simples, possibilitando assim o processo de polimerização. Devido ao tipo de polimerização, o polietileno é classificado como polímero de adição, pois durante seu processo de formação não há perda de massa na forma de compostos de baixo peso molecular, assumindo assim a conversão total do peso do monômero em polímero.

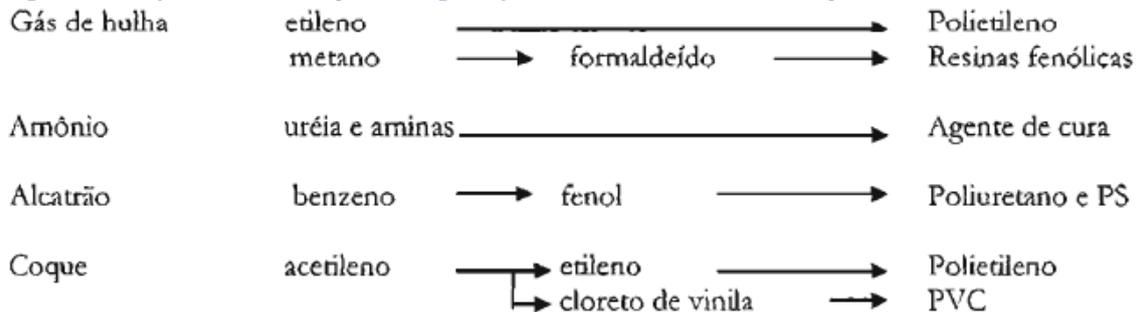


Fonte: Autor.

É possível obter-se o etileno através de duas fontes de matéria-prima o carvão mineral e o petróleo. A hulha, ou carvão mineral, quando submetida a uma destilação seca produz gases de hulha, amônio, alcatrão de hulha e coque (resíduos). Do gás de hulha é possível separar o etileno, e do coque obtém-se acetileno que por hidrogenação produz o etileno (Figura 6). O petróleo é a fonte

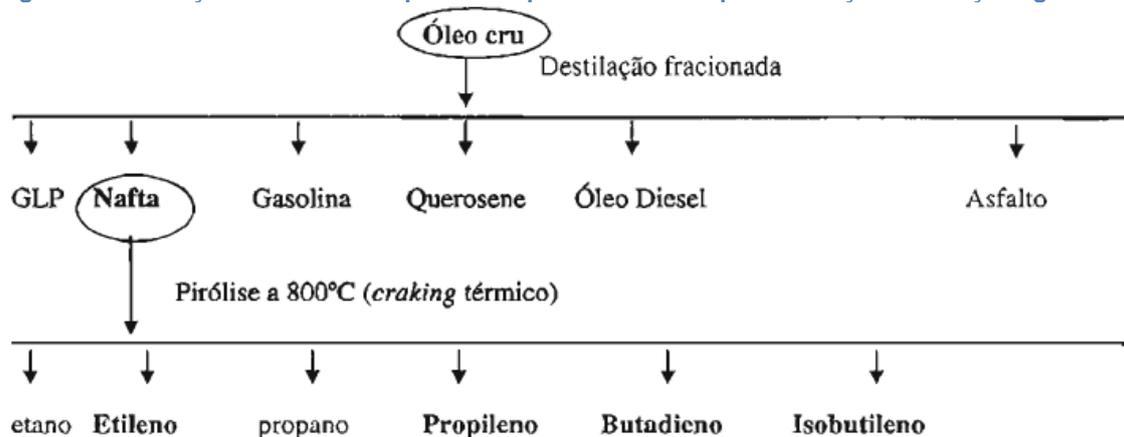
mais importante, por meio da destilação fracionada do óleo cru, várias frações podem ser obtidas (GLP, nafta, gasolina, querosene, óleo Diesel, graxas parafínicas, óleos lubrificantes e, por fim, piche), sendo que a fração de interesse para polímeros é o nafta, este após um craking térmico apropriado (pirólise a aproximadamente 800°C e catálise), gera várias frações gasosas contendo moléculas saturadas e insaturadas entre elas o etileno (Erro! Fonte de referência não encontrada.).

Figura 6 - Esquema de obtenção de alguns polímeros através da destilação do carvão mineral.



Fonte: Ciência dos Polímeros.

Figura 7 - Destilação fracionada do petróleo e pirólise do nafta para obtenção das frações gasosas.



Fonte: Ciência dos Polímeros.

Para a produção a partir do petróleo, tem-se um setor industrial responsável por cada etapa, que é apresentada a seguir:

Indústria petroquímica de primeira geração é definida como grandes empresas, responsáveis pelo craqueamento da nafta e pela produção de moléculas insaturadas de baixa massa molar, conhecidas por monômeros. Estes materiais serão polimerizados diretamente ou usados pela indústria petroquímica em outros processos. Como principais exemplos, tem-se o etileno, o propileno e o butadieno.

A indústria petroquímica de segunda geração são empresas de grande porte, normalmente instaladas próximas às de primeira geração, que recebem diretamente, por dutos, o monômero (normalmente na forma líquida), polimerizando-o e fazendo o polímero. Para ser economicamente viável, uma empresa desta geração, que produz um polímero convencional, como o polipropileno, por exemplo, deve ser capaz de produzir pelo menos meio milhão de toneladas por ano (isto significa produzir um saco de 25 kg a cada dois segundos!). Em contrapartida, a produção de polímeros especiais é feita em pequena escala.

Indústria de terceira geração são empresas de tamanhos variados, desde micro até grandes, que compram o polímero, na forma de grão, líquido ou pó, e o processam, produzindo artigos na sua forma final para uso. Empregam técnicas como extrusão, injeção, calandragem, termoformagem, etc. Vendem seus produtos diretamente ao consumidor final ou a indústrias de quarta geração.

Indústria de quarta geração são empresas de portes variados, que compram os artigos plásticos e os montam em itens maiores. O maior exemplo desta classe são as montadoras automobilísticas.

O polietileno é um polímero homogêneo de cadeia carbônica do grupo das poliolefinas, ou seja, é um polímero constituído de um único mero e sua cadeia polimérica é constituída apenas de carbono e hidrogênio que são originados de monômeros de hidrocarboneto alifáticos insaturado contendo uma dupla ligação carbono-carbono reativa. A disposição dessas cadeias confere características intrínsecas ao material, em nosso caso as disposições relevantes são as cadeias lineares e cadeias ramificadas. Cadeias lineares possibilitam uma maior organização com maior empacotamento, maior cristalinidade logo maior densidade, estas são atribuídas ao polietileno de alta densidade (PEAD), já as cadeias ramificadas possibilitam uma menor organização refletindo em um menor empacotamento, acumulando vazios, logo menor cristalinidade que resulta em uma menor densidade, no caso, polietileno de baixa densidade (PEBD), existe ainda um caso intermediário denominado polietileno de média densidade (PEMD). O polietileno é parcialmente cristalino, flexível, cujas propriedades são acentuadamente influenciadas pela quantidade relativa das fases amorfa e cristalina.

O reflexo desse arranjo atômico espacial fica evidente quando comparamos as características dos tipos de polietileno. Podemos observar essa comparação segundo os autores Canevarolo Jr. (Tabela 3) e Albuquerque (Tabela 4) logo adiante:

Tabela 3 - Comparação de propriedades do PE alta e baixa densidade, HDPE e LDPE respectivamente.

Tipo de cadeia		HDPE	LDPE
		linear	ramificada
Ramificações	Longa (por molécula)	~ zero	< 1
	Curta (por 1 000 átomos de C)	C2	20
		C4	10
Densidade (g/cm ³)		0,95 ~ 0,96	0,92 ~ 0,93
Temperatura de fusão (°C)		135	110
Porcentagem de cristalinidade (%)		90	60
Resistência à tração (MPa)		20 – 38	4 – 16
Elongação na ruptura (%)		200 – 500	100 – 200

Fonte: Ciência dos Polímeros.

A maioria das propriedades físicas, mecânicas e termodinâmicas dos polímeros semicristalinos depende do grau de cristalinidade e da morfologia das regiões cristalinas. Quanto maior a cristalinidade, mais elevadas são as propriedades de densidade, rigidez, estabilidade dimensional, resistência química, resistência à abrasão, temperatura de fusão (T_m), temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de utilização, etc. Por outro lado, reduzem-se as propriedades de resistência ao impacto, alongação na ruptura, claridade óptica, etc (Canevarolo Jr., 2006).

Tabela 4 – Comparação de propriedades entre PEBD, PEMD e PEAD.

Testes DIN, ASTM	Propriedades	Densidade dos PE's		
		Baixa	Média	Alta
Físicas				
D(53479)	Densidade (g/cm ³)	0,910-0,925	0,926-0,940	0,941-0,965
D(53473)	Absorção de água 24h, 3mm de espessura (%)	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mecânicas				
D(53455)	Resistência à tração (10 ² Kgf/cm ²)	0,4-1,4	0,8-2,4	2,1-3,8
D(53455)	Alongamento na ruptura (%)	90/800	50/600	20/1000
D(53457)	Módulo de flexão (10 ⁴ Kgf/cm ²)	0,06-0,5	0,5-1,0	0,7-1,5
D256 (ASTM)	Resistência ao impacto (Kg)	Não quebra	—	—
D785 (ASTM)	Dureza Rockwell R	10	15	65
Térmicas				
D(52612)	Condutividade térmica (10 ⁻⁴ cal/s cm ² °C/cm)	8,0	8,0-10,0	11,0-12,4
D(52328)	Expansão térmica linear (10 ⁻³ cm/°C)	20	15	14
D(53461)	Temperatura de deflexão (°C)	32-42	42-50	45-55
Ópticas				
D542 (ASTM)	Índice de refração	1,51	1,52	1,52
D1003 (ASTM)	Transmitância (%)	4-50	40-50	10-50

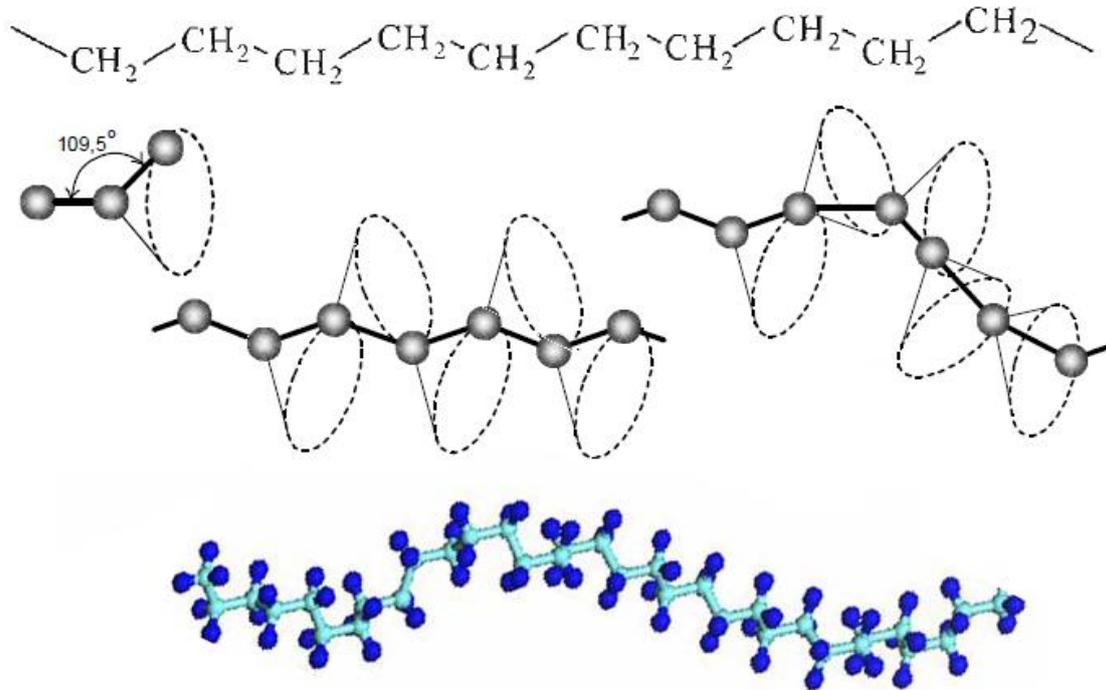
Fonte: O plástico na prática.

Este conjunto de propriedades classifica o polietileno como um plástico, pois apresenta estado sólido na sua temperatura de utilização e dentro deste grupo ainda podemos classifica-lo como termoplástico.

A parte cristalina do polietileno é constituída de moléculas regularmente organizadas dentro de lamelas com a conformação em zig-zag (Figura 8). As lamelas são interconectadas por moléculas de interligação, as quais formam pontes intermoleculares que constituem as regiões amorfas. A estrutura formada cresce radialmente formando esferulitos (Figura 9). Esferulitos que apresentam, sob luz polarizada, sequência regular de anéis concêntricos em formato de cruz de malta (Figura 10). A estrutura cristalina típica do polietileno é a hexagonal ortorrômbica

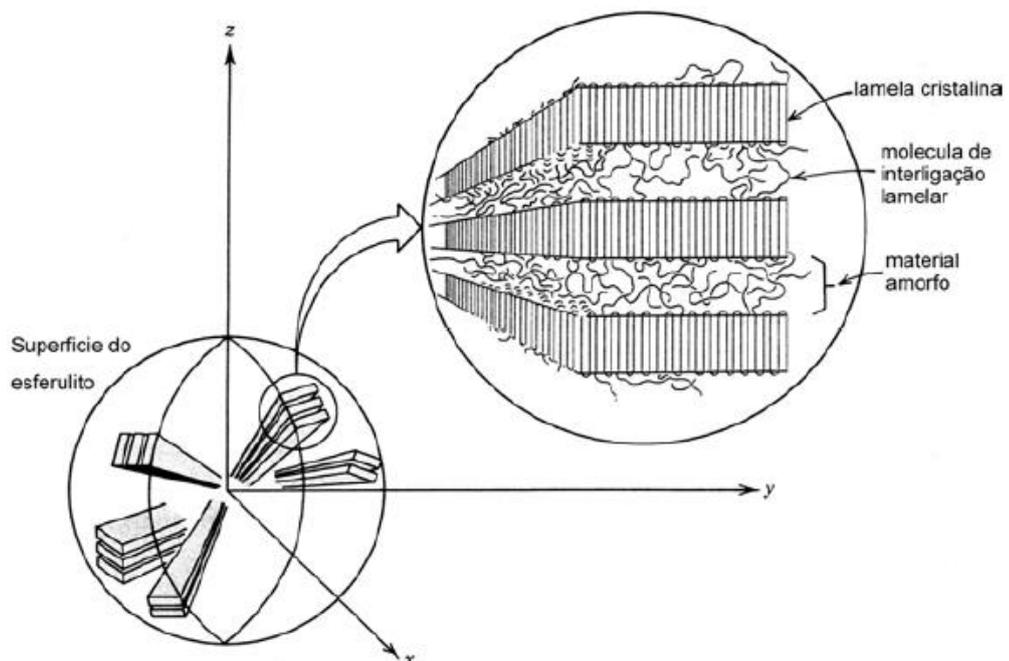
com os seguintes parâmetros de rede: $a = 0.791 \text{ nm}$; $b = 0.494 \text{ nm}$; $c = 0.255 \text{ nm}$ (Figura 11) (Callister Jr, 1994).

Figura 8 - Representação da conformação da cadeia polimérica do PE.



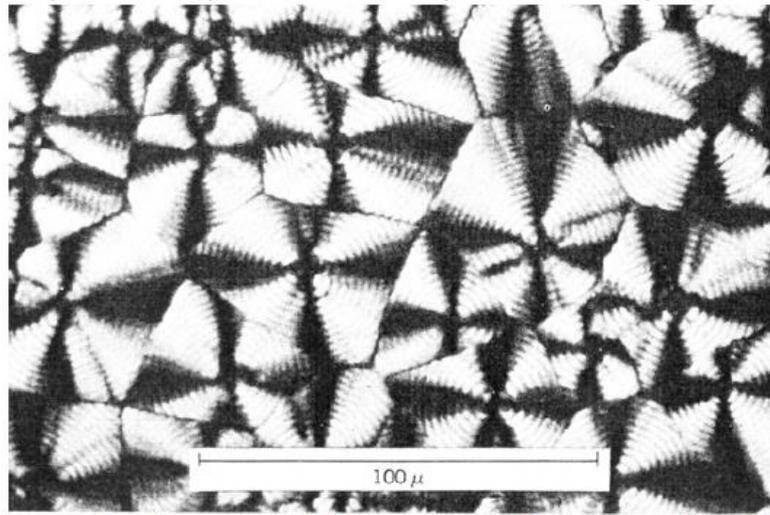
Fonte: Autor.

Figura 9 - Representação da estrutura do esferulito.



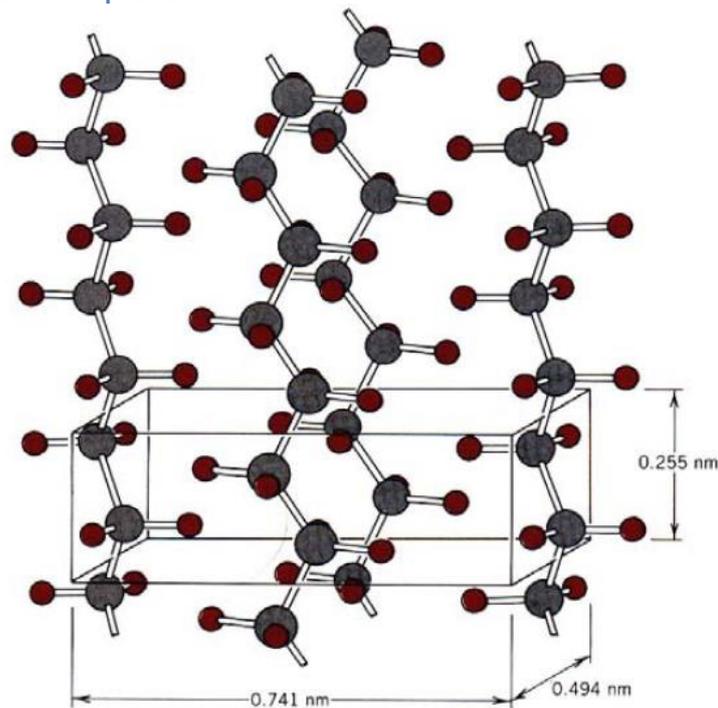
Fonte: Materials Science and Engineering.

Figura 10 - Esferulitos (cruz de malta) visto sob microscopia ótica com luz polarizada.



Fonte: Materials Science and Engineering.

Figura 11 - Célula unitária do polietileno.



Fonte: Materials Science and Engineering.

De uma maneira simplificada podemos fazer uma síntese das propriedades do polietileno quanto a um polímero da seguinte maneira:

- Ocorrência → Sintéticos.
- Forma molecular → Linear / Ramificado.
- Estrutura Química → Poliolefinas.
- Método de Preparação → Polímeros de adição.

- Comportamento Mecânico → Plástico
- Características Tecnológicas (Fusibilidade) → Termoplásticos.
- Conformação → Zig-zag.
- Variedade de meros → Homopolímero.

3.2.2 Mercado

Reprojetado em função da globalização, o mercado brasileiro de polietileno ganhou novo perfil em volume e qualidade, gerando maior oferta e tipos (*grades*) de melhor desempenho e produtividade para a indústria de transformação. As poliolefinas representam aproximadamente 60% da demanda mundial de termoplásticos, onde os polietilenos se encaixam no patamar dos 40%. No Brasil, as poliolefinas representam cerca de 65%, dos quais 43% correspondem aos polietilenos (Reto, 2000).

O mercado brasileiro de polietileno cresce em um ritmo duas vezes superior ao do Produto Interno Bruto (PIB). Entre 1999 e 2000, as vendas aumentaram em mais de 150 mil toneladas (cerca de 10% da produção nacional). O mercado de polietileno linear avança acentuadamente sobre a resina de baixa densidade convencional, cujas vendas estão estagnadas e a sua produção apresenta tendência de queda (Reto, 2000).

A Tabela 5 apresenta o consumo relativo à Europa, Estados Unidos e Brasil, assim como sua taxa de crescimento.

Tabela 5 - Consumo e crescimento de polietileno na Europa, Estados Unidos e Brasil no ano 2010.

	Consumo (mil tonelada/ano)	Crescimento (% ao ano)
Europa	500	10
Estados Unidos	300	10
Brasil	10	20 a 30

Fonte: Manual Técnico do Polietileno.

3.2.3 Propriedades

A participação do polietileno nas redes, ramais e adutoras de água, bem como em esgotos pressurizados cresce a razão de 10% ao ano, em especial na Europa, substituindo os tubos tradicionais. Em Ramais e nas Redes de água de diâmetro até 110 mm, na Europa, a participação dos tubos de PE é de quase 100% e vem aumentando paulatinamente nos diâmetros maiores. Nas adutoras e captação de água o polietileno vem firmando sua supremacia, em especial nas aplicações de baixas pressões (até 6 bar), onde o custo desse material, comparado aos dos materiais tradicionais, já representa vantagens imediatas.

Dentre as diversas propriedades de um material, visando aplicação do polietileno em redes coletoras, tratamento e distribuição de água, destacam-se as seguintes propriedades:

- Leveza
- Flexibilidade
- Elevada resistência ao impacto
- Elevada Resistente à compressão
- Elevada Resistente à abrasão
- Atóxico
- Inércia química
- Resistência à maioria dos agentes químicos
- Impermeável
- Imunidade total a corrosões eletrolíticas e galvânicas
- Rugosidade baixíssima (coeficiente C = 150) Hazen-Williams
- Baixo coeficiente de atrito na parede interna do tubo (Manning de 0,010)
- Baixíssimo efeito de incrustação
- Elevada vida útil (mais de 50 anos)
- Facilidade de Manuseio e Instalação
- Menor Risco de Contaminação do Meio Ambiente (fissuras e vazamentos)

3.3 *Poço De Visita (PV)*

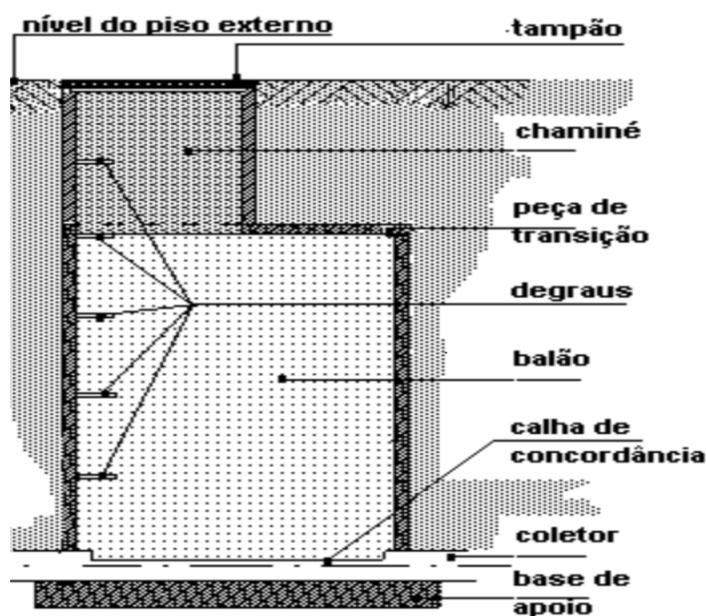
3.3.1 *Conceito*

Poço de Visita (PV) é uma estrutura integrante das redes coletoras de esgotos de grande importância, pois nele é onde há o encontro do fluxo de esgotos provenientes de diversas instalações que então são orientados e seguem para o posterior tratamento.

Um PV convencional (Figura 12) possui dois compartimentos distintos que são a chaminé e o balão, construídos de tal forma a permitir fácil entrada e saída do operador e espaço suficiente para este operador executar as manobras necessárias ao desempenho das funções para as quais a câmara foi projetada.

O balão ou câmara de trabalho é o compartimento principal da estrutura, de seção circular, quadrada ou retangular, onde se realizam todas as manobras internas, manuais ou mecânicas, por ocasião dos serviços de manutenção nos trechos conectados. Em seu piso encontram-se moldadas as calhas de concordância entre as seções de entrada dos trechos a montante e da saída para jusante. Estas calhas são dispostas de modo a guiar as correntes líquidas, desde as entradas no poço, até o início do trecho de jusante do coletor principal que atravessa o poço. Desta maneira, assegura-se um mínimo de turbilhonamento e retenção do material em suspensão, devendo suas arestas superiores ser niveladas, no mínimo, com a geratriz superior do trecho de saída.

Figura 12 - Poço de visita.



Fonte: http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/ES08_01.html

A chaminé, pescoço ou tubo de descida, consiste em um conduto de ligação entre o balão e a superfície, ou seja, o exterior. Convencionalmente é iniciada num furo excêntrico feito na laje de cobertura do balão e indo até a superfície do terreno, onde é fechada por um tampão de ferro fundido. A partir da chaminé, o movimento de entrada e saída dos operadores é possibilitado através de uma escada de ligas metálicas inoxidáveis, tipo marinheiro, afixada de degrau em degrau na parede do poço ou, opcionalmente, através de escadas móveis para poços de pequenas profundidades.

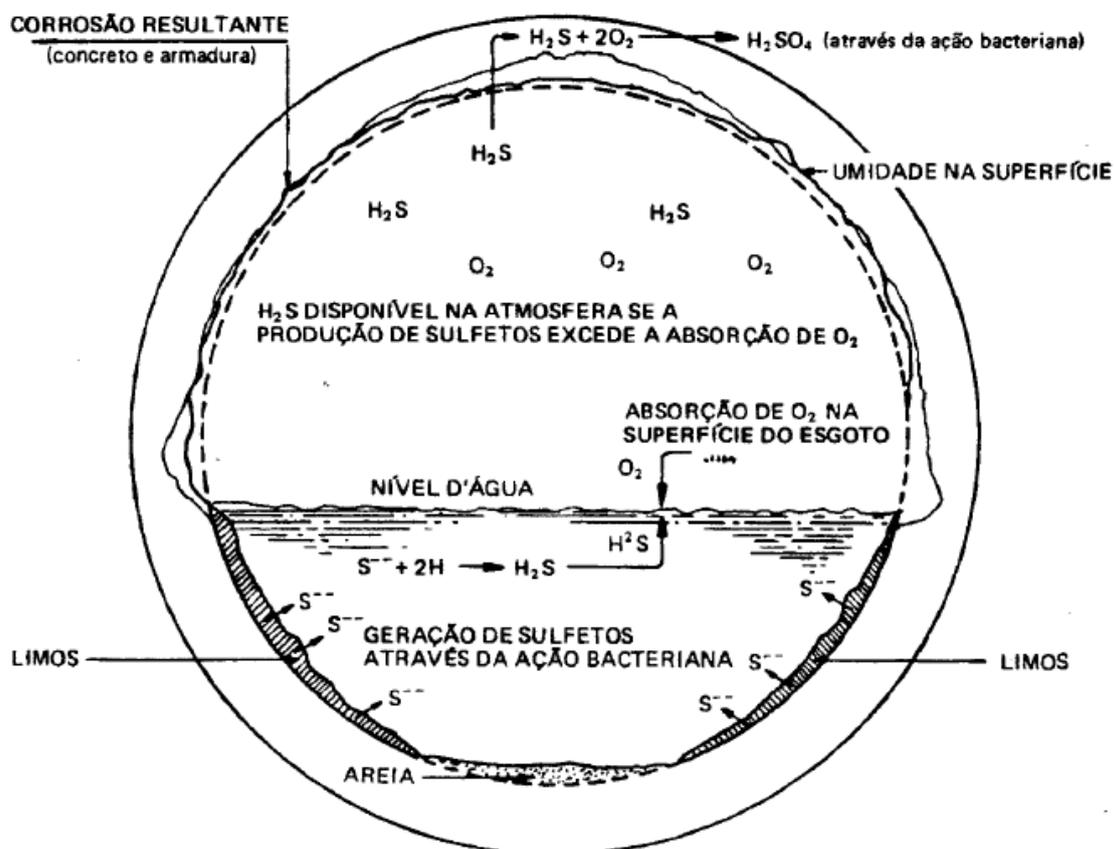
Atualmente a maioria dos PVs em utilização é feito de anéis pré-moldados de concreto; concreto armado; e alvenaria (com blocos de concreto ou tijolos cerâmicos) (Figura 13). Devido ao material de sua composição é facilmente sujeito a degradação erosiva e corrosão. Ao sofrer desgaste acabam liberando areia, acarretando vários problemas no equipamento de tratamento e no próprio tratamento do esgoto além dos transtornos causados à sociedade e ao ambiente ocasionado pela sua falha. O principal agente corrosivo e de degradação do material em redes coletoras de esgoto é o ácido sulfídrico (Figura 14).

Figura 13 - Poço de visita em concreto, alvenaria e tijolos cerâmicos



Fonte: <http://agele.com.br/category/desentupidora-de-pv-pocos-de-visita/>

Figura 14 - Processo de formação de ácidos em redes coletoras de esgoto.



Fonte: www.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/fissuracao/exemplo126.pdf

As bactérias redutoras de sulfatos necessitam de oxigênio para consumir a matéria orgânica existente na água do esgoto. Quando o oxigênio não está disponível, estes microrganismos o retiram dos íons sulfato (SO_4^{2-}) disponíveis no meio aquoso deixando livres os íons sulfeto (S_2^-);

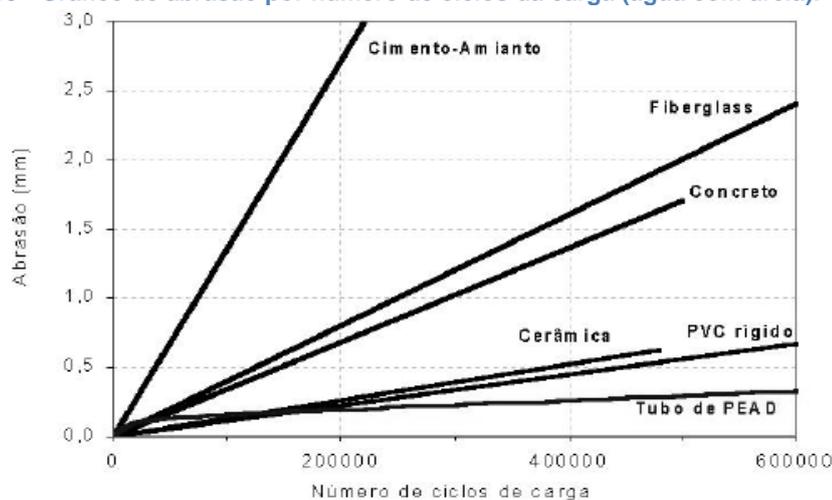
- A reação do sulfeto, com a água, resulta no gás sulfídrico H_2S , conhecido pelo seu cheiro característico de ovo podre;

- O gás liberado é absorvido pelas partes superiores do coletor de concreto, sendo novamente oxidado e transformado em ácido sulfúrico (H_2SO_4);
- O H_2SO_4 ataca o concreto nas partes superiores do coletor, transformando o hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$ do concreto em gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$).

Os ácidos citados se formam e atacam quimicamente as paredes dos tubos de concreto, danificando-os por processos corrosivos. Assim, existe a necessidade de utilizar-se materiais mais resistentes às reações específicas que ocorrem em efluentes sanitários. Nesse contexto, os materiais poliméricos despontaram e tornaram-se foco de estudo para esta área de aplicação.

O consumo mundial de materiais poliméricos vem em uma crescente exponencial de acordo com as descobertas e inovações tecnológicas na área ocasionando diversas aplicações específicas e na substituição de outros materiais, obtendo resultado satisfatório e às vezes com melhor desempenho, como em nosso caso, quando comparamos, por exemplo, a resistência à abrasão do polietileno com concreto, (Figura 15) tendo em vista que o polietileno apresenta características apreciáveis para o desempenho de tal função citadas anteriormente, como por exemplo, seu caráter inerte quimicamente, baixo peso, boa resistência mecânica e vida útil, tornando assim o polietileno o material mais indicado para construção de poços de visita.

Figura 15 - Gráfico de abrasão por número de ciclos da carga (água com areia).



Fonte: Universidade de Darmstad Alemanha - (South German Plastics Centre in Würzburg).

3.3.2 Rotomoldagem

Os PVs de polietileno (Figura 16) são produzidos através do processo de rotomoldagem, também chamado de moldagem rotacional ou fundição rotacional, que é um processo de transformação de plásticos adequado à manufatura de uma gama de artigos ocios, vazados ou abertos, desde bolas para tênis-de-mesa até grandes tanques para armazenamento de líquidos. Do ponto de vista do processo, não há limites quanto as dimensões dos produtos. As características do processo conferem às peças propriedades que lhes permitem competir com artigos moldados por sopro, injeção ou termoformagem (Rubin, 1993) (Rahner, 1999).

Figura 16 - Poço de visita em polietileno.

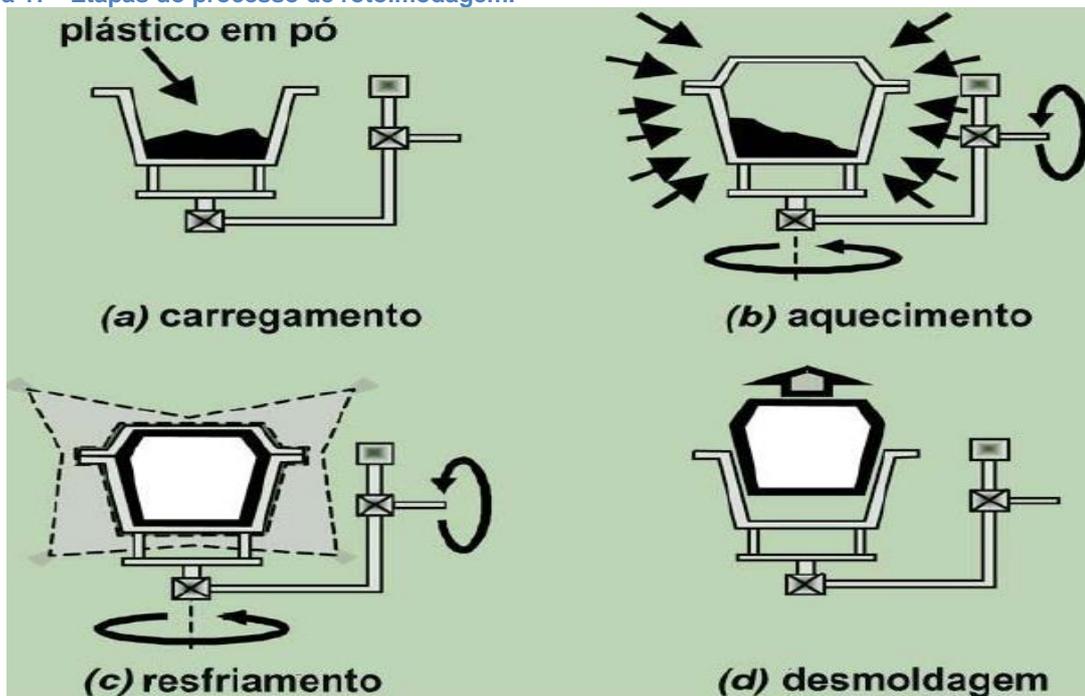


Fonte: Autor.

Moldagem rotacional ou rotomoldagem é um processo desenvolvido para produção de peças ocas, sem costura de todos os tamanhos e formas. Tradicionalmente tem maior aplicação na transformação de materiais termoplásticos. Mais de 80% dos materiais utilizados atualmente em rotomoldagem ainda são os polietilenos. Outros materiais rotomoldáveis são os plastisóis, nylons, polipropilenos, poliacetais, policarbonatos, ABS entre outros (TRM Ltda, 2007).

O processo de rotomoldagem é composto por quatro fases (Figura 17). A primeira consiste no carregamento do polímero em forma de pó ou líquido dentro do molde. A segunda no aquecimento do molde dentro de um forno, enquanto o mesmo sofre rotação biaxial, girando em torno do seu próprio eixo e em torno de um eixo central. A terceira fase é o resfriamento do molde, mantendo todo o movimento de rotação. A quarta fase é a retirada da peça rotomoldada do molde. A Figura 18 traz uma ilustração real do molde para produção do PV em polietileno.

Figura 17 - Etapas do processo de rotomoldagem.



Fonte: Rotational moulding, the basics for designers.

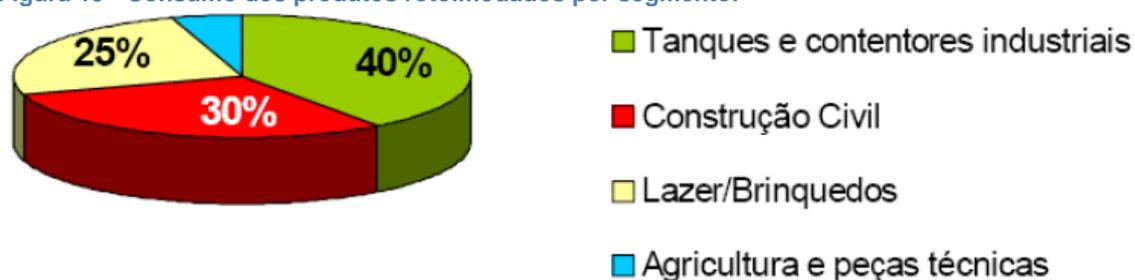
Figura 18 - Molde para produção do PV em polietileno.



Fonte: Autor.

Atualmente a maior parte da produção de produtos rotomoldados se destina a tanques e contentores industriais, como podemos ver na Figura 19, seguida da construção civil.

Figura 19 - Consumo dos produtos rotomoldados por segmento.



Fonte: Processo reconquista os transformadores.

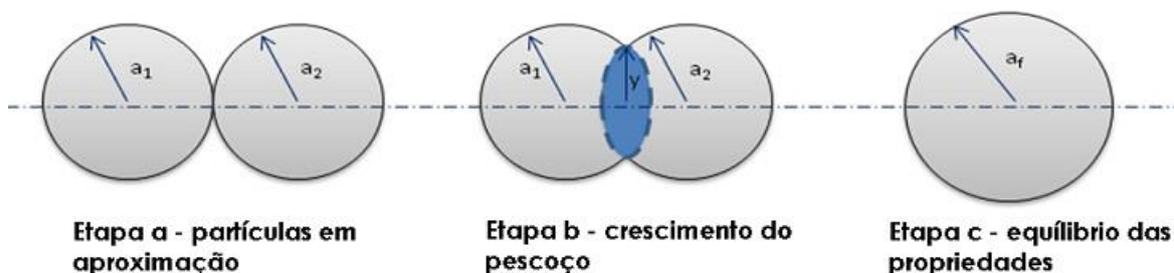
Na rotomoldagem, o molde em movimento de rotação biaxial é colocado em um forno e aquecido. Como resultado, o material no interior do molde é tombado e aumenta em temperatura. Quando a temperatura do material alcança a temperatura de amolecimento do polímero, o mesmo começa a aderir à superfície do molde, iniciando o processo de coalescência. A coalescência descreve a formação de um

corpo homogêneo através da fusão de pequenas partículas de um mesmo material. (M. Narkis, 1995) O processo de coalescência é composto por duas etapas:

- crescimento do pescoço: formação de uma junção na interface de contato molecular entre as partículas.
- equilíbrio das propriedades na região do pescoço: difusão das moléculas na região de formação do pescoço.

A Figura 20 mostra a representação esquemática do processo de coalescência entre duas partículas, em que “ a_0 ” é o raio inicial das partículas, “ y ” é o raio do pescoço e “ a_f ” o raio final do agregado.

Figura 20 - Processo de coalescência.



Fonte: NARKIS e Rosenzweig, 1995.

Com a continuidade do aquecimento as partículas coalescidas fundem, e o ar entre as mesmas é retido, formando-se poros ou bolhas. A presença de bolhas em peças rotomoldadas diminui resistência ao impacto. Para que estas bolhas sejam eliminadas, é necessária a continuidade do aquecimento, de forma que as bolhas possam difundir-se e solubilizar-se pela matriz polimérica. Esse processo de eliminação de bolhas é denominado densificação. Os processos de coalescência e densificação são influenciados pelas propriedades viscoelásticas do material e temperatura. Quanto maior o caráter elástico e viscoso do polímero, menor será a taxa de coalescência e eliminação de bolhas. No entanto, o aumento da temperatura aumenta a capacidade de fluência do material, aumentando a taxa de deformação (coalescência) e a difusão e solubilização do ar no polímero (densificação). Portanto, alterações nas propriedades reológicas do polímero resultam em alterações nas taxas de coalescência e densificação do material.

3.4 *Emissão Acústica.*

3.4.1 *Conceito*

As técnicas de Emissão acústica já evoluíram bastante se tornando um dos ensaios não destrutivos mais eficientes e confiáveis, indicando desde descontinuidades do material até início e propagação de trincas, deslocamento de contornos de grão, movimentos de discordância, deformações plásticas, entre outras.

Emissão acústica é definida como um fenômeno no qual ondas elásticas transientes, de frente de onda de forma esférica, são produzidas através de liberação de energia mecânica a partir de uma determinada fonte (ABNT, 2004).

Fontes de emissão acústica incluem os mecanismos de deformação e fratura, tais como: crescimento de trincas, movimento de discordâncias, maclação, deslocamento de contornos de grão, fratura e decoesão de inclusões (Miller, 1987). Vazamentos oriundos de recipientes pressurizados tais como vasos de pressão e tanques de armazenamento também geram sinais detectados e classificados como emissão acústica.

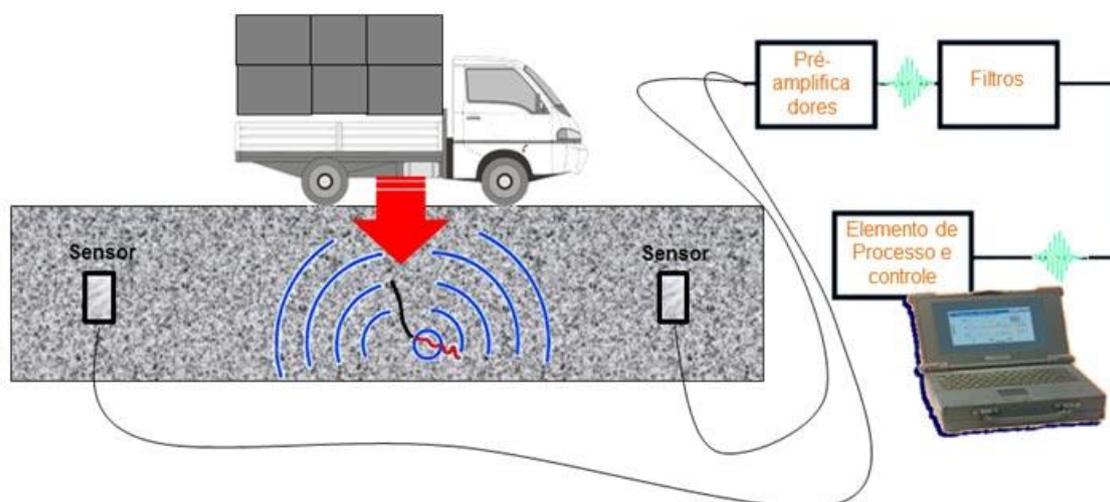
Segundo Allevato e Ramos, 1980, emissão acústica são ondas elásticas transientes geradas pela emissão rápida de energia por fontes localizadas no interior do material. Essas fontes podem ser de diversas origens como: reações químicas, fundição, aquecimento, resfriamento, corrosão, cavitação, descarga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

O teste de emissão acústica é um método passivo que monitora a redistribuição de tensões dentro de um material ou componente, o fenômeno que ocorre quando uma descontinuidade é submetida a uma solicitação térmica ou

mecânica. Uma área portadora de defeitos é uma área de concentração de tensões, que uma vez estimulada, origina a liberação de ondas de tensão, na forma de energia, propagando-se pelo material em forma de ondas mecânicas transientes. A técnica consiste em captar esta perturbação no meio, através de transdutores piezoelétricos instalados de forma estacionária nas regiões de interesse. Estes receptores passivos transformam a energia mecânica em energia elétrica, sendo os sinais arquivados para análise (Estênio, 2002). Eventuais áreas portadoras de defeitos são localizadas através do estudo de cada forma de onda particular

Em contraste com a maioria dos métodos complementares de ensaios não destrutivos os sinais detectados de emissão acústica são gerados pelo objeto em teste, mediante a aplicação de um estímulo, conforme a Figura 21, detectando-se as descontinuidades durante o processo de degradação da integridade da estrutura (Miller, 1987).

Figura 21 - Ilustração de uma fonte de emissão acústica.

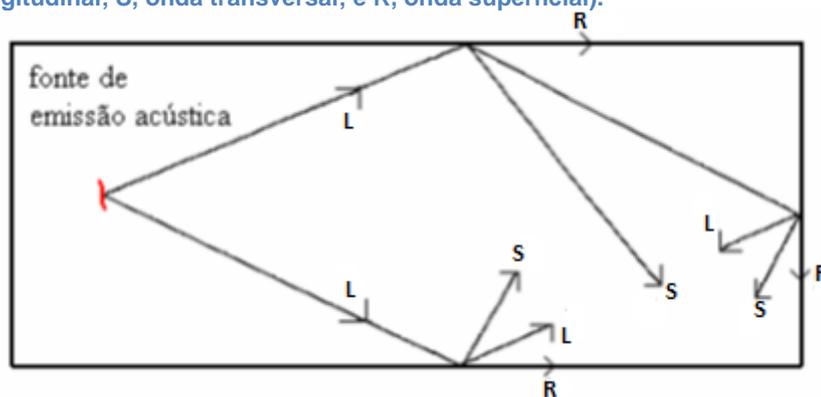


Fonte: Autor.

Instabilidades locais são desenvolvidas nas estruturas antes do colapso. Estas instabilidades podem se manifestar na forma de deformação plástica, iniciação e/ou propagação de trincas, bandas de deslizamento, etc (Miller, 1987). As tensões desenvolvidas nas regiões que contém descontinuidades podem assumir valores superiores às tensões limites de escoamento em função dos concentradores de tensão. Nesta situação, a propagação das descontinuidades atua como uma fonte de sinais de emissão acústica. Conforme apresentado no desenho esquemático da

Figura 21 a fonte de emissão acústica emite a onda mecânica em todas as direções, caracterizando o sinal de emissão acústica como uma frente de onda de forma esférica. A propagação da onda de emissão acústica pode ser explicada utilizando uma analogia com a propagação das ondas ultrassônicas (Krautkrämer, 1977). Utilizando a regra que estabelece que “o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão” e a Lei de *Snell* para cálculo dos ângulos das ondas geradas a partir da reflexão (conversão de modo), pode-se estimar os grupos de ondas sônicas que estarão presentes após a geração de um sinal de emissão acústica. Os fenômenos de reflexão e refração estão presentes e, devido as características não direcionais da onda de emissão acústica ocorrem nas duas fronteiras do material gerador do sinal, como apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Fenômenos de reflexão nas fronteiras do material que contém a fonte de emissão acústica (L, onda longitudinal; S, onda transversal; e R, onda superficial).



Fonte: Soares, 2001.

A forma esférica das ondas de emissão acústica permite que sensores sejam posicionados em arranjos regulares na estrutura para a detecção dos sinais oriundos das fontes de emissão acústica. Esta característica é o maior contraste exibido quando se compara o método de ensaio por emissão acústica com os demais métodos de ensaios não destrutivos (S. Soares, 2008).

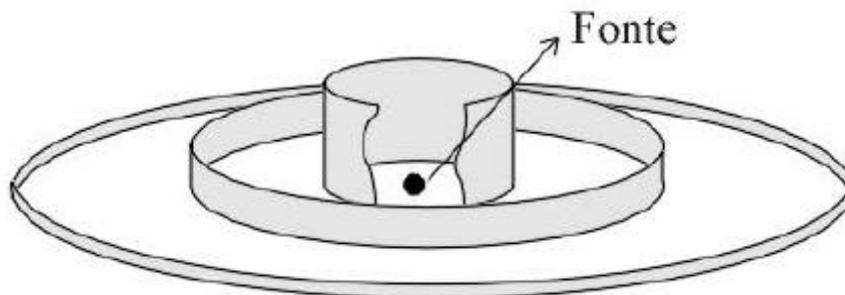
3.4.2 Atenuação De Sinais De Emissão Acústica

Atenuação é a perda da energia do sinal e conseqüente diminuição da amplitude da onda, com o aumento da distância de propagação, ou seja, a distância da fonte. A atenuação é importante porque controla a detecção de fontes distantes,

pela determinação da correta distância entre sensores que permite de forma segura a detecção de um sinal de uma fonte de emissão acústica.

A atenuação geométrica pode ser entendida por meio da propagação de uma onda de emissão acústica em um material que propaga a onda sem induzir perdas devido a fenômenos como absorção, espalhamento e etc. Como explicado anteriormente, a onda de emissão acústica tem formato esférico. Considerando um meio, que hipoteticamente não admite e não induz perdas, durante a propagação a área da frente de onda aumenta com o aumento da distância, assim, a amplitude do sinal diminui para manter a energia constante (S. Soares, 2008)(Figura 23).

Figura 23 - Analogia à atenuação geométrica.



Fonte: Jacques, 2009.

A atenuação por dispersão é percebida em materiais sólidos onde o comprimento de onda é próximo de alguma descontinuidade do material, por exemplo, tamanho de grão, inclusões, segundas fases e etc.

A propagação do sinal de emissão acústica em estruturas reais não permite a conservação de energia, em função do consumo de energia para o movimento e para deformação. Mecanismos de perda de energia podem ser associados à geração de calor.

3.4.3 Propagação Das Ondas

Emissões acústicas são ondas acústicas geradas por um material, normalmente em resposta a uma alteração na tensão. Uma vez gerada, essas ondas se propagam sob as mesmas regras que qualquer outra onda acústica. Elas

são um movimento coletivo em uma coleção de átomos. O movimento da onda acústica é um movimento cooperativo dos átomos em um material que se estende ao longo de um grande número de átomos. Este movimento coletivo implica que o comprimento de onda é longo quando comparado com a distância entre os átomos.

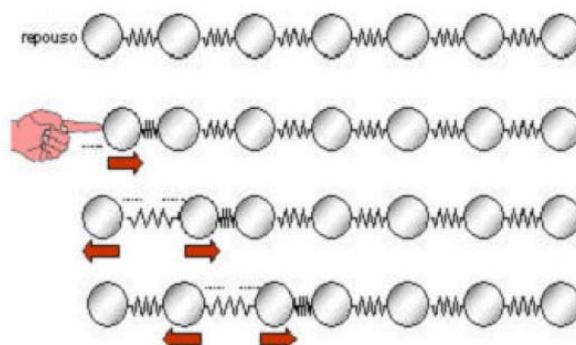
Quando um átomo ou molécula é deslocado de sua posição de equilíbrio por uma força, tensões internas agem de modo a restaurar as partículas às suas posições originais. Devido às forças interatômicas entre partículas adjacentes de material, o deslocamento de um ponto induz o deslocamento nos pontos vizinhos, propagando assim uma onda elástica. A amplitude, modo de vibração e velocidade das ondas diferem em sólidos, líquidos e gases justamente devido às diferenças na distância média entre as partículas em cada um desses casos. Assim, ondas terão maiores velocidades em sólidos e menores em gases (Jacques, 2009).

A velocidade de propagação da onda acústica é um parâmetro importante no ensaio de emissão acústica, pois a utilização de seu valor correto permitirá a determinação precisa da localização da fonte do sinal de emissão acústica. Os valores de velocidade de propagação são característicos de cada material (S. Soares, 2008).

O movimento da onda resulta da ação de forças elásticas internas ao meio para posicionar as partículas na posição inicial e na condição de repouso. Em função disto pode-se afirmar que no movimento da partícula teremos diferentes forças atuando que gerarão diferentes velocidades de propagação. Com isso, é será descrito os principais tipos de ondas e seus respectivos movimentos:

- Ondas Longitudinais: também conhecidas como ondas de compressão, as ondas longitudinais se deslocam no material como uma série de compressões e rarefações nas quais as partículas que transmitem a onda vibram na mesma direção de deslocamento da onda. São as mais velozes e tem capacidade de se propagar em sólidos, líquidos e, em alguns casos (baixa frequência), em gases (Figura 24).

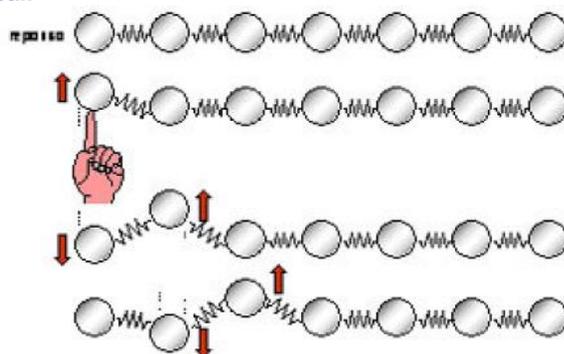
Figura 24 - Onda Longitudinal.



Fonte: Jacques, 2009.

Ondas Transversais: Podem ser imaginadas como se fossem vibrações em uma corda que é movida ritmicamente, sendo que cada partícula vibra numa direção perpendicular à direção de propagação da onda. Possuem em média 60% da velocidade das ondas longitudinais e só são capazes de propagar em meio sólido (Figura 25).

Figura 25 - Onda Transversal.



Fonte: Jacques, 2009.

- Ondas Superficiais (Rayleigh): São ondas que viajam em interfaces ligadas, de um lado por forças elásticas fortes de um sólido e de outro por forças elásticas negligenciáveis entre moléculas de gás, como ocorre na maioria dos casos em superfícies de sólidos maciços. A velocidade desse tipo de onda é de 90% da velocidade de uma onda transversal.
- Ondas de Lamb: São ondas que percorrem chapas finas de material. Consistem de uma vibração complexa que ocorre na espessura do material e suas características de propagação dependem de fatores como densidade, propriedades elásticas, estrutura e espessura do material e frequência.

3.4.4 Características Da Onda De Emissão Acústica

A amplitude de uma onda acústica senoidal ou vibração pode ser especificada em termos de deslocamento. As ondas senoidais são descritas pela equação 1.

$$y = A \operatorname{sen}\left(\frac{x}{\lambda} - f \cdot t\right)$$

Equação 1

onde:

y , deslocamento (amplitude);

x , posição;

t , tempo;

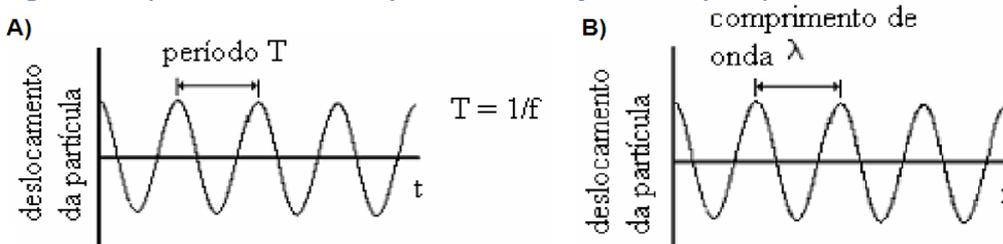
λ , comprimento de onda; e,

f , frequência.

Ondas senoidais são importantes por serem a base de várias teorias matemáticas e em função de muitos sistemas físicos (pêndulos, corpos vibrando, sistemas rotativos) comportarem-se desta forma.

Por uma senóide pode-se estimar o movimento de uma partícula no material em função do tempo, ou pode-se obter a informação instantânea do meio onde a onda acústica está propagando. Teríamos um quadro congelado do material e veríamos qual é o movimento instantâneo (deslocamento) em diferentes posições. Na Figura 26 são apresentadas as características de uma onda senoidal.

Figura 26 - A) Movimento de uma partícula em função do tempo. B) Movimento instantâneo.



Fonte: S. Soares, 2008.

Nas Figuras 26-A e 26-B, ambos os gráficos são senoidais e estão relacionados entre si pela equação 2, onde g representa uma função, e pela equação 3.

$$y = g(x - c \cdot t)$$

Equação 2

$$c = f \cdot \lambda$$

Equação 3

onde:

y , deslocamento (amplitude);

f , frequência;

x , posição;

c , velocidade de propagação da onda;

t , tempo; e,

λ , comprimento de onda.

Nesse contexto, apresentamos a seguir a velocidade de propagação para diversos materiais, Tabela 6.

Tabela 6 - Velocidades de onda (c) e impedâncias acústicas (Z) de materiais para ondas longitudinais (l), transversais (s) e Rayleigh (r).

Material	Densidade	c_l	Z_l	c_s	Z_s	c_r	Z_r
Metais							
Alumínio	2,7	6300	17,3	3100	8,5	2850	7,85
Ferro fundido	7,7	4500	34,6	2500	19,2		
Aço Fundido	7,8	5900	46,0	3230	25,3	2790	21,8
Aço 302	8,03	5660	45,5	3120	25,0		
Aço 410	7,67	7390	56,7	2990	22,9		
Chumbo	11,4	2160	24,6	700	7,98	630	7,17
Titânio	4,54	6100	27,7	3120	14,2	2790	12,7
Tungstênio	19,25	5180	99,8	2870	55,2	2650	51,0
Neoprene	1,3	1600	2,1				
Acrílico	1,18	2670	3,2	1120	1,32		
Polietileno	0,9	1900	1,7	500	0,45		
Teflon	2,1	1400	3,0				
Quartzo	2,20	5930	13,0	3750	8,24	3390	7,45
Ar	0,0013	330	0,00043	n/a	n/a	n/a	n/a
Óleo (SAE 30)	0,88	1700	1,5	n/a	n/a	n/a	n/a
Água	1,00	1480	1,48	n/a	n/a	n/a	n/a

Fonte: Miller, 1987.

Finalmente, um sinal ideal de emissão acústica pode ser descrito conforme a equação 4. Um sinal gerado segundo a equação 4 é apresentado na Figura 27.

$$V = V_0 \cdot \exp(-B \cdot t) \text{sen}(\omega \cdot t)$$

Equação 4

O sinal é inicialmente captado em forma pulso elétrico, ou seja, em volts. Mas para descrever a extensa faixa de amplitudes dos sinais de emissão acústica, medida primariamente em volts, uniformemente, utiliza-se a escala especial de decibéis para emissão acústica descrita pela equação 5 e ilustrado na tabela 7.

$$dB_v = 20 \log\left(\frac{V}{V_{ref}}\right)$$

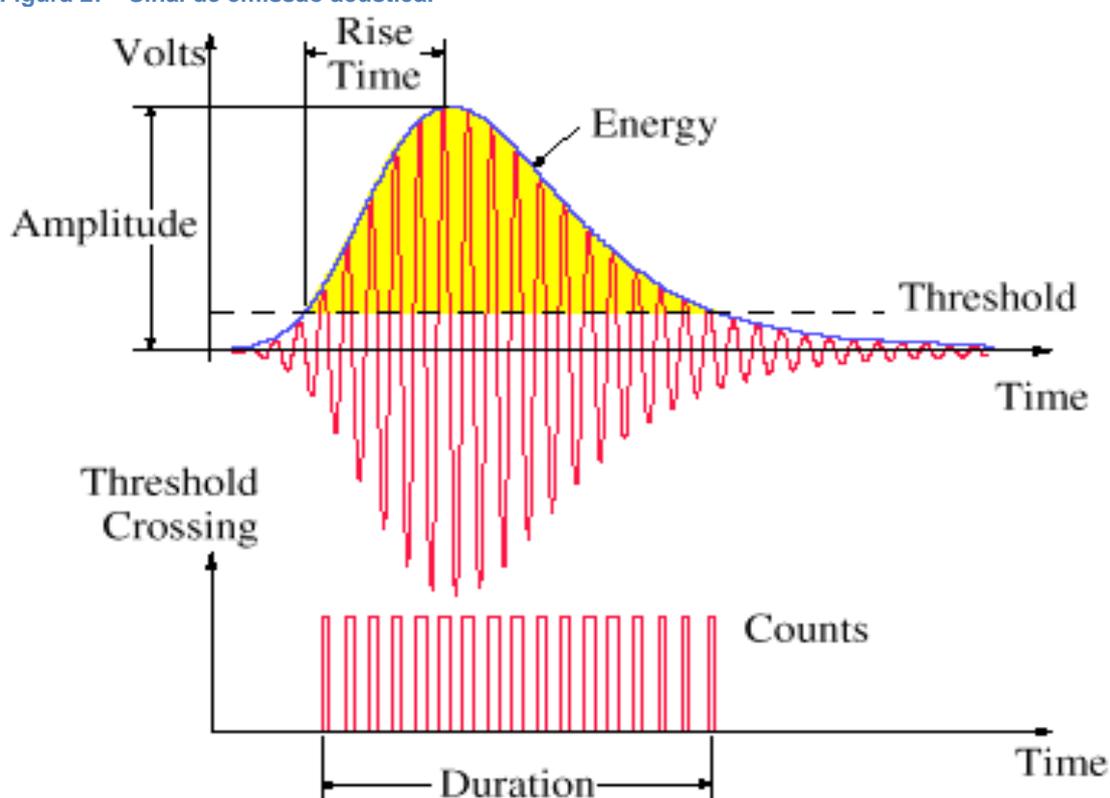
Equação 5

Tabela 7 - Escala de dB_{EA}.

Amplitude (dB _{AE})	Microvolts na entrada do pré-amplificador
0	1
20	10
40	100
60	1000 (1 milivolt)
80	10000 (10 milivolts)
100	100000 (100 milivolts)

Fonte: S. Soares, 2008.

Figura 27 - Sinal de emissão acústica.



Fonte: JOM, vol. 50 nº11, 998.

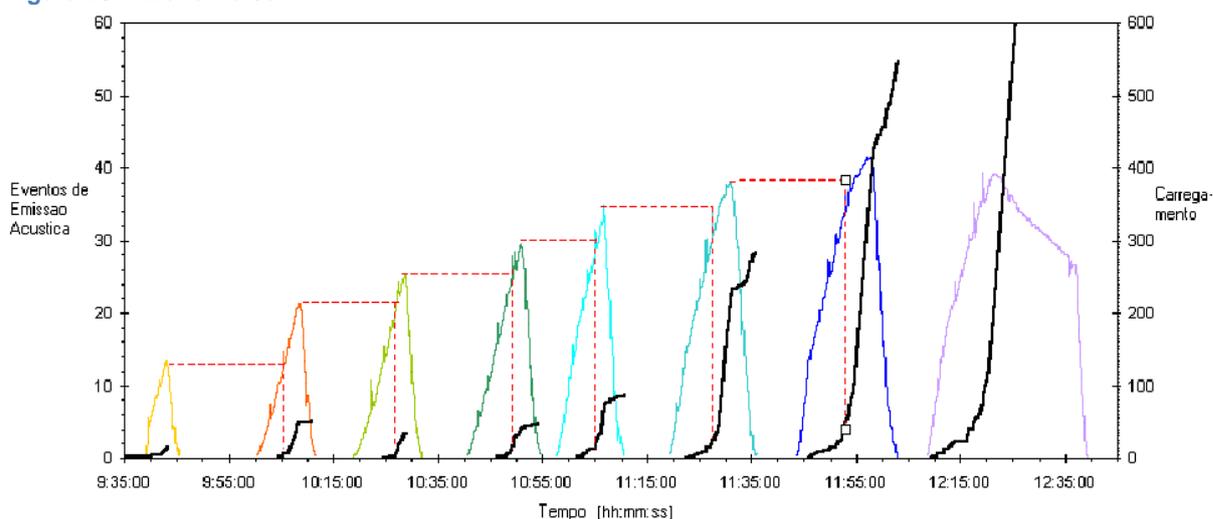
Para a análise dos sinais/ondas/hits de emissão acústica os principais parâmetros considerados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2004, são:

- Amplitude: é o maior pico de tensão atingido pelo sinal de emissão acústica e está relacionado à magnitude da fonte do evento. Expresso em decibéis (dB).
- Contagem (*counts*): é o número de vezes que o sinal cruzou o limiar de referência.
- Contagem até o pico (*counts to peak*): é o número de vezes que o sinal cruzou o limiar de referência até atingir o pico de amplitude.
- Duração (*duration*): é o intervalo de tempo entre a primeira e última vez que o sinal ultrapassa o limiar. Expresso em microsegundos (μ s).
- Tempo de subida (*rise time*): é o intervalo de tempo entre a primeira vez que o sinal cruza o limiar de referência e o momento que o pico de amplitude é atingido. Expresso em microsegundos (μ s).
- RMS (*root mean square*): é a raiz média quadrática dos picos de tensão do sinal dentro de determinado intervalo de tempo, independente do hit de emissão acústica. Parâmetro muito sensível para detectar pequenas variações em um sinal. É expresso em milivolts (mV).
- Frequência média dos picos (*average frequency*): é o parâmetro calculado a partir da razão entre a contagem e a duração do sinal. Expresso em quilohertz (kHz).
- Frequência inicial picos (*initiation frequency*): é o parâmetro calculado a partir da razão entre a contagem até o pico e tempo de subida do sinal. Expresso em quilohertz (kHz).
- Frequência de reverberação (*average frequency*): é o parâmetro calculado a partir da razão entre a contagem após o pico (diferença entre contagem e contagem até o pico) e tempo de decaimento (diferença entre duração e tempo de subida) do sinal. Expresso em quilohertz (kHz).
- Força do sinal (*signal strength*): chamada também de MARSE (*Measured Area of the Rectified Signal Envelope*) é a área medida abaixo da envoltória do sinal retificado, representada pela área abaixo da linha azul e acima do eixo do tempo na Figura 27. Este parâmetro é sensível a amplitude e a duração do sinal.
- Energia (*energy*): integral do sinal retificado de tensão ao longo da duração do sinal de EA (ou forma de onda), representado pela área amarela na Figura 27. Embora energia tenha a mesma definição de força de sinal acima, a única diferença é na sensibilidade, tamanho e alcance dinâmico deste parâmetro.

3.4.5 Efeito Kaiser

Uma característica importante que influi na aplicação da emissão acústica é a resposta irreversível da maioria dos metais. Na prática, quando algum tipo de carregamento é aplicado em um material, a emissão acústica detecta algum tipo de atividade de tensão aplicada. Caso reinicie um segundo carregamento no mesmo material, uma vez atingido um determinado patamar de carga e tendo sido acomodadas as fontes de emissão acústica, só será detectado algum tipo de atividade acústica se o nível de tensão for igual ou exceda o do primeiro carregamento. A Figura 28 mostra a representação do efeito Kaiser, no qual os sinais ou eventos de emissão acústica são iniciados somente superação do patamar da carga aplicada anteriormente.

Figura 28 – Efeito Kaiser.



Fonte: Autor.

O grau para o qual o Efeito Kaiser está presente varia entre metais e pode desaparecer completamente depois de várias horas (ou dias) para ligas que exibem características apreciáveis de recozimento (recuperação) em temperatura ambiente. Algumas ligas e materiais podem não exibir qualquer efeito Kaiser mensurável de nenhuma maneira (Miller, 1987).

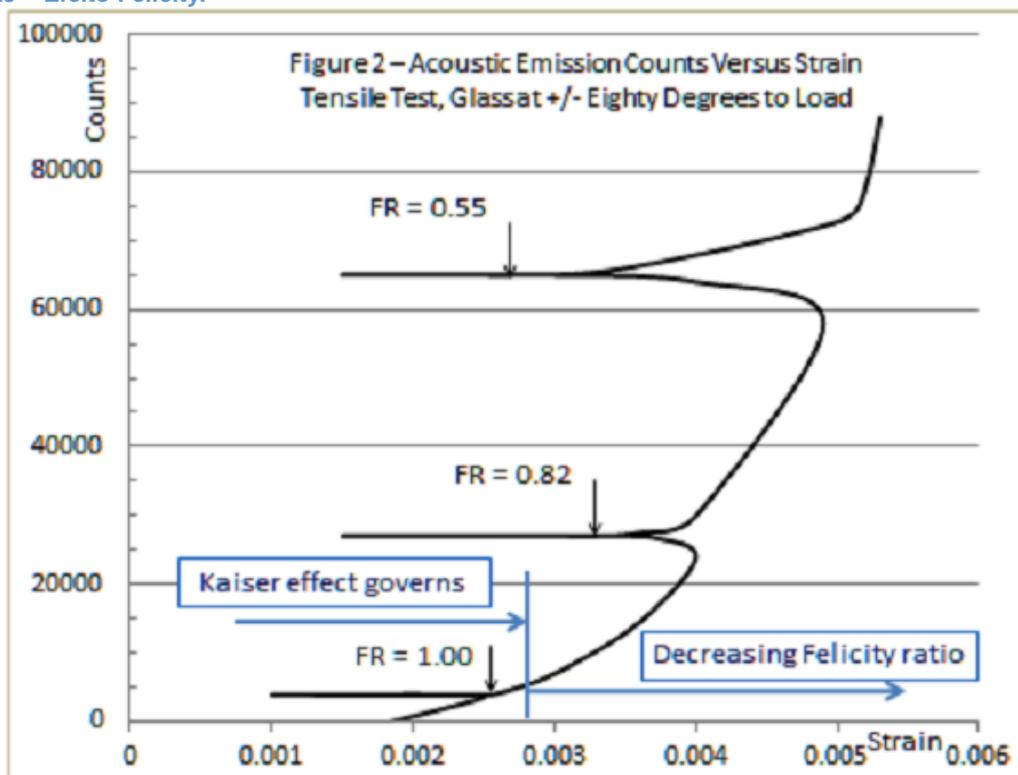
Pelo fato da emissão acústica ser produzida por deformação do material induzida por tensão, é altamente dependente do histórico de carregamento da estrutura. Alguns materiais respondem quase instantaneamente à tensão aplicada, emitindo e rapidamente se estabilizando. Outros materiais levam algum tempo para

acomodar uma carga aplicada. Em outros casos, uma carga constante pode produzir dano progressivo, e a estrutura nunca se estabilizará.

3.4.6 Efeito Felicity

Para materiais, alguns metais e polímeros, a definição do efeito Kaiser não se aplica. Isso se explica pelo fato de que atividades acústicas significativas nesses materiais poderem ser detectadas em níveis inferiores aos anteriormente aplicados. Para isso deu-se o nome de efeito Felicity, quando a emissão acústica se reinicia a uma fração específica da tensão máxima previamente aplicada. Esta fração é denominada razão Felicity, que representa o quociente da menor tensão de aparecimento do sinal e a tensão máxima previamente aplicada. O efeito de Kaiser tem sido referido como um caso especial de o efeito Felicity quando a relação é de 1,0 Felicity. Os autores acreditam que os efeitos Kaiser e Felicity são complementares um ao outro, e que cada um deles é importante (Fowler, 2014). A Figura 29 apresenta o efeito e a razão Felicity.

Figura 29 – Efeito Felicity.



Fonte: Fowler, 2014.

3.5 *Análise de Séries Temporais*

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

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

Os métodos usados em séries temporais baseiam-se fortemente nos conceitos de estacionaridade e linearidade. Todavia, há áreas nas quais modelos não estacionários e não lineares são necessários, como em economia, oceanografia, engenharia, medicina e etc (Morettin, 2014).

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

Métodos estatísticos tradicionais, como a análise espectral, são inadequados a sinais não-estacionários e esse fato sugere que novas técnicas sejam utilizadas nos estudos desses sinais, como por exemplo, as análises fractais (Morettin, 1999).

Neste estudo será realizado dois tipos de análise, uma no domínio do tempo-frequência, outra no domínio do tempo-escala: Análise de Fourier e Análise de

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

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

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

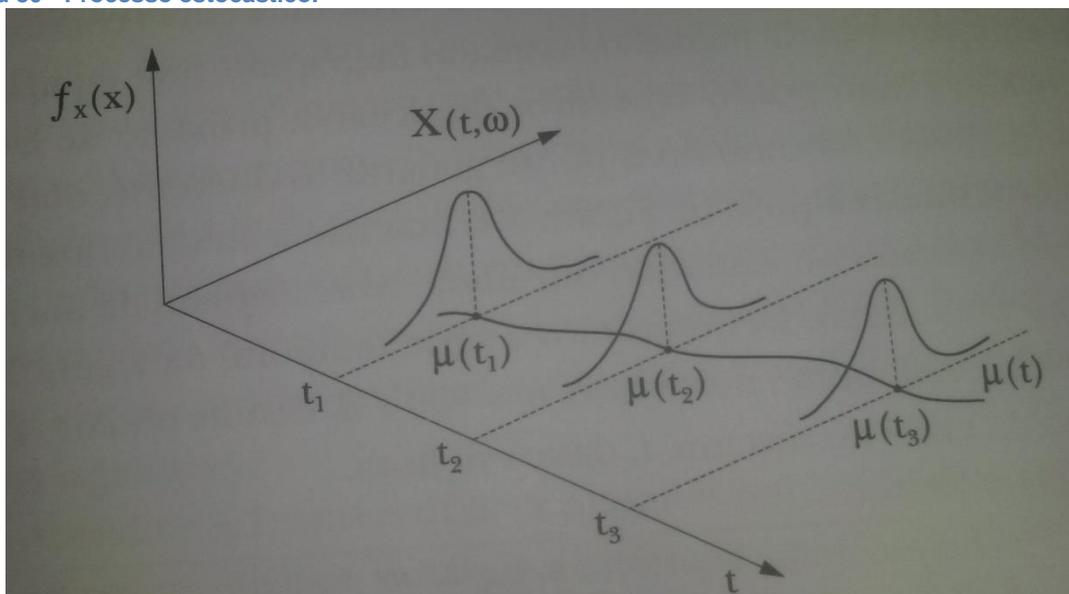
3.5.1 Processos estocásticos

Definição: Seja τ um conjunto arbitrário. Um processo estocástico é uma família $\{X(t), t \in \tau\}$, tal que, para cada $t \in \tau$, $X(t)$ é uma variável aleatória.

Nessas condições, um processo estocástico é uma família de variáveis aleatórias (v.a.), que se supõem definidas num mesmo espaço de probabilidades (Ω, A, P) . Vamos supor, também, que as v.a. envolvidas sejam reais.

Como para cada $t \in \tau, X(t)$ é uma v.a. definida sobre Ω ; na realidade $X(t)$ é uma função de dois argumentos, $X(t, \omega), t \in \tau, \omega \in \Omega$. A Figura 30 ilustra essa interpretação de um processo estocástico. Para cada $t \in \tau$ temos uma v.a. $X(t, \omega)$, com uma função densidade de probabilidades $f_x(x)$, que supomos que exista.

Figura 30 - Processo estocástico.



Fonte: Ondas e Ondaletas.

3.5.2 Análise de Fourier

Analistas de sinais atualmente possuem à sua disposição um arsenal impressionante de ferramentas. Talvez a mais bem conhecida destas seja a análise de Fourier.

A *análise de Fourier*, ou *análise harmônica*, tem sido usada tradicionalmente para resolver algumas equações diferenciais parciais que aparecem na física matemática, como a equação do calor e a equação de ondas, que divide um sinal em constituintes senoidais de diferentes frequências. Outra maneira de pensar na análise de Fourier é como uma técnica matemática para transformar a nossa visão do sinal baseado no tempo para domínio da frequência.

O objetivo básico é o de aproximar uma função $f(t)$ por uma combinação linear de componentes senoidais, cada uma com dada frequência. O conjunto $\{w_n(t) = e^{int}, n = 0, \pm 1, \dots\}$ de funções ortogonais, de período 2π , forma a base para análise de Fourier. Na realidade esse conjunto é gerado por dilatações de uma única função, $w(t) = e^{it}$, ou seja, $w_n(t) = w(nt)$ para qualquer n inteiro.

O fato básico é que de toda função periódica de período 2π , de quadrado integrável, é gerada por uma superposição das dilatações inteiras da função $w(t)$.

A formula de Euler

$$e^{int} = \cos(nt) + j \sin(nt)$$

Equação 5

relaciona o sistema das exponenciais complexas com o sistema de senos e cossenos.

$$\{\cos(nt), \sin(nt), n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$$

Equação 6

Diz-se que uma função $f(t)$, $t \in \mathbb{R}$, é *periódica*, de período p , se para todo $t \in \mathbb{R}$

$$f(t) = f(t + kp)$$

Equação 7

para $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. No que segue, vamos supor que $p \neq 0$. Dizemos que $f(t)$ é um *harmônico de frequência angular " λ " e amplitude A* , λ e A positivos, se

$$f(t) = A \cos(\lambda t) \quad \text{ou} \quad f(t) = A \sin(\lambda t)$$

Equação 8

Como, para todo inteiro k , $\cos[\lambda(t + 2\pi k/\lambda)] = \cos(\lambda t + 2\pi k) = \cos(\lambda t)$, o mesmo ocorrendo com o seno, vemos que um harmônico de frequência λ tem período $p = 2\pi/\lambda$. A frequência angular λ dá o número de ciclos completos em 2π unidades de tempo (radianos). Podemos considerar, também, a frequência em ciclos por unidade de tempo, v , que se relaciona com a frequência angular λ por meio de $\lambda = 2\pi v$. Segue que $p = 1/v$.

$$f(t) = A \cos(\lambda t + \phi), -\infty < t < \infty$$

Equação 9

no qual foi introduzido um parâmetro adicional ϕ , chamado de *fase*, que dá o deslocamento da onda relativamente à origem.

Chamando $a = A \cos \phi$ e $b = -A \sin \phi$ (4) pode ser escrita

$$f(t) = a \cos(\lambda t) + b \sin(\lambda t)$$

Equação 10

Sob suposições diversas sobre seu comportamento, uma função $f(t), t \in \mathbb{R}$, pode ser expressa na forma

$$f(t) = \sum_{\lambda} [a(\lambda) \cos(\lambda t) + b(\lambda) \sin(\lambda t)]$$

Equação 11

na qual o símbolo de somatória pode representar uma soma finita ou infinita, ou mesmo uma integral. Dizemos que a equação 11 é uma *representação espectral* de $f(t)$.

Assim, é observado, essencialmente, quatro situações, descritas a seguir.

I) Tempo Contínuo e Frequência Discreta

Aqui tem-se uma função periódica $f(t)$, de período T , e de quadrado integrável. Então,

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{i\lambda_n t}$$

Equação 12

em que a igualdade deve ser entendida com um limite em média quadrática, e os coeficientes c_n 's são dados por

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-i\lambda_n t} dt$$

As frequências $\lambda_n = 2\pi n/T$ são chamadas *frequências Fourier*, a equação 12 é a *representação em série de Fourier* de $f(t)$ e os c_n 's são os *coeficientes de Fourier* de $f(t)$.

O *teorema de Parseval* diz que

$$\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2$$

Equação 14

ou seja, a potência de $f(t)$ sobre $(-T/2, T/2)$, que é energia por unidade de tempo, é decomposta num número infinito de termos, sendo cada termo $|c_n|^2$ a contribuição à potência, do termo da série de Fourier de $f(\cdot)$ com frequência λ_n .

A equação 12 pode ser escrita na forma

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(\lambda_n t) + b_n \text{sen}(\lambda_n t)]$$

Equação 15

onde

$$c_n = \begin{cases} (a_n - ib_n)/2, & \text{se } n \geq 1 \\ a_0/2, & \text{se } n = 0 \\ (a_{|n|} + ib_{|n|})/2, & \text{se } n \leq -1 \end{cases}$$

Equação 16

e os coeficientes a_n, b_n , da equação 15, são dados por

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(\lambda_n t) dt, \quad n \geq 0$$

Equação 17

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \operatorname{sen}(\lambda_n t) dt, \quad n \geq 1$$

Equação 18

O harmônico para $n = 1$, na equação 15, é chamado *fundamental* e corresponde a uma onda cosseno (seno) de período igual ao de $f(t)$. Para $n = 2$, tem-se o *primeiro harmônico*, de período igual à metade do período de $f(t)$, e assim sucessivamente.

II) Tempo Contínuo e Frequência Contínua

Suponha agora que $f(t)$ não seja periódica; logo não se pode representá-la na forma da equação 12. A ideia é considerar a função

$$f_T(t) = f(t), \quad -T/2 \leq t \leq T/2$$

Equação 19

e então estender $f_T(\cdot)$ periodicamente a toda reta. Se esta for de quadrado integrável, é possível usar o que foi apresentado anteriormente para obter

$$f_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F_n e^{i\lambda_n t},$$

Equação 20

com

$$F_{n,T} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_T(t) e^{-i\lambda_n t} dt = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-i\lambda_n t} dt$$

Equação 21

Substituindo a equação 21 em 20, e colocando $\Delta\lambda = \lambda_n - \lambda_{n-1} = 2\pi/T$, obtêm-se

$$f(t) = f_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ \left[\int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-i\lambda_n t} dt \right] e^{i\lambda_n t} \right\} \frac{\Delta\lambda}{2\pi},$$

e para $T \rightarrow \infty$;, temos que $\Delta\lambda \rightarrow 0$ e portanto

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\lambda) e^{i\lambda t} d\lambda$$

Equação 22

com

$$F(\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\lambda t} dt$$

Equação 23

Supondo-se $f(t)$ de quadrado integrável, as equações 22 e 23 estarão bem definidas em $L_2(\mathbb{R})$. Dizemos que a equação 22 é a representação de $f(t)$ com uma integral de Fourier e que $F(\cdot)$, dada pela equação 23, é a transformada de Fourier de $f(t)$.

O teorema de Parseval, neste caso, fica

$$\int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\lambda)|^2$$

Equação 24

A quantidade $|F(\lambda)|^2$ é chamada *função de densidade espectral de energia de $f(t)$* , que pode ser comparada com a função densidade de probabilidade.

III) Tempo Discreto e Frequência Contínua

Suponha agora uma função $f(t)$ de quadrado integrável, definida para $-\infty < t < +\infty$, e que deseja-se observá-la em instantes de tempo equiespaçados, ou seja, amostrá-la em instantes $0, \pm\Delta t, \pm 2\Delta t, \dots$. A transformada de Fourier desta sequência

$$f_t = f(t\Delta t), t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

é definida por

$$F_{\Delta}(\lambda) = \frac{\Delta t}{2\pi} \sum_{t=-\infty}^{\infty} f_t e^{-i\lambda t \Delta t},$$

Equação 25

sendo que a transformada inversa é

$$f_t = \int_{-\pi/(\Delta t)}^{\pi/(\Delta t)} F_{\Delta}(\lambda) e^{i\lambda t \Delta t} d\lambda$$

Equação 26

O teorema de Parseval para essa situação é

$$\Delta t \sum_t |f_t|^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/(\Delta t)}^{\pi/(\Delta t)} |F_{\Delta}(\lambda)|^2 d\lambda$$

Equação 27

Um caso especial e frequente ocorre para $\Delta t = 1$, para qual aplica-se as modificações óbvias nas relações acima.

Um fenômeno interessante que ocorre quando amostramos uma função contínua em intervalos de tempo igualmente espaçados é o *aliasing*. Usando os resultados acima e sendo F a transformada de Fourier de f , temos que

$$\begin{aligned} f_t = f(t\Delta t) &= \int_{-\infty}^{\infty} F(\alpha) e^{-i\alpha t \Delta t} d\alpha = \\ &= \sum_j \int_{\pi(j-1)/(\Delta t)}^{\pi(j+1)/(\Delta t)} F(\alpha) e^{i\alpha t \Delta t} d\alpha = \\ &= \int_{\pi(j-1)/(\Delta t)}^{\pi(j+1)/(\Delta t)} \sum_j F\left(\lambda + \frac{2\pi j}{\Delta t}\right) e^{i\alpha t \Delta t} d\lambda, \end{aligned}$$

após realizar a transformação $\lambda = \alpha - \frac{2\pi j}{\Delta t}$. Usando a equação 22, tem-se que

$$F_{\Delta}(\lambda) = \sum_j F\left(\lambda + \frac{2\pi j}{\Delta t}\right), |\lambda| \leq \frac{\pi}{\Delta t}$$

Equação 28

Segue-se que a transformada de Fourier, na frequência λ , da sequência amostrada f_t , é igual à soma das transformadas de Fourier de $f(t)$, nas frequências $\lambda, \lambda \pm 2\pi/(\Delta t), \lambda \pm 4\pi/(\Delta t)$ etc.

IV) Tempo discreto e Frequência discreta

Suponha agora, um número finito de valor amostrados de $f(t)$, para $0 < t < T$, a saber, f_0, f_1, \dots, f_{N-1} , nos pontos

$$t_j = \frac{T}{N}j, \quad j = 0, 1, 2, \dots, N - 1.$$

Equação 29

Segue-se que $\Delta t = T/N$ e $f_j = f(t_j)$. Da teoria da integral de Riemann, se $g(t)$ for contínua,

$$\int_0^T g(t) dt = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{T}{N} \sum_{j=0}^{N-1} g\left(\frac{T}{N}j\right),$$

logo é possível aproximar os coeficientes de Fourier dados nas equações 17 e 18 por

$$a_n^{(N)} = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{N-1} f_j \cos(\lambda_n t),$$

Equação 30

$$b_n^{(N)} = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{N-1} f_j \text{sen}(\lambda_n t),$$

Equação 31

onde $\lambda_n = 2\pi n/N$, são as *freqüências de Fourier*. Na forma complexa a *transformada discreta de Fourier* da sequência f_j é dada por

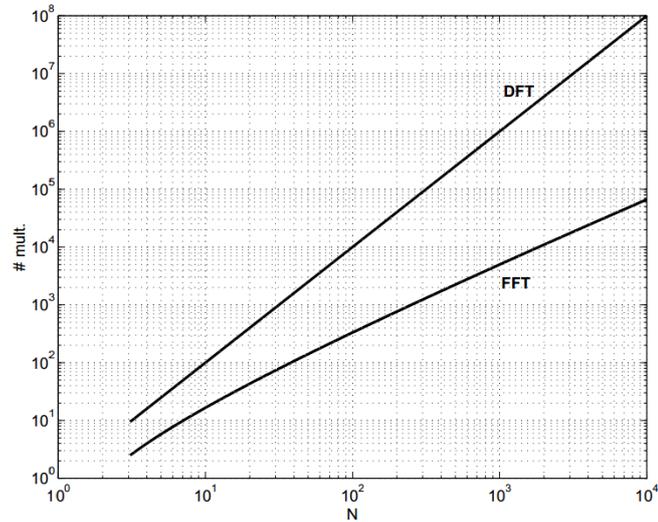
$$F_n = \sum_{j=0}^{N-1} f_j e^{-i\lambda_n t}.$$

Equação 32

Essa transformada discreta é muito importante e extensivamente usada para estimar o espectro de um processo estacionário. O cálculo direto da equação 32 envolve N^2 operações complexas; no entanto, usando um algoritmo chamado FFT (fast Fourier transform), ela pode ser calculada usando $N_0 \cdot \log N_0$ operações. Esse algoritmo é o de Cooley e Tukey (1965). A Figura 31 apresenta uma comparação

com o número de operações em relação à N entre a transformada direta de Fourier (DFT) e a transformada rápida de Fourier (FFT).

Figura 31 - Comparação entre operações FFT e FT.



Fonte: Schafer, 1999.

A transformada inversa é

$$f_j = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F_n e^{i\lambda_n t},$$

Equação 33

e o teorema de Parseval fica

$$\sum_{t=0}^{N-1} |f_j|^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |F_n|^2$$

Equação 34

Na realidade, os valores $a_n^{(N)}, b_n^{(N)}, n = 0, 1, 2, \dots$ consistem de no máximo N números. Esse fato segue das seguintes relações

$$\begin{aligned} \cos\left[\left(kN \pm n\right) \frac{2\pi}{T} t_j\right] &= \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t_j\right), \\ \text{sen}\left[\left(kN + n\right) \frac{2\pi}{T} t_j\right] &= \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{T} t_j\right), \\ \text{sen}\left[\left(kN - n\right) \frac{2\pi}{T} t_j\right] &= -\text{sen}\left(\frac{2\pi n}{T} t_j\right), \end{aligned}$$

Equação 35

para $n = 1, 2, \dots, N$ números e k qualquer inteiro.

As fórmulas, equação 35, mostram que é suficiente calcular os coeficientes discretos de Fourier para $n = 0, 1, \dots, [N/2]$.

3.5.2.1 *Análise Espectral*

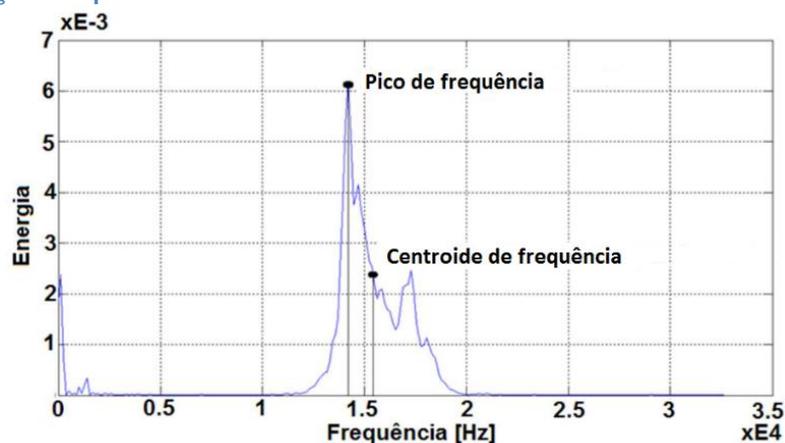
Além da análise visual, indicadora da configuração de distribuição das potências em função das frequências, para análise do espectro de potência será apresentada, também, terminologia referenciada pela PAC.

Centróide de frequência (*centroid frequency*): também conhecido como o primeiro momento de inércia, é calculado através da razão entre o somatório do produto da frequência com a respectiva magnitude pelo somatório das magnitudes. Ilustrado na Figura 32.

Pico de frequência (*peak frequency*): é o ponto onde é registrado a maior magnitude no espectro de potência. Também ilustrado na Figura 32.

Potência parcial (*partial power*): é um parâmetro derivado do espectro de potência da forma de onda associado a um sinal. É valor em percentagem e é calculado pela soma da magnitude do espectro de potência em um determinado intervalo de frequências (até quatro destes intervalos podem ser especificados), dividindo-o pelo total de energia em outra faixa de frequências, e multiplicando o resultado por 100.

Figura 32 - ilustração dos parâmetros.



Fonte: Justen, 2012.

3.5.3 Análise de Ondasletas

Meyer (1993) apresenta uma retrospectiva histórica das ondasletas, desde Fourier (1822), passando por Haar (1910), Grossmann e Morlet (1984), Daubechies (1988) até os dias de hoje. O enfoque é o de processamento de sinais, potencialmente o mais atrativo para aplicação das ondasletas. Do ponto de vista algorítmico, há só um algoritmo – a análise de Fourier – quando se trata de sinais estacionários, mas muitos algoritmos a considerar quando se trata de sinais não estacionários, dentre os quais aqueles que operam com ondasletas em tempo-escala ou ondasletas em tempo-pseudofrequência.

Outro aspecto relacionado com as ondasletas é que pesquisadores em áreas distintas, não se comunicando entre si, foram responsáveis por muitos avanços na área. Isso aconteceu também, por exemplo, com as ideias relacionadas com o filtro de Kalman. O livro de Meyer (1993) é uma boa referência para o leitor. Outra é o livro singular de Barbara Hubbard (1996), escrito com linguagem acessível a não matemáticos, e que contém vários depoimentos dos principais pesquisadores envolvidos na área, como Y. Meyer, I. Daubechies, D. Donoho, S. Mallat, D. Gabor, A. Grossmann, J. Morlet e outros.

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

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

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

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

Equação 36

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

No campo da estatística, as ondaletas foram usadas em estimação de densidades, regressão não paramétrica, estimação do espectro de processos estacionários e estimação do espectro evolutivo de processos não estacionários. Há uma quantidade muito grande de aplicações às diversas áreas do conhecimento.

Como referências na área de estatística que tratam de ondaletas, estão Ogdem (1997), Vidakovic (1999), Percival e Walden (2000) e Nason (2008).

3.5.3.1 Ondaletas

Ondaletas são funções que satisfazem certas propriedades. Elas podem ser suaves ou não, simétricas ou não e podem ter expressões matemáticas simples ou não.

Por analogia com a análise de Fourier, considere o espaço $L^2(\mathbb{R})$ de todas as funções mensuráveis de quadrado integrável sobre \mathbb{R} . Aqui, as funções $f(t)$ devem decair para zero, quando $|t| \rightarrow \infty$; logo, as exponenciais (equação 5) não pertencem a esse espaço. Ao procurar ondas que geram $L^2(\mathbb{R})$, elas devem decair rapidamente para zero. A ideia é considerar dilatações (compressões) e translações de uma única função ψ , de modo a cobrir \mathbb{R} . Ou seja, considera-se ondaletas

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k), j, k \in \mathbb{Z}$$

Equação 37

isto é, $\psi_{j,k}(t)$ é obtida de $\psi(t)$ por uma *dilatação binária* 2^j e uma *translação diádica* $k2^{-j}$. Estamos, então, considerando um caso particular da equação 36. As funções $\{\psi_{j,k}(t), j, k \in \mathbb{Z}\}$ formam uma base que não precisa ser necessariamente ortogonal. A vantagem de se trabalhar com bases ortogonais é permitir a reconstrução perfeita do sinal original a partir dos coeficientes da transformada. Uma transformada ortogonal, como aquela usando senos e cossenos, é concisa, e cada coeficiente é calculado como o produto interno do sinal com a função da base (e^{int} no caso de análise de Fourier). Daí o interesse em considerar bases de ondaletas que sejam ortogonais. Meyer provou, em 1985, que é possível construir tais bases. Considere, pois, uma base ortonormal gerada por ψ :

$$\{\psi_{j,k}(t), j, k \in \mathbb{Z}\}$$

Equação 38

ou seja,

$$\langle \psi_{j,k}, \psi_{l,m} \rangle = \delta_{j,k} \delta_{l,m}, \quad j, k, l, m \in \mathbb{Z}$$

Equação 39

de tal sorte que, para qualquer $f(t)$ de quadrado integrável sobre \mathbb{R} ,

$$f(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k} \psi_{j,k}(t).$$

Equação 40

A convergência na equação 40 deve ser entendida em média quadrática. Assim, é dito que a equação 40 é uma série de ondaletas de $f(t)$ e os coeficientes de ondaletas são dados por

$$c_{j,k} = \langle f, \psi_{j,k} \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}(t) dt.$$

Equação 41

A relação de Parseval análoga a equação 14, vale também aqui, a saber

$$\int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt = \sum_j \sum_k c_{j,k}^2.$$

As funções ψ e $\psi_{j,k}$ satisfazem certas propriedades, dentre as quais estão:

(P1) $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$ (admissibilidade).

(P2) $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)| dt = 0$

(P3) $c_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$, onde $\Psi(\omega)$ é a transformada de Fourier de $\psi(t)$.

Uma condição necessária para (P3) valer é que $\Psi(0) = 0$, que é equivalente a (P1).

(P4) $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1$ ou $\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(\omega)|^2 dt = 2\pi$.

(P5) Os primeiros $r - 1$ momentos ψ de anulam-se, isto é,

$$\int_{-\infty}^{\infty} t^r \psi(t) dt = 0, \quad j = 0, 1, \dots, r - 1,$$

para algum $r \geq 1$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |t^r \psi(t)| dt < \infty.$$

O valor de r está ligado ao grau de suavidade (regularidade) de ψ : quanto maior r , mais suave será ψ .

Algumas ondaletas têm suporte compacto, que é uma propriedade desejável e tem a ver com o fato de as ondaletas serem localizadas no tempo. Nem todas as ondaletas geram sistemas ortogonais, como o chapéu mexicano por exemplo.

No caso de ondaletas com suporte compacto, o valor de r está também relacionado com o suporte da ondaleta. Veja abaixo e Hardle et al. (1998) para mais informação sobre esse assunto.

Veremos que uma maneira de gerar ondaletas é pela *função escala*, ou *ondaleta pai*, ϕ , que é uma solução da equação

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_j \ell_k \phi(2t - k)$$

Equação 42

Essa função gera uma família ortonormal em $L^2(\mathbb{R})$,

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - k), \quad j, k \in \mathbb{Z}$$

Equação 43

nessas condições, ψ pode ser obtida de ϕ por

$$\psi_{j,k} = \sqrt{2} \sum_k h_k \phi(2t - k)$$

Equação 44

sendo

$$h_k = (-1)^k \ell_{1-k},$$

Equação 45

a chamada *quadrature mirror filter relation*. Na realidade, ℓ_k e h_k são coeficientes de filtros passa-baixo (*low-pass*) e passa-alto (*high-pass*), respectivamente, chamados *quadrature mirror filters*, usados para calcular a transformada de ondaleta discreta. Esses coeficientes são dados por

$$\ell_k = \sqrt{2} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) \phi(2t - k) dt$$

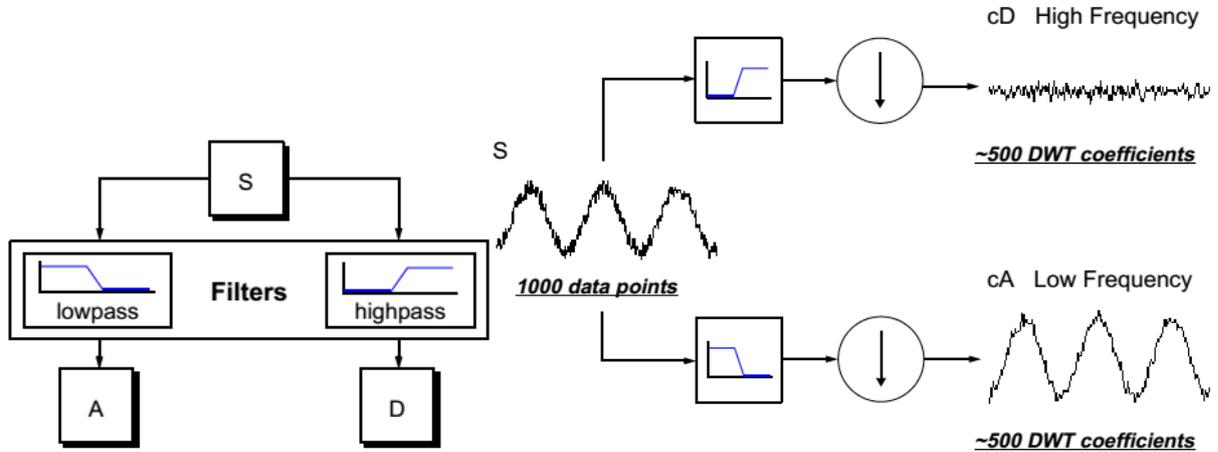
Equação 46

$$h_k = \sqrt{2} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) \phi(2t - k) dt$$

Equação 47

A Figura 33 ilustra a *quadrature mirror filter relation* e o resultado.

Figura 33 - Quadrature mirror filter relation, filtro passa baixo “A” e filtro passa alto “D”.



Fonte: MatLab Toolbox, versão 1.7.

As equações 42 e 44 são chamadas *equações de dilatação*. As ondaletas ϕ geram determinados subespaços de uma análise de multirresolução, que será objeto da próxima seção. Pode-se mostrar que $\sum_k \ell_k = \sqrt{2}$, $\sum_k h_k = 0$, $\sum_k \ell_k^2 = 1$ e 1 , se $m = 0$, e igual a zero, caso contrário.

Convém, então, considerar o sistema ortonormal

$$\{\phi_{j_0,k}(t), \psi_{j,k}(t), j, k \in \mathbb{Z}, j \geq j_0\}$$

Equação 48

de tal sorte que podemos escrever, para $f(t) \in \mathbb{R}$,

$$f(t) = \sum_k c_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(t) + \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t),$$

Equação 49

na qual

$$c_{j_0,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \phi_{j_0,k}(t) dt,$$

Equação 50

$$d_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}(t) dt.$$

Equação 51

Na equação 49, j_0 é a escala de resolução mais baixa (*coarsest scale*). Veja também a próxima seção.

3.5.3.2 Análise de Multirresolução

A análise de multirresolução permite analisar os dados disponíveis em várias escalas de resolução. É como se pudéssemos “observar” esses dados por um microscópio e estudar seu comportamento em várias magnificações.

Formalmente, uma análise de multirresolução (AMR) é uma sequência crescente de subespaços fechados $\{V_j, j \in \mathbb{Z}\}$, que aproximam $L^2(\mathbb{R})$, isto é

$$(MR1) \dots \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset \dots$$

$$(MR2) L^2(\mathbb{R}) = \overline{\cup_j V_j}.$$

$$(MR3) \cap_j V_j = \{0\}.$$

A ideia que está por trás dessas relações é a seguinte. Considere uma função f de $L^2(\mathbb{R})$, e queremos obter aproximações a f em vários níveis de resolução. Cada subespaço V_j será constituído por funções aproximantes, sendo que a melhor aproximação é obtida considerando-se a projeção ortogonal de f sobre cada V_j . Se $\hat{f}(x)$ indicar tal projeção, então,

$$\forall g(x) \in V_j, \|g(x) - f(x)\| \geq \|\hat{f}(x) - f(x)\|$$

O fato que $V_j \subset V_{j+1}$ significa que, ao passar do nível de resolução j (ou escala 2^j) para o nível de resolução $(j + 1)$, ganha-se informação (ou adicionamos “detalhes”). À medida que a resolução aumenta ($j \rightarrow \infty$), a função aproximada converge para a função original e obtêm-se (MR2).

Por outro lado, quando aproxima-se f a níveis de resolução cada vez menores, perde-se informação. Ou seja, para ($j \rightarrow -\infty$), a aproximação de f converge para a função nula e obtêm-se (MR3).

Numa AMR, o espaço V_{j+1} é obtido de V_j escalando-se as funções aproximadoras pela razão dos respectivos níveis de resolução. Ou seja,

$$(MR4) f(x) \in V_j \Leftrightarrow f(2t) \in V_{j+1}, \forall j.$$

Pode-se provar (Mallat, 1989a, b) que existe uma função ϕ e $L^2(\mathbb{R})$ (a função escala), tal que $\{\phi_{j,k}(t), k \in \mathbb{Z}\}$ é uma base ortonormal de V_j , onde $\phi_{j,k}(t)$ é dada por (41). A informação que é perdida, quando descemos de V_{j+1} para V_j (o "detalhe" perdido), pode ser representada pelo espaço W_j , complemento ortogonal de V_j em V_{j+1} , isto é,

$$(MR5) V_{j+1} = V_j \oplus W_j, W_j \perp V_j,$$

onde \oplus representa soma direta. Segue-se que $V_j = \bigoplus_{k=-\infty}^{j-1} W_k$.

Defina $\psi(t)$ por . Então, pode-se mostrar que $\{\psi_{j,k}(t), k \in \mathbb{Z}\}$ forma uma base ortogonal para W_j . Como $\bigcup_j V_j = \bigcup_j W_j$ é denso em $L^2(\mathbb{R})$, as funções $\{\psi_{j,k}(t), j \in \mathbb{Z}, k \in \mathbb{Z}\}$ formam uma base ortogonal para $L^2(\mathbb{R})$.

Dada f de $L^2(\mathbb{R})$, existe J tal que $f_j \in V_j$ aproxima f . Se $g_i \in W_i, f_i \in V_i$, por (MR5), temos

$$f_j = f_{j-1} + g_{j-1}$$

e, repetindo o argumento,

$$f \simeq f_j = g_{j-1} + g_{j-2} + \dots + g_{j-M} + f_{j-M}.$$

Equação 52

Diz-se que equação 52 é uma decomposição de f em ondaletas. Observe que f_{j-M} é uma combinação linear das $\phi_{j-M,k}$ e g_j são combinações lineares das $\psi_{j,k}, j = J - M, \dots, J - 1$.

Observe, também, que

$$L^2(\mathbb{R}) = \bigoplus_{j \in \mathbb{Z}} W_j = V_0 \oplus \bigoplus_{j \geq 0} W_j = V_{j_n} \oplus \bigoplus_{j \geq j_n} W_j,$$

para algum inteiro j_0 , de modo que, para qualquer $f \in L^2(\mathbb{R})$, é possível escrever

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{j,k} d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \\ &= \sum_k c_{j_0,k} \phi_{j_0,k}(t) + \sum_{j \geq j_0} \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t), \\ &= \sum_k c_{0,k} \phi_{0,k}(t) + \sum_{j \geq 0} \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t) \end{aligned}$$

Equação 53

onde na terceira relação adota-se $j_0 = 0$ e

$$\begin{aligned} c_{j,k} &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \phi_{j,k}(t) dt, \\ d_{j,k} &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}(t) dt. \end{aligned}$$

3.5.2.3 A Transformada de Ondaletas

A transformada de ondaletas apareceu em sua forma contínua com os trabalhos de dois pesquisadores franceses, J. Morlet, um geofísico, e A. Grossmann, um físico teórico. Veja Morlet (1981, 1983), Grossmann (1988), Grossmann e Morlet (1984, 1985).

Daubechies, Grossmann e Meyer (1986) introduziram um conjunto discreto quase ortogonal e completo de $L^2(\mathbb{R}^n)$ (*ondaleta frames*, para maiores informações veja Morettin, 2014). Na realidade, Meyer queria provar que não havia base ortogonal construída a partir de ondaletas regulares e ficou surpreso ao obter uma base ortogonal (Meyer, 1986, 1987, 1988). Daubechies (1988,1989) introduziu as

ondaletas regulares e de suporte compacto que, como vimos, são bastante utilizadas na prática.

Para f de $L^2(\mathbb{R})$, a *transformada de ondaletas contínua* de f , com respeito a ψ , é definida por

$$(W_{\psi}f)(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad b \in \mathbb{R}, a > 0.$$

Equação 54

Note que a transformada é o produto interno de f pela função $\psi_{a,b}$ dada em (35). Veja o Morettin (2014), Vhuy (1992) e Daubechies (1992) para outros detalhes sobre essa transformada contínua.

Todavia, nosso maior interesse será o caso da *transformada de ondaletas discreta*. Suponha que tenhamos dados $X = (X_0, X_1, \dots, X_{n-1})'$ que, no momento, podem representar observações de um processo estocástico. Vamos supor que $n = 2^J, J > 0$ inteiro. Dizemos que temos uma *amostra diádica*.

Exemplo 2. Suponha que $x = (1, -2, 0, 3, 1, 2, -1, 2)'$. Os valores $f(j) = x_j, j = 0, 1, \dots, 7$ são interpolados por uma função constante por partes, contínua à direita.

Nesse caso, $n = 2^3$, logo $J = 3$. Temos três escalas $2^j, j = 0, 1, 2$. A escala mais fina corresponde ao nível $J - 1 = 2$ e a mais suave corresponde ao nível zero.

O objetivo é extrair informação a partir de x . Especificamente, estaremos interessados em extrair detalhes nas diferentes escalas e localizações.

Os detalhes são dados por diferenças do tipo

$$d_k = x_{2k+1} - x_{2k}, k = 0, 1, \dots, \frac{n}{2} - 1.$$

Equação 55

Por exemplo, $d_0 = x_1 - x_0, d_1 = x_3 - x_2$ etc. Essa diferença será pequena se $x_{2k+1} \approx x_{2k}$; e grande, caso contrário.

A parte suave será obtida via médias locais, na realidade por meio de somas da forma

$$c_k = x_{2k+1} + x_{2k}, k = 0, 1, \dots, \frac{n}{2} - 1.$$

Equação 56

Assim $c_0 = x_1 + x_0, c_1 = x_3 + x_2$ etc Observe que nas equações 55 e 56 faltam diferenças e somas da forma $x_2 - x_1, x_3 - x_2$ etc. Na realidade, as equações 55 e 56 dão detalhes e partes suaves na escala mais fina, quando $d_k = d_{J-1,k}$ e $c_k = c_{J-1,k}$.

Para os próximos níveis repetimos as equações 55 e 56:

$$d_{J-2,\ell} = c_{J-1,2\ell+1} - c_{J-1,2\ell}, \ell = 0, \dots, \frac{n}{4} - 1,$$

Equação 57

$$c_{J-2,\ell} = c_{J-1,2\ell+1} + c_{J-1,2\ell}, \ell = 0, \dots, \frac{n}{4} - 1,$$

Equação 58

A Tabela 8 ilustra o procedimento para nosso exemplo. Especificamente, tem-se:

(i) Para o nível $J - 1 = 2$,

$$d_{2,0} = x_1 - x_0 = -3, d_{2,1} = x_3 - x_2 = 3, d_{2,2} = x_5 - x_4 = 1, d_{2,3} = x_7 - x_6 = 3$$

$$c_{2,0} = x_1 + x_0 = -1, c_{2,1} = x_3 + x_2 = 3, c_{2,2} = x_5 + x_4 = 3, c_{2,3} = x_7 + x_6 = 1$$

(ii) Para o nível $J - 2 = 1$,

$$d_{1,0} = c_{2,1} - c_{2,0} = 4, d_{1,1} = c_{2,3} - c_{2,2} = -2$$

$$c_{1,0} = c_{2,1} + c_{2,0} = 2, c_{1,1} = c_{2,3} + c_{2,2} = 4$$

(iii) Finalmente, para o nível $J - 3 = 0$:

$$d_{0,0} = c_{1,1} - c_{1,0} = 2,$$

$$c_{0,0} = c_{1,1} + c_{1,0} = 6,$$

Note que a energia contida nas observações é $\|x\|^2 = \sum_{i=0}^7 x_i^2 = 24$, enquanto a energia contida nos coeficientes de ondaletas é $\sum_{j,k} d_{j,k}^2 + c_{0,0}^2 = 88$. Para que a energia seja preservada, temos que normalizar os coeficientes de ondaletas. Escrevendo-se $d_k = \alpha(x_{2k+1} - x_{2k})$ e expressão similar para c_k , obtemos que $d_k^2 + c_k^2 = 2\alpha^2(x_{2k+1}^2 - x_{2k}^2)$, de modo que deve-se ter $\alpha = 2^{-1/2}$.

Efetuada essa normalização para os coeficientes obtidos de (i) a (iii) acima, tem-se:

(i) Para o nível 2:

$$d_{2,0} = (x_1 - x_0)/\sqrt{2} = -3/\sqrt{2}, d_{2,1} = 3/\sqrt{2}, d_{2,2} = 1/\sqrt{2}, d_{2,3} = 3/\sqrt{2}$$

$$c_{2,0} = -1/\sqrt{2}, c_{2,1} = 3/\sqrt{2}, c_{2,2} = 3/\sqrt{2}, c_{2,3} = 1/\sqrt{2}$$

(ii) Para o nível 1:

$$d_{1,0} = \frac{c_{2,1} - c_{2,0}}{\sqrt{2}} = 2, d_{1,1} = \frac{c_{2,3} - c_{2,2}}{\sqrt{2}} = -1$$

$$c_{1,0} = \frac{c_{2,1} + c_{2,0}}{\sqrt{2}} = 1, c_{1,1} = \frac{c_{2,3} + c_{2,2}}{\sqrt{2}} = 2$$

(iii) Finalmente, para o nível 0,

$$d_{0,0} = \frac{2 - 1}{\sqrt{2}} = 1/\sqrt{2},$$

$$c_{0,0} = \frac{1+2}{\sqrt{2}} = 3/\sqrt{2}.$$

Na tabela 8, os coeficientes normalizados estão entre parênteses.

Portanto, a função f pode ser escrita

$$f(x) = \frac{3\sqrt{2}}{2} \phi_{0,0}(x) + \frac{\sqrt{2}}{2} \psi_{0,0}(x) + 2\psi_{1,0}(x) - \psi_{1,1}(x) - \frac{3\sqrt{2}}{2} \psi_{2,0}(x)$$

$$+ \frac{3\sqrt{2}}{2} \psi_{2,1}(x) + \frac{\sqrt{2}}{2} \psi_{2,2}(x) + \frac{3\sqrt{2}}{2} \psi_{2,3}(x)$$

Ou seja,

$$f(x) = c_{0,0} \phi_{0,0}(x) + \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{2^j-1} d_{j,k} \psi_{j,k}(x)$$

Dada a forma da Tabela 8, o algoritmo para obter os coeficientes de ondaletas é chamado algoritmo piramidal (uma pirâmide invertida) e será discutido mais adiante.

Tabela 8 - Algoritmo para obter os coeficientes de ondaleta.

dados	$x_0 \ x_1$	$x_2 \ x_3$	$x_4 \ x_5$	$x_6 \ x_7$
d_2	$x_1 - x_0$ -3 $(-3/\sqrt{2})$	$x_3 - x_2$ 3 $(3/\sqrt{2})$	$x_5 - x_4$ 1 $(1/\sqrt{2})$	$x_7 - x_6$ 3 $(3/\sqrt{2})$
c_2	$x_1 + x_0$ -1 $(-1/\sqrt{2})$	$x_3 + x_2$ 3 $(3/\sqrt{2})$	$x_5 - x_4$ 3 $(3/\sqrt{2})$	$x_7 - x_6$ 1 $(1/\sqrt{2})$
d_1	$c_{2,1} - c_{2,0}$ 4 (2)		$c_{2,3} - c_{2,2}$ -2 (-1)	
c_1	$c_{2,1} + c_{2,0}$ 2 (1)		$c_{2,3} - c_{2,2}$ 4 (2)	
d_0	$c_{1,1} - c_{1,0}$ 2 $(\sqrt{2}/2)$			
c_0	$c_{1,1} + c_{1,0}$ 6 $(3\sqrt{2}/2)$			

Pode-se obter os coeficientes de ondaletas $d_2, d_1, d_0 = d_2$ somente em função das observações. De fato, tem-se:

$$d_2: d_{2,0} = x_1 - x_0, d_{2,1} = x_3 - x_2, d_{2,2} = x_5 - x_4, d_{2,3} = x_7 - x_6;$$

$$d_1: d_{1,0} = (x_2 + x_3) - (x_0 + x_1), d_{1,1} = (x_6 + x_7) - (x_4 + x_5);$$

$$d_0: d_{0,0} = (x_4 + x_5 + x_6 + x_7) - (x_0 + x_1 + x_2 + x_3);$$

$$c_0: c_{0,0} = x_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7.$$

Ou seja:

- (a) na escala $2^{J-1} = 4$, os coeficientes são (proporcionais) à diferença de valores adjacentes de $(x_0 + x_1), (x_2 + x_3),$ etc.;
- (b) na escala $2^{J-2} = 2$, os coeficientes são proporcionais à diferença de médias de pares adjacentes, $(x_0 + x_1)$ e $(x_2 + x_3), (x_4 + x_5)$ e $(x_6 + x_7);$

- (c) na escala $2^{J-3} = 1$, o coeficiente $d_{0,0}$ é proporcional à diferença de médias das quádruplas $(x_0 + x_1 + x_2 + x_3)$ e $(x_4 + x_5 + x_6 + x_7)$;
- (d) finalmente, o coeficiente na escala mais grossa, $c_{0,0}$ é proporcional à média de todas as observações.

Quando tivermos x com n componentes x_0, x_1, \dots, x_{n-1} , os coeficientes de ondaletas são arranjados na forma:

- (a) os primeiros $n/2$ coeficientes são associados a diferenças $x_1 - x_0, x_3 - x_2$ etc., na escala 2^{J-1} ;
- (b) os $n/4$ coeficientes seguinte são proporcionais a médias de pares de coeficientes, na escala 2^{J-2} ;

e assim por diante, até se chegar a um coeficiente na escala $2^0 = 1$, proporcional à diferença entre a média das últimas $n/2$ observações e a média das primeiras $n/2$ observações. Finalmente, é obtido o coeficiente $c_{0,0}$ proporcional à média de todas as observações.

4. Materiais e Métodos

4.1 Amostras

Os PVs foram fabricados pela empresa Plastsan Plásticos do Nordeste Ltda. pelo processo de rotomoldagem, utilizando como matéria prima o polietileno de média densidade e serão nossas amostras, dispondo-se de três PVs para utilização em testes e produção de corpos de prova.

4.2 Densidade

O método utilizado para identificar a densidade do material foi a densidade indireta. O ensaio foi realizado no laboratório de controle de qualidade da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE).

Este método tem como premissa básica a equação elementar da densidade, conforme apresentado na equação 6.

$$\rho = M/V$$

Equação 59

Onde:

ρ é a densidade, geralmente expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);

M é a massa;

V é o volume.

As vidrarias, materiais e equipamentos utilizados foram:

- Um litro de álcool etílico 96% da Santa Cruz®, fluido utilizado para medição indireta do volume deslocado e permitir que o corpo de prova não sofra nenhum empuxo do líquido;
- Dois Beckers de 100 mililitros cada, para pesar o corpo de prova encontrando assim sua massa;
- Duas Provetas calibradas de 50 mililitros cada, para imersão completa dos corpos de prova;

- Balança analítica com agente dessecador em Becker, Marte AW220, com precisão de quatro casas decimais e controlar a umidade interna na câmara da balança;
- Duas pipetas volumétricas, sendo uma de 20 mililitros e outra de 10 mililitros, para inserirmos 30 mililitros do líquido na proveta, aonde imergimos os corpos de prova;
- Dois macropipetadores manuais, para controle do volume nas pipetas volumétricas.

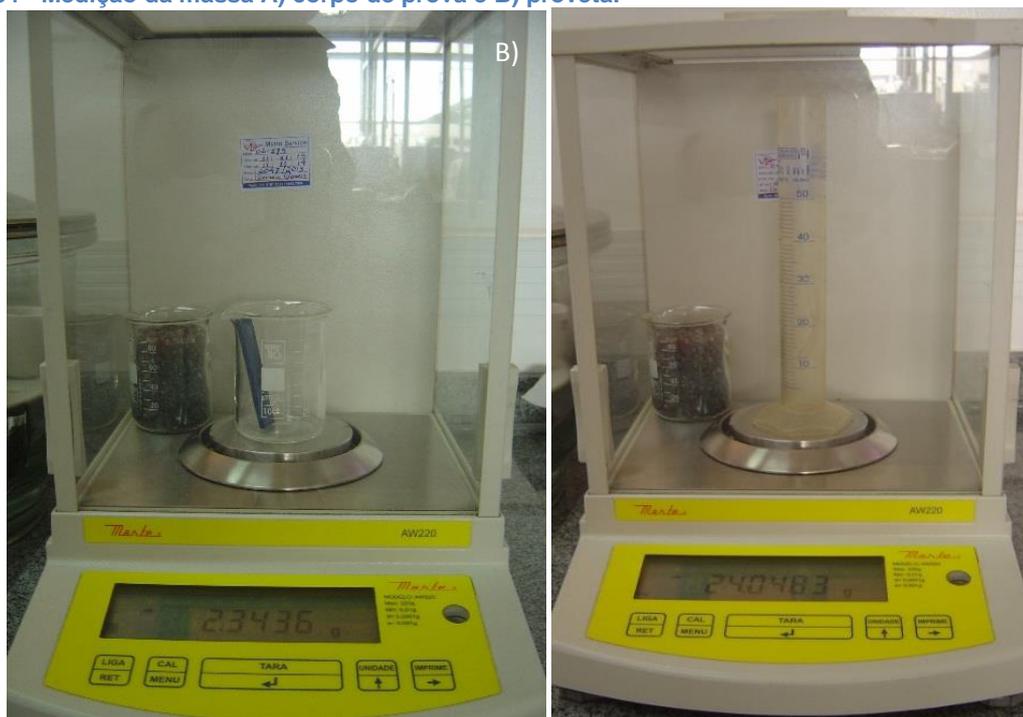
Os corpos de prova utilizados foram os de impacto IZOD, sem o entelha em “V”. Estes foram deixados em ambiente laboratorial por 48 horas, como preconiza a ASTM D618-13.

Foi verificada a estabilidade e nível da balança, a fim de garantir os resultados a serem obtidos.

Primeiro, coloca-se um Becker de 100 mililitros na balança, para apoiar os corpos de prova, e é feita a tara da balança. Então, coloca-se o corpo de prova dentro do Becker, e registra-se sua massa, como apresentado na Figura 34.

Após registrado as massas dos corpos de prova, retira-se o Becker e coloca-se a proveta calibrada, registra-se a massa da proveta (como apresentado na Figura 34), então o álcool etílico é introduzido com o manuseio do macropipetador manual com as pipetas volumétricas de 20 e 10 mililitros cada (utilizando a regra do menisco), a fim de imergir o corpo de prova dentro da proveta 30 mililitros de álcool etílico, garantindo sua imersão completa.

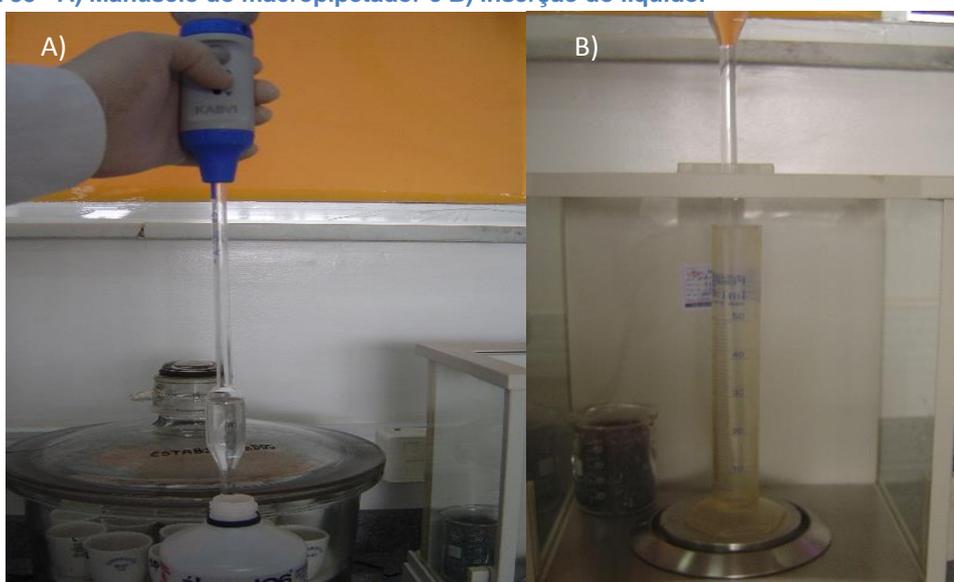
Figura 34 - Medição da massa A) corpo de prova e B) proveta.



Fonte: Autor.

A Figura 35 apresenta o manuseio do macropipetador com pipeta volumétrica e inserção do líquido na proveta dentro da balança para medição da massa.

Figura 35 - A) Manuseio do macropipetador e B) inserção do líquido.



Fonte: Autor.

Assim, é conhecido a massa do conjunto vidraria com fluido. Logo determina-se a densidade do líquido (ρ_l).

Agora é inserido o corpo de prova dentro da proveta com álcool etílico, na balança, e registra-se a massa do conjunto (M_{conj}), M_{prov} com M_l e M_{cp} . E para encontrar o volume total do líquido mais o corpo de prova, tem-se a equação 60:

$$V_{tot} = (M_{conj} - M_{prov})/\rho_l$$

Equação 60

Onde:

ρ_l é a densidade do líquido, neste caso o álcool etílico (g/cm^3);

M_{conj} é a massa do conjunto, sendo a massa da proveta, com a massa do líquido utilizado e massa do corpo de prova;

M_{prov} é a massa da proveta;

V_{tot} é o volume de líquido total.

Logo, é sabido o volume adicionado, que é constante, 30 mililitros. Assim subtraindo V_{tot} de 30 mililitros, é obtido o volume do corpo de prova V_{cp} .

Conhecidos a massa (M_{cp}) e o volume (V_{cp}) do corpo de prova, aplica-se a equação 60 para encontrar a densidade do corpo de prova (ρ_{cp}) com apresentado na equação 61.

$$\rho_{cp} = M_{cp}/V_{cp}$$

Equação 61

Onde:

ρ_{cp} é a densidade do corpo de prova, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

M_{cp} é a massa do corpo de prova, expressa em gramas (g);

V_{cp} é o volume do corpo de prova, sendo $V_{tot} - 30$, expresso em mililitros (ml).

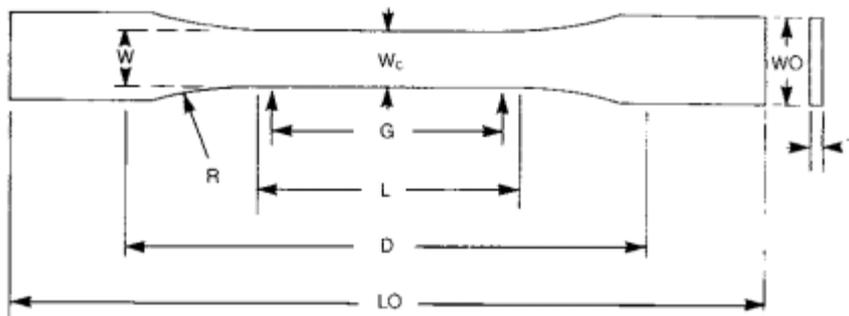
4.3 Ensaio de Tração

Para a aferição das principais propriedades mecânicas foram realizados ensaios de tração em corpos de prova não injetados em molde (prática comum para confecção de corpos de prova de polímeros), mas sim, retirados diretamente de

peças fabricadas com o material em questão para que não houvesse mudança de propriedades, pois estes são fabricados por rotomoldagem, processo que gera produtos plásticos com características diferentes daquelas apresentadas por produtos injetados.

O ensaio consiste basicamente no tracionamento até a ruptura, de um corpo de prova específico confeccionado a partir do material de interesse. Este é realizado de acordo com normas, que padronizam tanto a geometria (Figura 36) quanto o procedimento de ensaio, no caso foi utilizada a norma ASTM D-638. A partir do ensaio de tração é possível determinar diversas propriedades da amostra como: tensão de escoamento, tensão de ruptura, alongamento, carga de ruptura e módulo de elasticidade. Devido à espessura do PV para retirada da amostra foi utilizada as especificações do corpo de prova tipo III (Tabela 9).

Figura 36 - Corpo de prova para ensaio de tração.



Fonte: ASTM 638.

Tabela 9 - Medidas para cada tipo de corpo de prova.

Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, T, mm (in.) ^A					Tolerances
	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
W—Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) ^{B,C}
L—Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02) ^C
WO—Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO—Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO—Length overall, min ^H	185 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G—Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) ^C
G—Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
D—Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R—Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) ^C
RO—Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)

Fonte: ASTM 638.

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LAMEC) da Universidade Federal do Ceará, realizado de maneira totalmente computadorizada, os corpos de prova foram ensaiados utilizando-se a máquina modelo EMIC, com velocidade de deslocamento de 5 mm/min, com célula de carga com capacidade máxima de até 100 kN.

4.4 Análise Térmica

Análise Térmica é um termo que abrange um grupo de técnicas nas quais uma propriedade física ou química de uma substância, ou de seus produtos de reação, é monitorada em função do tempo ou temperatura, enquanto a temperatura da amostra, sob uma atmosfera específica, é submetida a uma programação controlada.

Os ensaios de análise térmica foram realizados no Laboratório de Termoanálise da Universidade Federal do Ceará.

4.4.1 Análise Termogravimétrica (TGA)

Termogravimetria é a técnica na qual a mudança da massa de uma substância é medida em função da temperatura enquanto esta é submetida a uma programação controlada, exposta a uma determinada atmosfera. Com isso é possível determinar a temperatura de degradação térmica do polímero. De fato, os polímeros podem apresentar, quando submetidos a um tratamento térmico, mudanças estruturais, caracterizadas por ruptura de ligações químicas nas cadeias macromoleculares e consecutivamente pela eliminação de produtos voláteis.

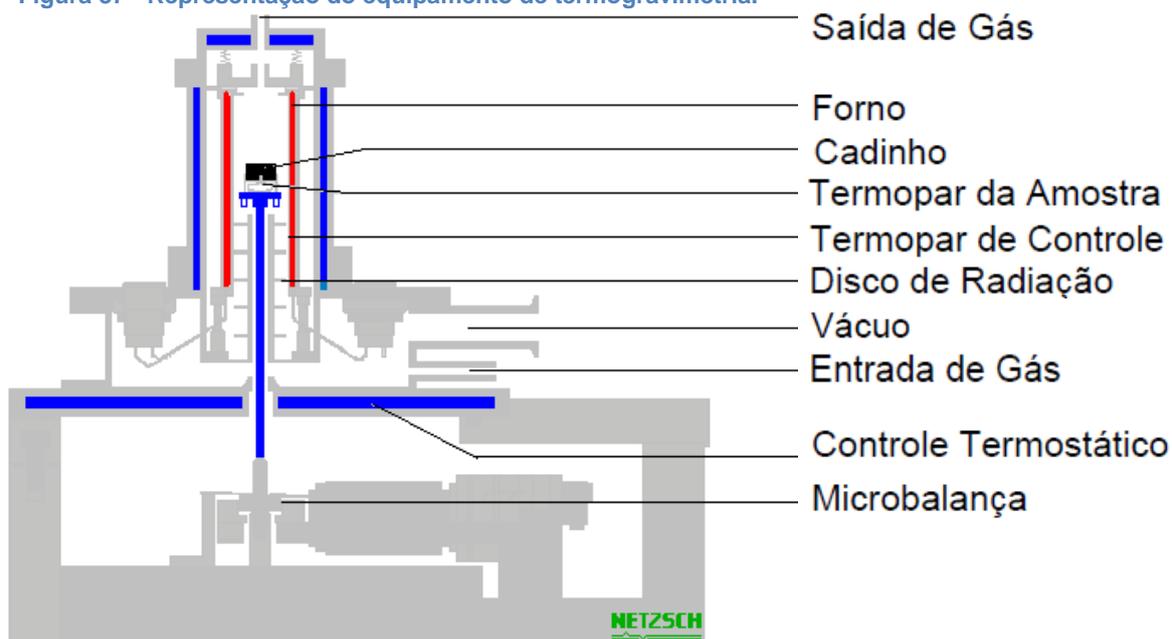
No gráfico da análise termogravimétrica, a ordenada é apresentada usualmente em percentual de massa wt%, ao invés da massa total, proporcionando assim uma fácil comparação entre várias curvas em uma base normalizada. É preciso deixar claro que existem mudanças significativas, particularmente na

temperatura da amostra, que podem refletir na curva TGA quando a massa inicial é significativamente variada entre experimentos.

As curvas DTG aperfeiçoam a resolução e são mais facilmente comparadas a outras medidas. Entretanto, a diferenciação é um grande amplificador; sendo, muitas vezes, aplainada pelo software para gerar um gráfico da derivada. Tais curvas são também de interesse do estudo da cinética das reações, uma vez que ela apresenta a taxa efetiva da reação. A estequiometria, todavia, é mais legível na representação original.

O equipamento utilizado na análise termogravimétrica é basicamente constituído por uma microbalança, um forno, termopares e um sistema de fluxo de gás. Uma ilustração é apresentada a seguir (Figura 37).

Figura 37 - Representação do equipamento de termogravimetria.



Fonte: Autor.

O equipamento utilizado foi o TGA Q 50, com o aumento da temperatura à taxa de aquecimento de 10°C/min de aproximadamente 25°C até 600°C em atmosfera controlada de nitrogênio.

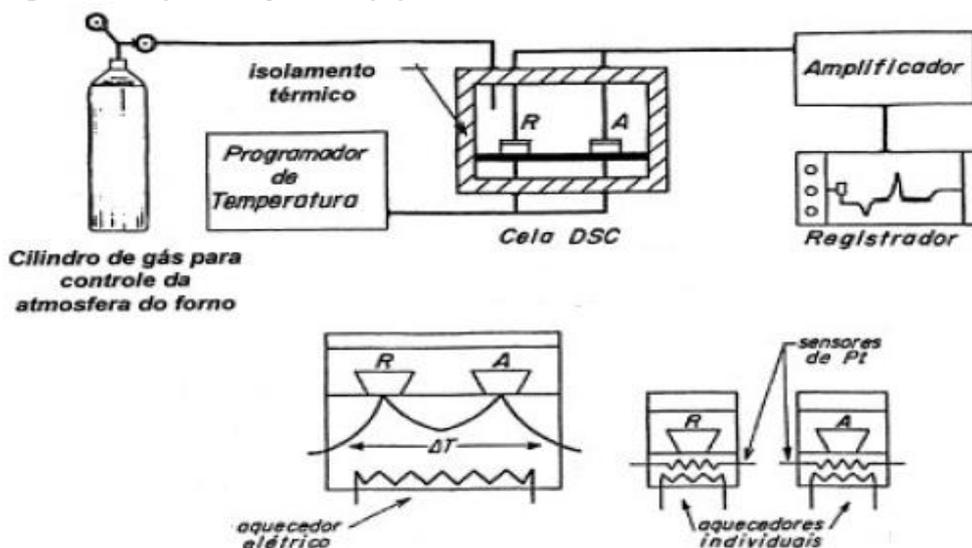
4.4.2 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

Esse método de análise térmica baseia-se principalmente na resposta de uma amostra, em relação a uma referência, quando submetida a uma determinada temperatura. Essa resposta pode ser de natureza endotérmica, absorvendo energia, ou exotérmica, liberando energia. A técnica de DSC é capaz de quantificar a energia envolvida nessas reações (respostas), podendo ser estudada por dois mecanismos, sendo eles: “compensação de energia” e “fluxo de calor”.

Em nosso caso será abordada a técnica referente ao mecanismo de “fluxo de calor”. O equipamento é composto de um único forno no qual as amostras, de estudo e de referência, são submetidas a um mesmo sistema de fornecimento de energia (calor) em uma mesma atmosfera. Cada amostra está localizada em um cadinho particular, disposto sobre uma base de metal altamente condutor (normalmente platina), associado a cada cadinho há um termopar. Cada vez que a amostra de estudo reage, um fluxo de energia se estabelece na base condutora entre os cadinhos. Os dados na forma de potencial elétrico [μV] correspondente ao aumento da temperatura de ambos os cadinhos no interior do forno devem aumentar linearmente e simetricamente. Assim, uma curva de μV versus tempo ou temperatura pode ser computada. O fluxo é então mensurado através dos sensores de temperatura posicionados sob cada cadinho, obtendo assim um sinal proporcional à diferença de capacidade térmica entre a amostra e a referência. O registro posteriormente corrigido da curva DSC é expresso em termos de temperatura ou tempo nas ordenadas, e mW/mg (miliwatts por miligramas) na abscissa.

O esquema dos equipamentos é ilustrado a seguir pela Figura 38.

Figura 38 - Representação do equipamento de DSC.



Fonte: Autor.

O equipamento utilizado foi o DSC Q 20, com taxa de aquecimento de 10°C/min, numa varredura de 25°C até 150°C em atmosfera controlada de nitrogênio.

4.5 Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier

O espectro infravermelho de um composto químico é considerado uma de suas propriedades físico-químicas mais características e, por conta disto, a espectroscopia na região do infravermelho tem extensa aplicação na identificação de compostos. A técnica de espectroscopia de Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) de um material consiste em registrar as frequências características devidas à interação de uma onda electromagnética com as ligações químicas constitutivas do material.

A condição para que ocorra a absorção da radiação infravermelha é que haja variação do momento de dipolo elétrico da molécula como consequência de seu movimento vibracional ou rotacional (o momento dipolo é determinado pela magnitude da diferença de carga e a distância entre dois centros de carga). Somente nessas circunstâncias, o campo elétrico alternante da radiação incidente interage com a molécula, originando espectros. De outra forma, pode-se dizer que o

espectro de absorção no infravermelho tem origem quando a radiação eletromagnética incidente tem um componente com frequência correspondente entre dois níveis vibracionais.

A vibração dos átomos no interior de uma molécula apresenta energia coerente com a região do espectro eletromagnético correspondente ao infravermelho (100 a 10000 cm^{-1}). As vibrações moleculares podem ser classificadas em deformação axial (ou estiramento) e deformação angular e podem ser simétricas ou assimétricas. As vibrações angulares podem ainda ser classificadas como no plano ou fora do plano

Uma ligação química pode apresentar três bandas de absorbância diferentes. Cada uma é característica de um modo de vibração (*stretching*, *bending* ou *rocking*). A frequência característica depende dos átomos constitutivos da ligação e pode ser também influenciada pelo ambiente químico do material. No caso do polietileno, formado pela repetição do grupo $-(\text{CH}_2)-$, teríamos, então, que encontrar diferentes bandas de absorbância características das ligações simples C-H do tipo sp^3 , e ligações covalentes C-C.

De acordo com Coates, 2000, que reúne as frequências das principais funções químicas nos informa que a ligação C-H apresenta três regiões de absorção. Cada uma corresponde a um modo de vibração como mencionado no princípio do FTIR.

- Valência ou "*stretching*" previsto por um número de onda entre 2950 e 2850 cm^{-1} .
- Pêndulo ou "*bending*" por um número de onda entre 1350 e 1450 cm^{-1} .
- Torção ou "*rocking*", que tem um número de onda aproximado de 700 cm^{-1} .

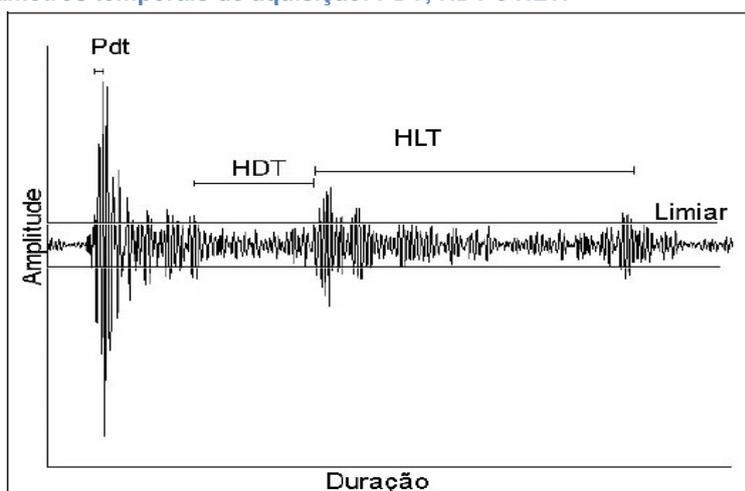
A mesma referência nos indica que a ligação C-C vibra em modo "*stretching*" em um número de onda entre 1000 e 1250 cm^{-1} .

4.6 Emissão Acústica

Foi utilizado o sistema operacional SAMOS multichannel Acoustic Emission system, da Physical Acoustic Corporation, com sensores R15I DN 46, DN 47 e DN 49, respectivamente. Foi utilizada também graxa de vedação de silicone para acoplar a amostra ao sensor que fica em um suporte específico que é paramagnético. O filtro escolhido, capaz de eliminar ruídos, foi de 35dB, comprimento do hit de 1k (1024 pontos), uma taxa de amostragem de 1MSP/s (10^6 pontos/segundo) e pré-disparo de 256 μ s.

O módulo paramétrico é utilizado para extrair os parâmetros de emissão acústica do sinal captado. O sinal é elevado ao quadrado, para que apenas o ciclo positivo seja considerado, e para parametrização é feita baseada em três tempos de decisão descritos no manual do equipamento da Physical Acoustics Corporation (Figura 39). O *Peak Definition Time (PDT)* é uma função baseada em tempo que permite a determinação do tempo do pico verdadeiro da forma de onda acústica. O *PDT* é ativado quando o primeiro sinal cruza o limiar e começa a contagem regressiva até zero, a menos que um valor maior de amplitude ocorra. Nesse caso, o *PDT* recomeça a contagem. O *Hit Definition Time (HDT)* também é uma função baseada em tempo que permite ao sistema determinar o fim do sinal, finalizar os processos de medição e armazenar os atributos do sinal. A contagem de *HDT* termina quando o último cruzamento do limiar acontece. Finalmente o *Hit Lockout Time* é uma função que inibe a medição de reflexos e chegadas tardias de partes do sinal de emissão acústica. O circuito de *HLT* é ativado pelo término do *HDT*. Essas funções podem assumir valores dentro de uma faixa de 30 μ s até 130 ms. Os valores padrões que o equipamento possui são: 200 μ s para o *PDT*, 800 μ s para o *HDT* e 1000 μ s para o *HLT*. Mas o manual também sugere um valor alternativo para materiais não-metálicos ou compósitos de 20-50 μ s para o *PDT*, 100-200 μ s para o *HDT* e 300 μ s para o *HLT*. O valor adotado neste estudo foi 50 μ s para o *PDT*, 200 μ s para o *HDT* e 300 μ s para o *HLT*, como sugerido no manual de utilização do equipamento da *Physical Acoustic Corporation*.

Figura 39 - Parâmetros temporais de aquisição: PDT, HDT e HLT.



Fonte: Manual Physical Acoustic Corporation, 2005.

4.7 Procedimento Experimental

4.7.1 Velocidade de Propagação

Como mencionado, a velocidade de propagação da onda acústica no material é de fundamental importância para a correta discriminação e localização das fontes de emissão acústica. Por isso faz-se necessário o cálculo experimental para a velocidade de propagação do material.

A propagação de uma onda em um material é regida por suas propriedades elásticas, sendo possível relacionar, por exemplo, velocidade de propagação da onda (C_s) com o módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν) e densidade (ρ) do material, como vemos na equação 62 descrita pela teoria das ondas de Lamb (V. Iopresto, 2009).

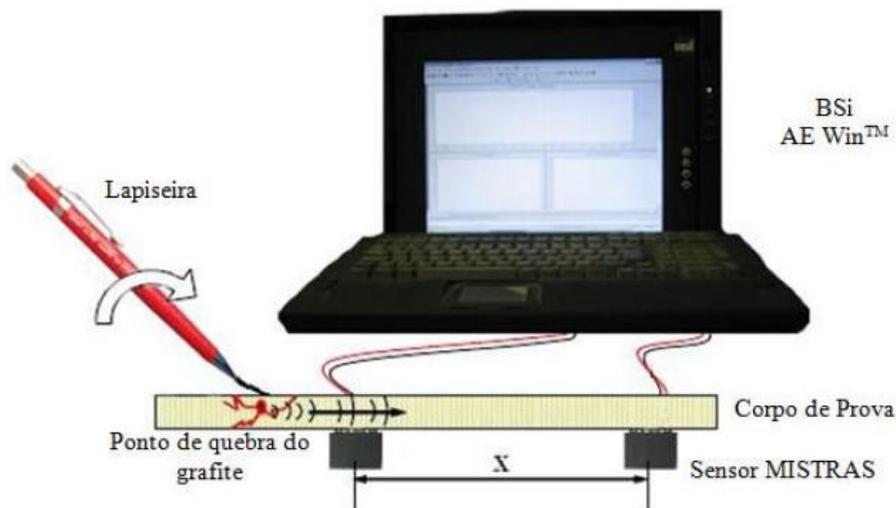
$$C_s = \left[\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)} \right]^{1/2}$$

Equação 62

O ensaio segue metodologia semelhante à ASTM E976, na qual a fonte de emissão acústica é a energia liberada através da quebra de um grafite sobre a superfície da amostra gerando uma onda mecânica que se propaga pelo material e é captada pelos sensores. Os sensores estão fixos e posicionados a distância (x)

estabelecida em 12,5 cm na primeira bateria de ensaios e 17,5cm na segunda bateria de ensaios. A Figura 40 mostra um retrato e uma ilustração do ensaio. A diferença de tempo entre a chegada da onda aos sensores revela a quantidade de tempo necessária para onda percorrer a distância determinada, podendo assim calcular a velocidade de propagação da onda no material (C_e) através da equação 63. Para cada corpo de prova foram feitos cinco ensaios, utilizando o valor da média aritmética como resultado.

Figura 40 - Ilustração do ensaio para determinação da velocidade de propagação.



Fonte: Pennafort Jr., 2013.

$$C_e = \frac{x}{\Delta t_x}$$

Equação 63

4.7.2 Ensaio no Poço de Visita

Nos ensaios de EA normalmente a fonte é o próprio material em teste, mediante a aplicação de um estímulo. Neste estudo a fonte será o próprio PV mediante um estímulo. O estímulo será produzido por uma breve aplicação de carga uniaxial de compressão de 500kgf sobre o poço de visita. Depois de retirada a carga, o material tende a devolver a energia acumulada, já que o ensaio ocorre no regime elástico, liberando assim uma quantidade de energia proporcional à tensão aplicada.

Para assegurar a aplicação da força desejada foi feita a calibração da carga exercida pelo pistão de ar comprimido com uma célula de carga calibrada (Figura 41), cedida pelo Laboratório de Metrologia Mecânica da Universidade Federal do Ceará.

Figura 41 - Calibração da carga aplicada pela célula de carga.



Fonte: Autor.

5. Resultados e Discussão

5.1 Densidade

Conforme o procedimento anteriormente explanado, obteve-se os seguintes resultados para a densidade do polietileno rotomoldado:

Tabela 10 - Resultados da medição de densidade indireta.

Amostra	1	2
Volume da proveta	30 ml	
Peso da amostra	1,6993 g	1,6993 g
Peso da proveta	19,4651 g	19,4651 g
Peso da Proveta + Álcool:	43,5517 g	43,5517 g
Proveta + Álcool + Amostra:	45,2501 g	45,2501 g
Densidade do líquido:	0,802886667 g/ml	0,802886667 g/ml
Densidade da amostra:	0,803312125 g/cm ³	0,803312125 g/cm ³
Densidade média	0,8033 g/cm³	

É observado que o polietileno rotomoldado obteve densidade inferior ao menor valor considerado na literatura, o polietileno linear de baixa densidade, que possui densidade de 0,9 g/cm³ (Canevarolo Jr.,2006). É sabido que a densidade do polietileno está diretamente associada com seu grau de cristalinidade, pois quanto maior for o grau de cristalinidade da estrutura maior será a região organizada com menor quantidade de vazios e maior concentração de moléculas, ou seja, maior densidade. Logo, faz-se necessária a averiguação deste parâmetro, que ocorrerá através do ensaio de calorimetria diferencial de varredura, apresentado adiante. É constatado no material alta porosidade, então, a baixa densidade do polietileno rotomoldado pode ser atribuída ao processo de rotomoldagem, que resultou em elevada porosidade no material.

É preciso atentar-se aos parâmetros do processo de rotomoldagem, pois o aprisionamento de bolhas de ar no material, que geram os poros, pode ser resultado de um baixo tempo de fusão e coalescência ou resfriamento rápido, ambos não havendo tempo suficiente para o ar difundir-se entre o molde e a camada polimérica.

5.2 Ensaio de Tração

O resultado do ensaio de tração é expresso, em valores, na Tabela 11 e apresentado nos gráficos a seguir, onde “DP” significa desvio padrão.

Tabela 11 - Resultado do ensaio de tração.

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

Figura 42 - Gráfico Tensão x Deformação CP 01.

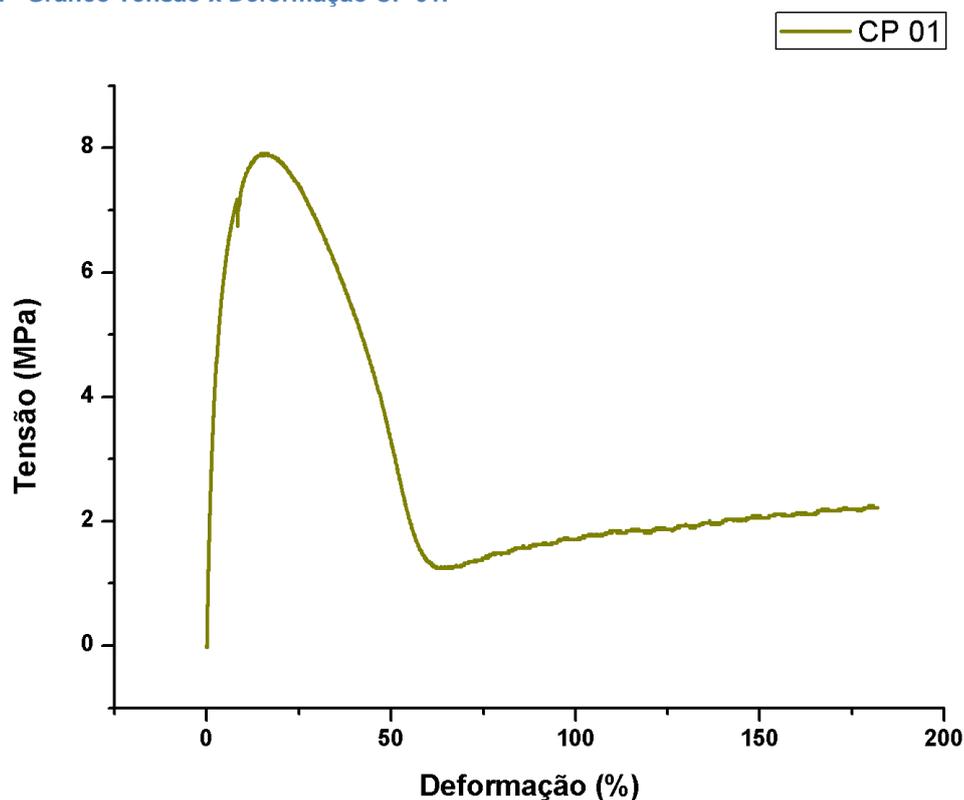


Figura 43 - Gráfico Tensão x Deformação CP 02.

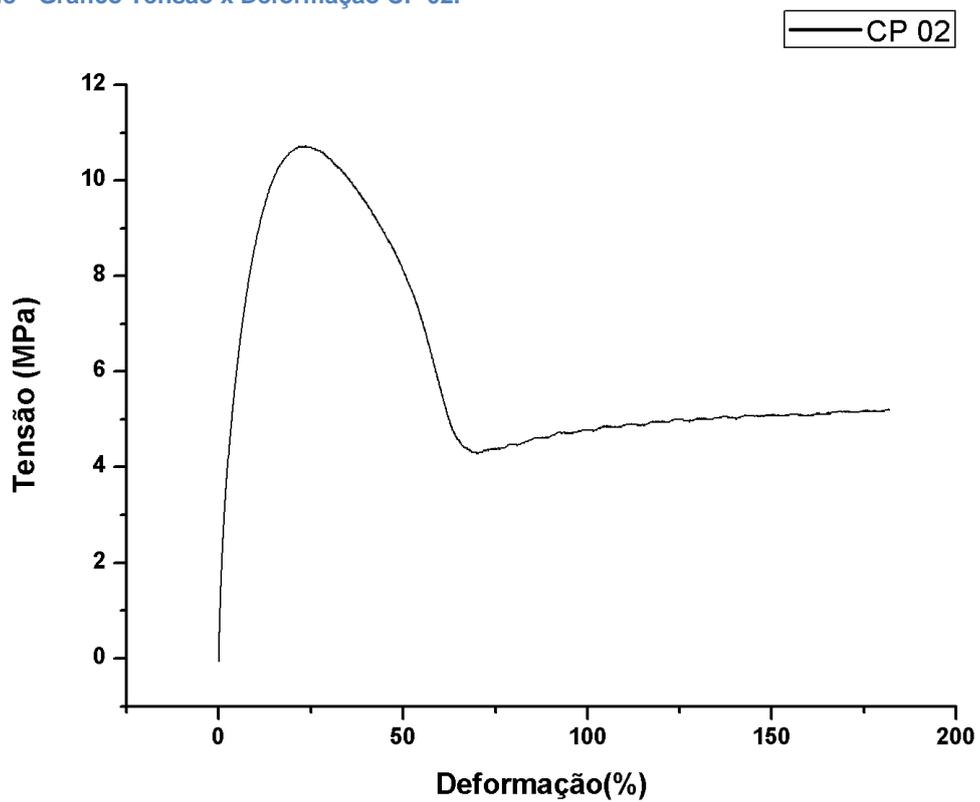


Figura 44 - Gráfico Tensão x Deformação CP 03.

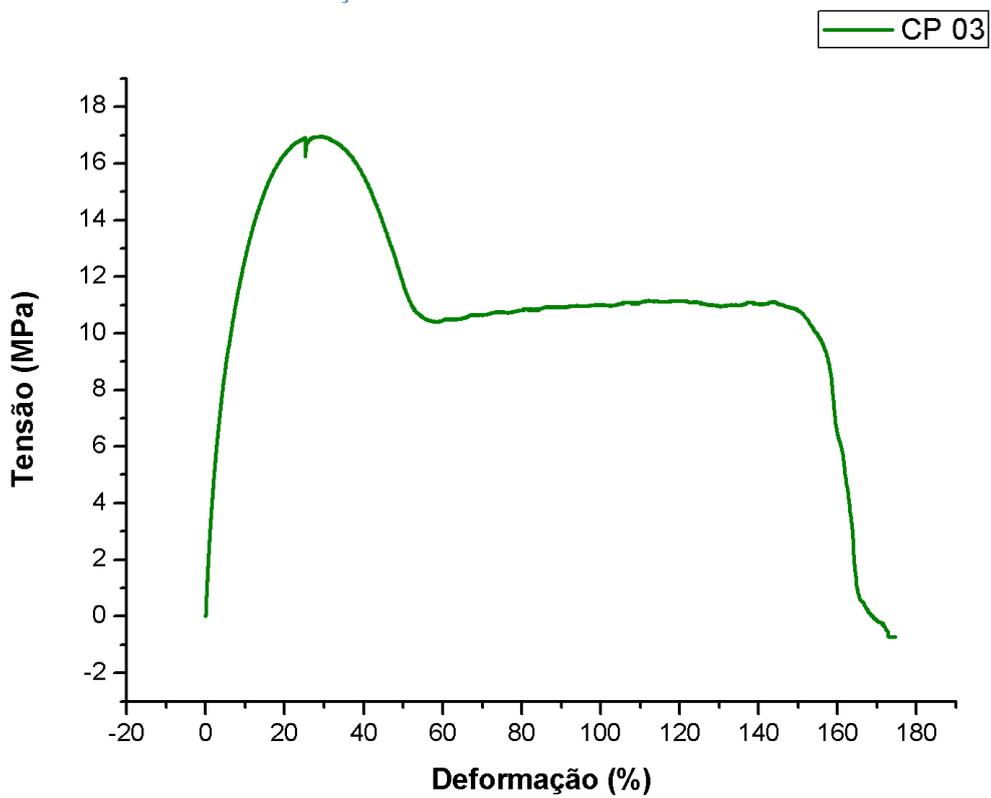


Figura 45 - Gráfico Tensão x Deformação CP 04.

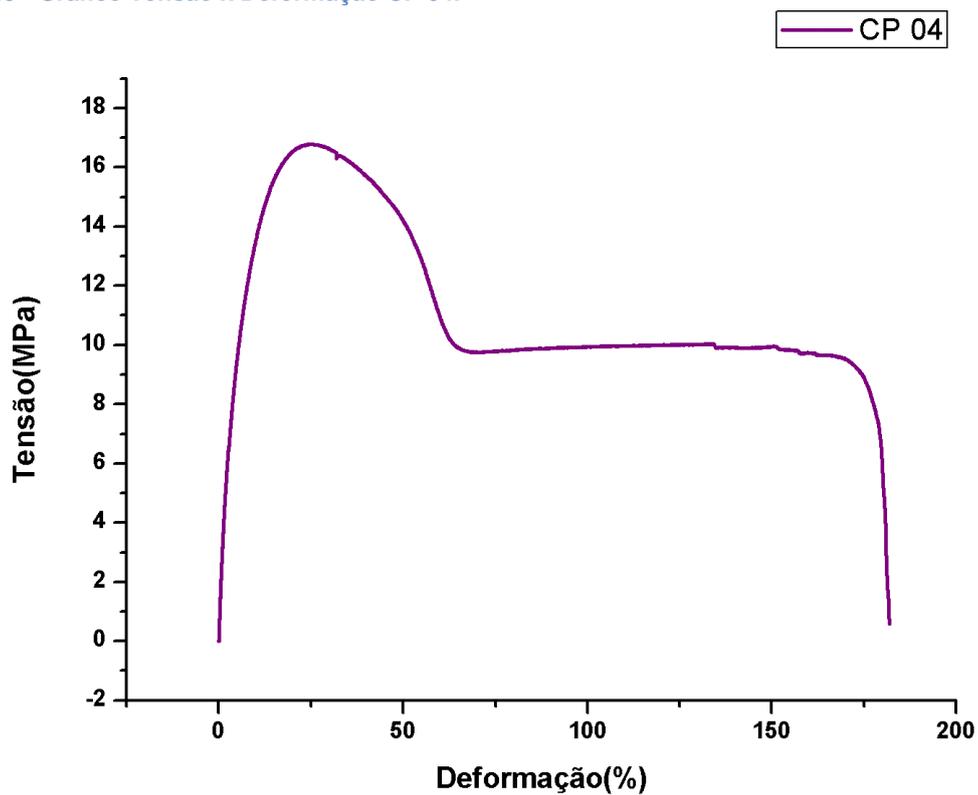
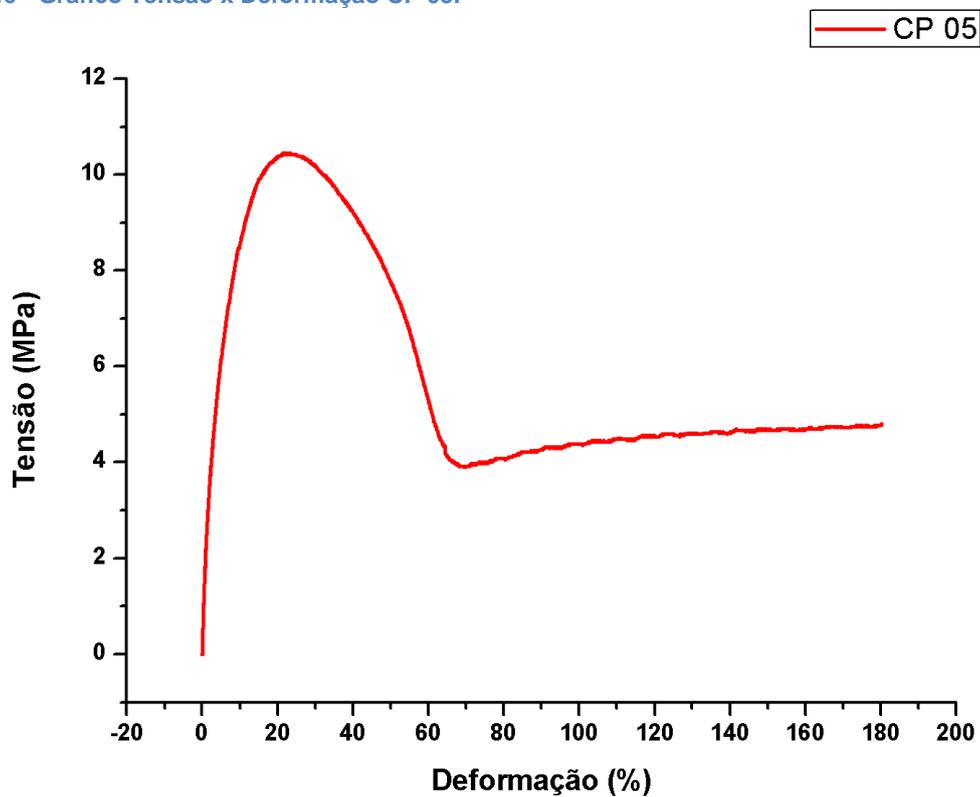


Figura 46 - Gráfico Tensão x Deformação CP 05.



Baseado na norma ASTM D-638, todos ensaios foram considerados válidos. É observado que material não apresentou grande reprodutibilidade no ensaio de tração. Um motivo para o fato é a não uniformidade das amostras que foram confeccionadas a partir do próprio PV e usinadas em torno CNC, porém sem alteração na espessura das amostras, que variavam em poucos milímetros. Outra explicação está ligada a alta porosidade do material, que funciona como concentrador de tensão e agente nucleante para início e propagação de trincas.

5.3 Análise Térmica

Os gráficos obtidos a partir das análises térmicas de termogravimetria e calorimetria diferencial de varredura são apresentados nas Figura 47 e 48 e as principais informações estão presentes na Tabela 12.

O percentual de cristalinidade (X_c) da amostra foi calculado relacionando-se a entalpia por unidade de massa da amostra com a de um polietileno padrão 100% cristalino conforme a equação $X_c = (\Delta H_f / \Delta H_f^0) \cdot 100$, onde ΔH_f é a entalpia de fusão da amostra e ΔH_f^0 é a entalpia do polietileno 100% cristalino que é convencionado com o valor de 290J/g. (Canevarolo Jr., 2006)

Figura 47 - Resultado da termogravimetria.

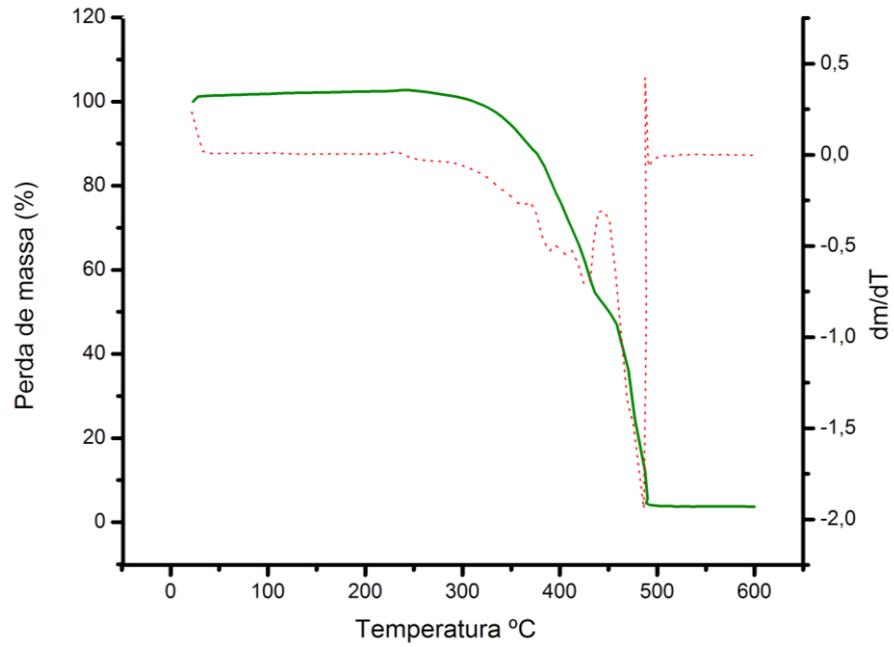


Figura 48 - Resultado da calorimetria diferencial de varredura.

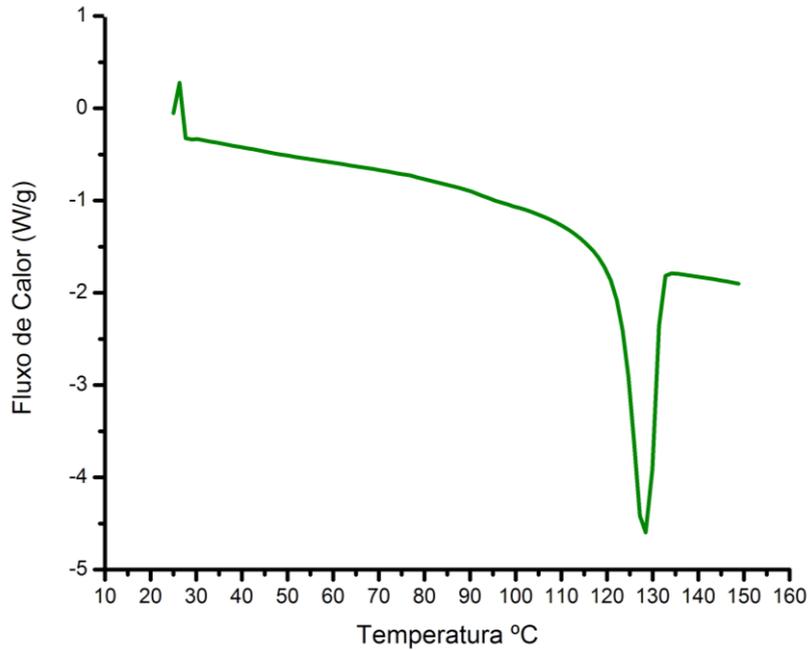


Tabela 12 - Resultado da análise térmica.

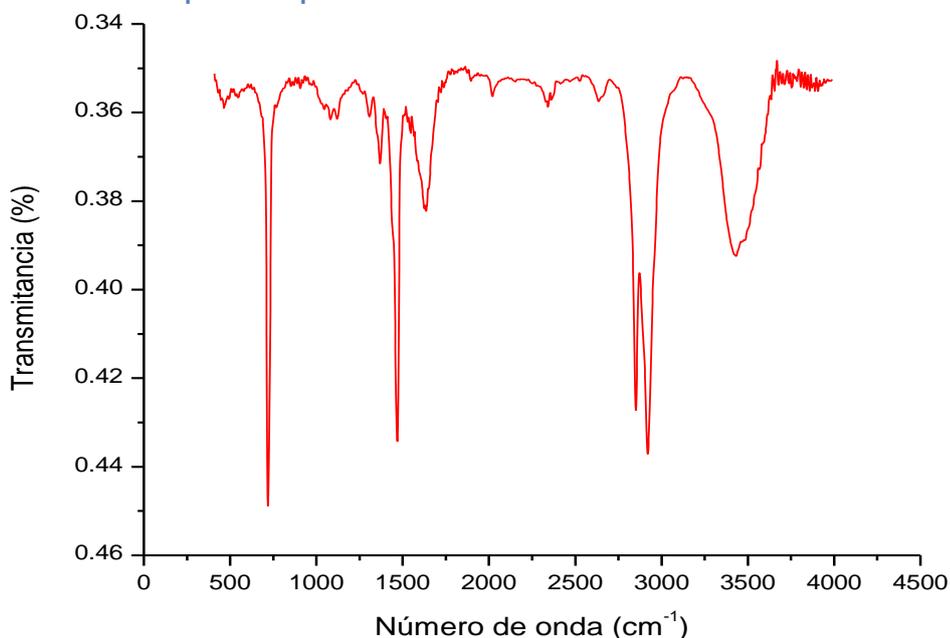
	T. Fusão (°C)	Entalpia (J/g)	Cristalinidade (%)	T. degradação (°C)	T. Crítica (°C)
PE	128	153,9	53	320	487

O resultado da análise termogravimétrica nos revela a temperatura de início de perda de massa e a temperatura crítica na qual o polímero é completamente desintegrado. Os valores estão de acordo com a literatura, atribui-se ao fato do ensaio levar em conta apenas a massa da amostra. Já o resultado da calorimetria diferencial de varredura nos apresenta a temperatura e entalpia de fusão do material e sua cristalinidade. Pode-se observar que a cristalinidade está ligeiramente abaixo da cristalinidade referenciada para o polietileno de média densidade, que é de 55% a 75%, que está atribuída novamente à alta porosidade do material, pois os vazios diminuem o nível de organização molecular do polietileno, que reflete diretamente na entalpia de fusão do material. A temperatura de fusão encontra-se dentro do apresentado na literatura (Canevarolo Jr.,2006).

5.4 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier

O gráfico gerado pelo ensaio de FTIR é apresentado a seguir pela Figura 49.

Figura 49 - Resultado da espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier.



Os espectros atribuídos aos picos são respectivamente de valência ou “*stretching*” atribuídos ao número de onda entre 2950 e 2850 cm⁻¹, pêndulo ou “*bending*” atribuídos ao número de onda entre 1350 e 1450 cm⁻¹ e torção ou

“rocking”, que tem um número de onda aproximado de 700 cm^{-1} , o pico que vai de aproximadamente 3330 a 3600 corresponde à hidroxila e álcool.

Durante o processo de rotomoldagem, para que ocorra a coalescência e a densificação do material, o mesmo é submetido a altas temperaturas durante longos períodos de tempo. Esta exposição à alta temperatura, juntamente com a presença de oxigênio dentro da cavidade do molde, resulta na degradação da camada de material na superfície interna da peça moldada. A camada degradada resultante é responsável pela deterioração das propriedades mecânicas da peça, juntamente com a presença de bolhas, o que explica a presença de oxigênio no material.

5.5 Emissão Acústica

O ensaio de emissão acústica destinado a constatar a velocidade de propagação do material foi realizado para distâncias de 12,5cm e 17,5cm. Os resultados obtidos foram praticamente iguais, garantindo assim a fixação do valor da velocidade de propagação do material apresentado e também foi calculado o coeficiente de atenuação do sinal pela simples diferença entre as amplitudes coletadas divididas pela distância. Os resultados estão expressos na Tabela 13, onde V = velocidade (m/s) e A = atenuação (dB/cm). Verifica-se que o coeficiente de atenuação do polietileno rotomoldado não se comporta de maneira linear, sabendo que este é dividido em duas parcelas espalhamento e absorção.

Tabela 13 - Resultado do ensaio de velocidade de propagação.

Distância	CP 1		CP 2		CP 3		CP 4		CP 5		MÉDIA	
	V	A	V	A	V	A	V	A	V	A	V	A
12,5 cm	1090	2,3	1095	2,4	1089	2,3	1101	2,5	1109	2,4	1097	2,4
17,5 cm	1103	1,7	1101	1,6	1100	1,6	1093	1,7	1093	1,8	1098	1,7

Durante o ensaio de tração foi realizado simultaneamente o ensaio de emissão acústica em três dos cinco corpos de prova com resultado válido. Os resultados, referente ao corpo de prova cinco, são apresentados abaixo (Figuras 50 a 56) e discutidos a seguir.

Figura 50 - Resultado de EA durante tração CP 05, tela 1.

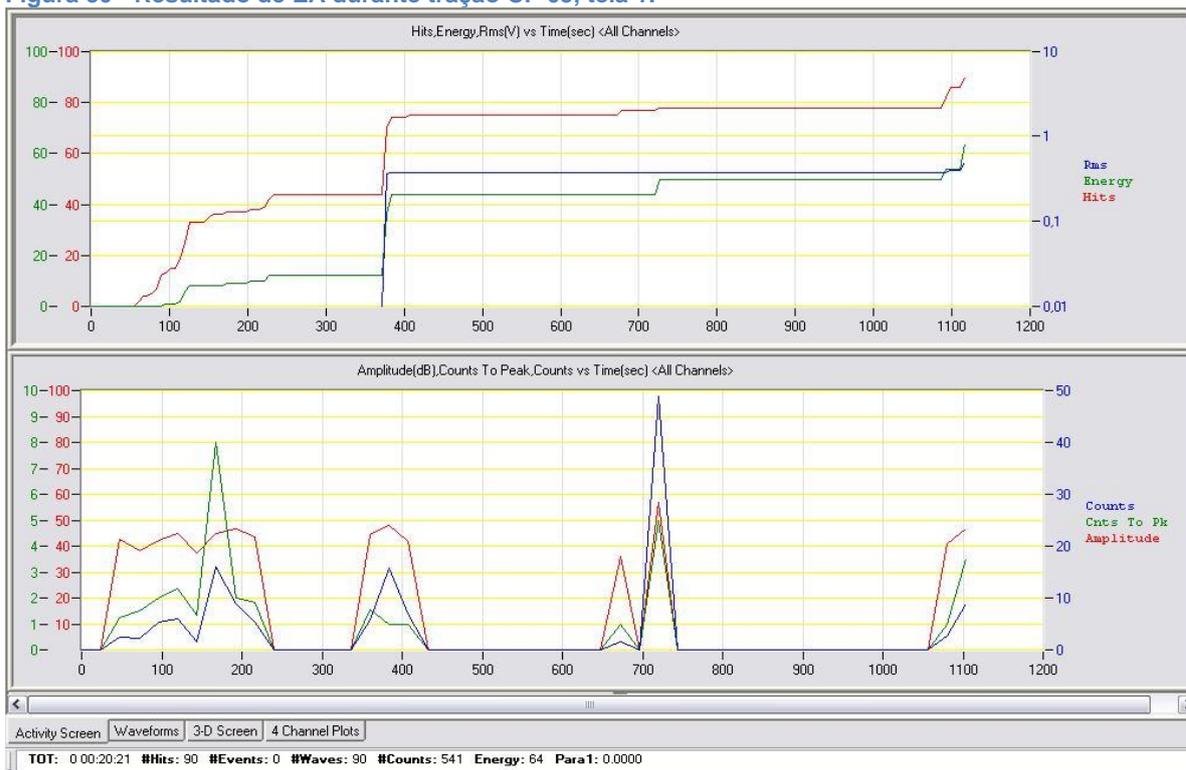


Figura 51 - Resultado de EA durante tração CP 05, tela 2.

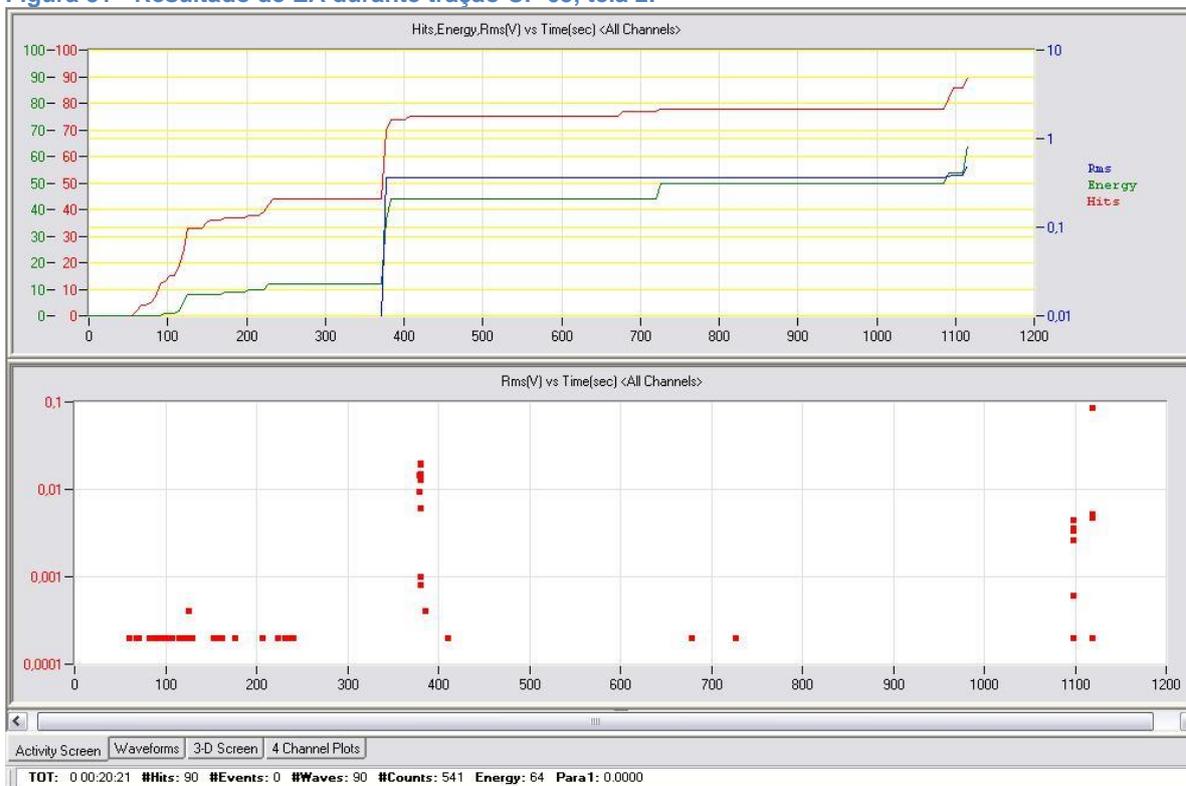


Figura 52 - Resultado de EA durante tração CP 05, tela 3.

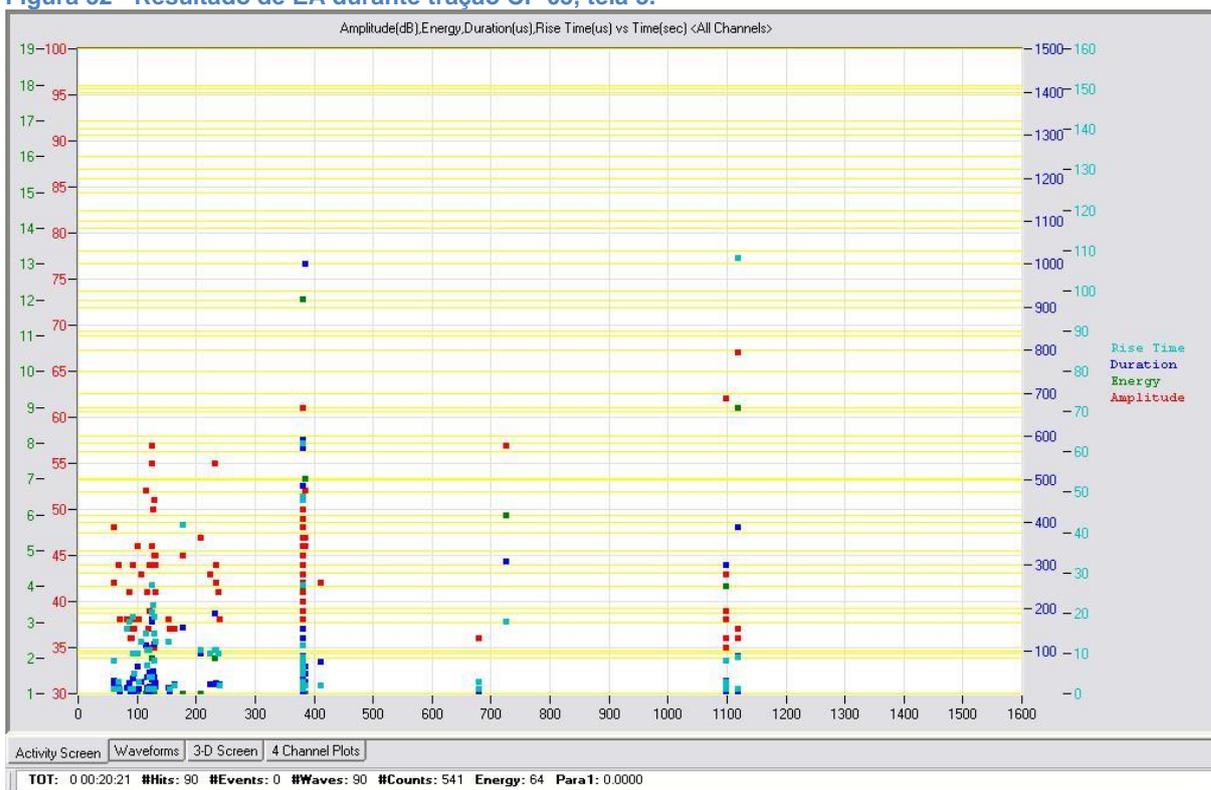


Figura 53 - Resultado de EA durante tração CP 05, tela 4.

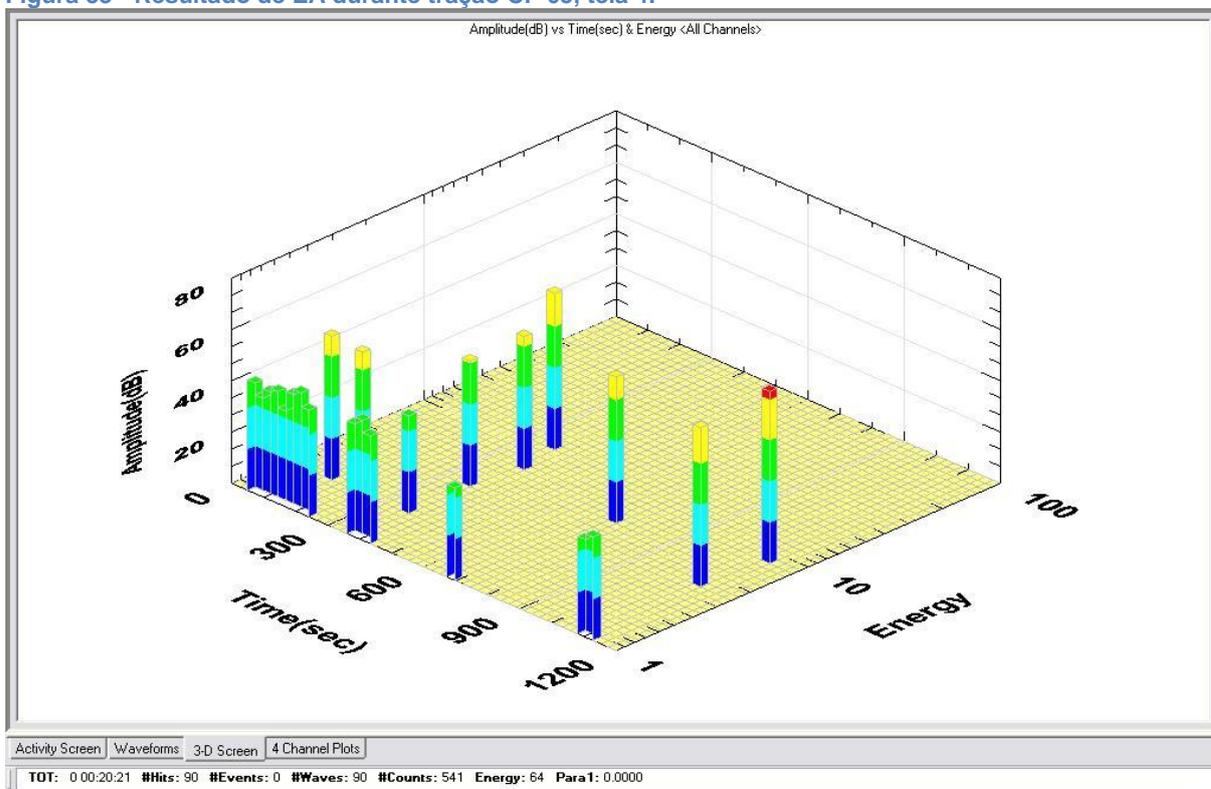


Figura 54 - Resultado de EA durante tração CP 05, tela 5.

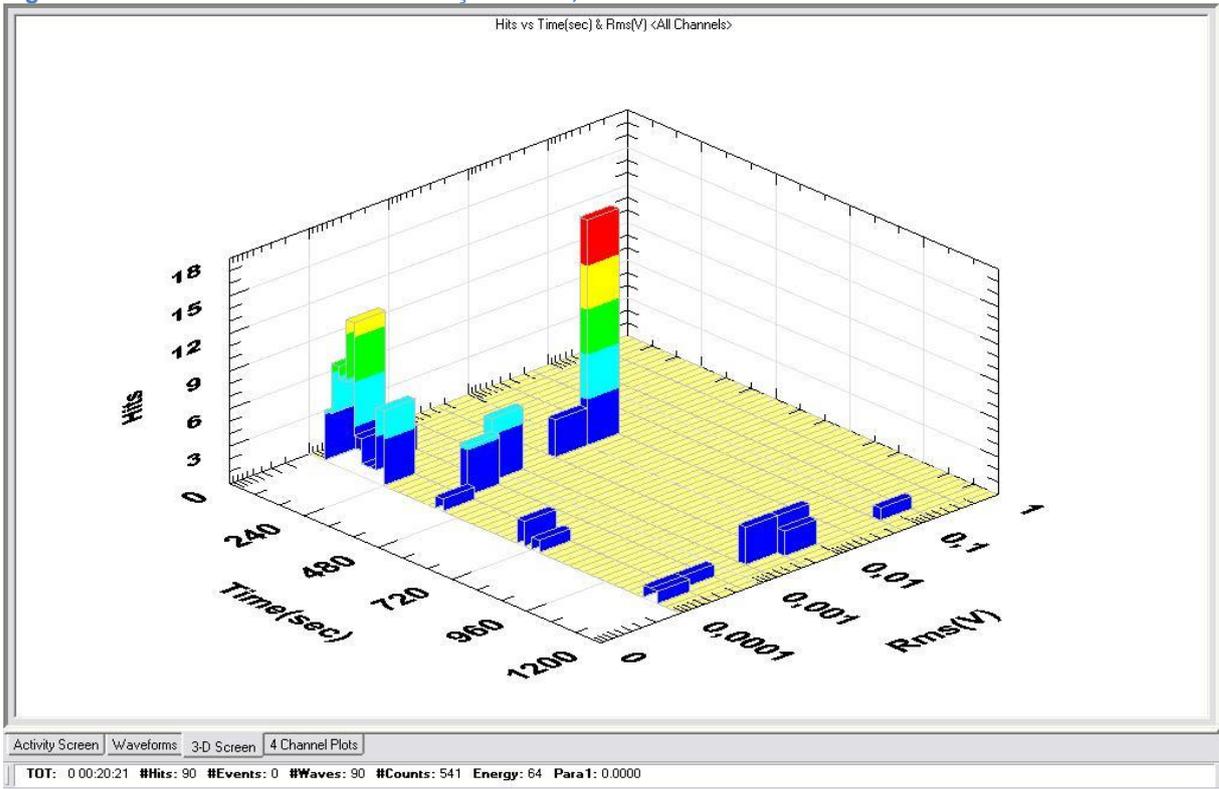


Figura 55 - Resultado de EA durante tração CP 05, tela 6.

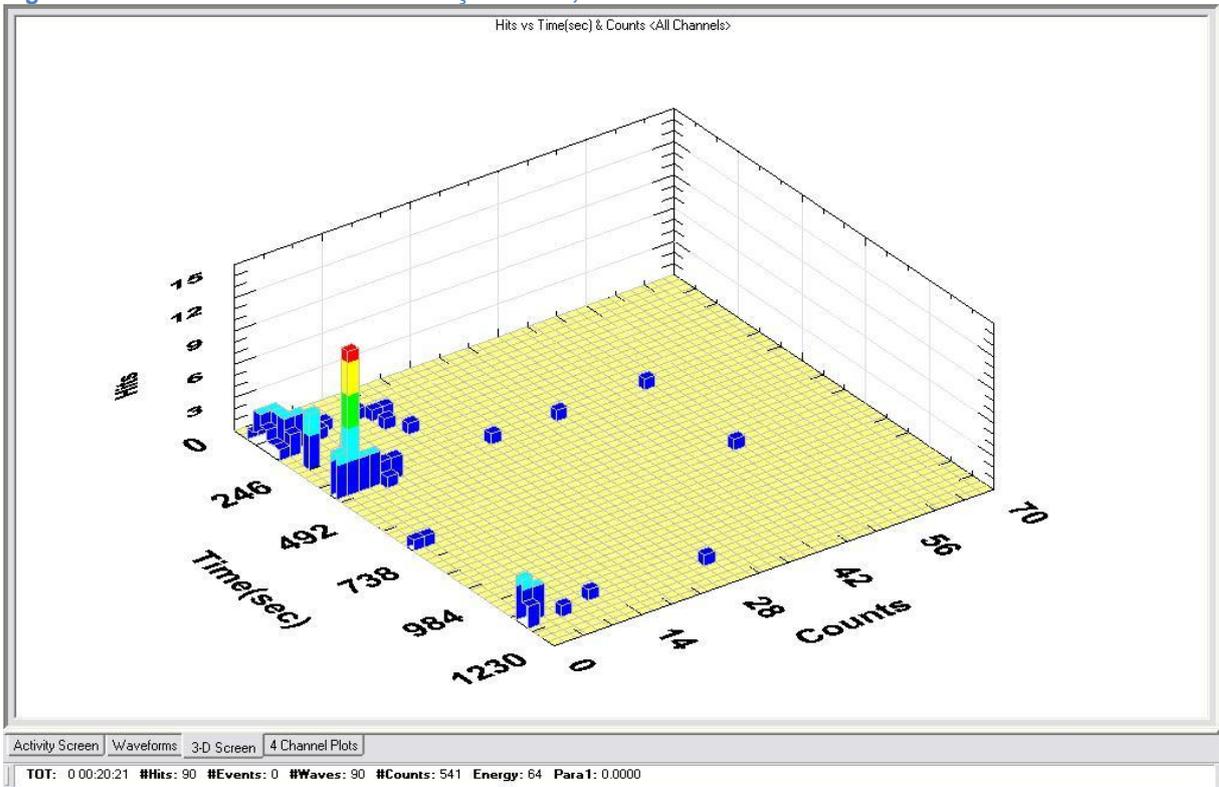
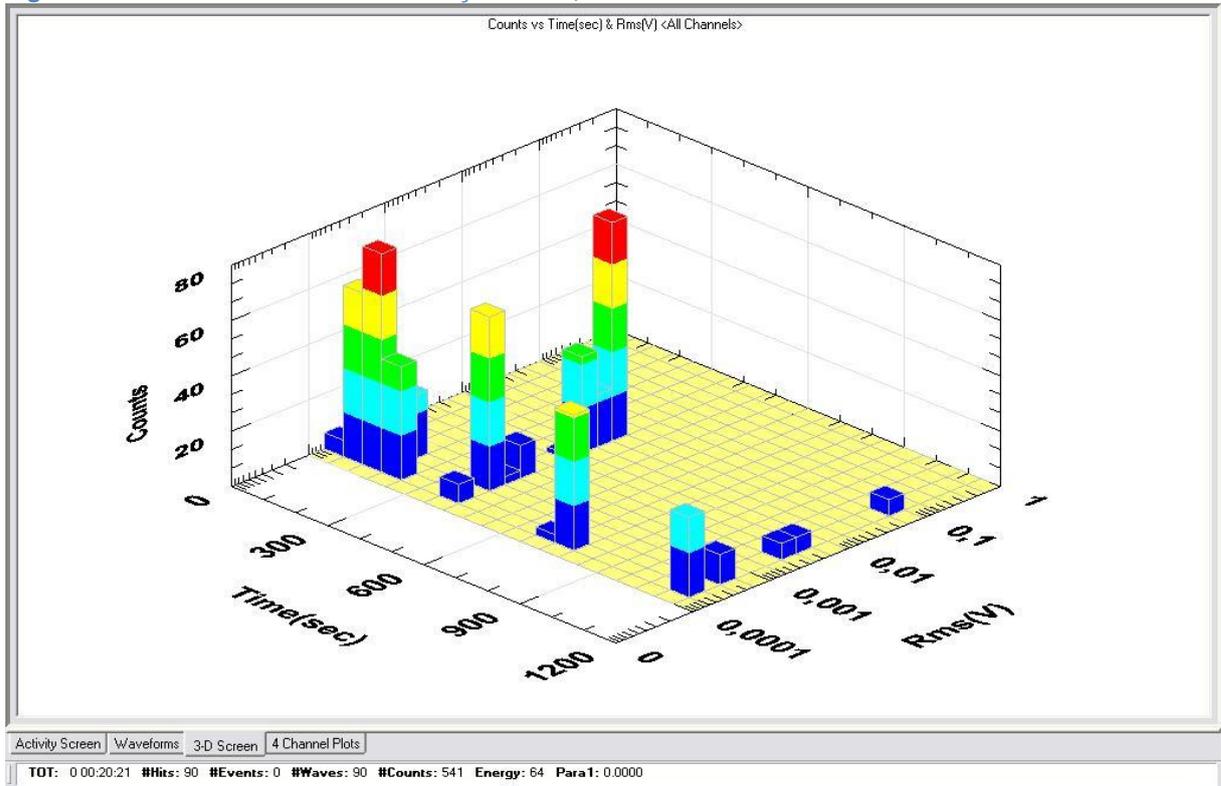
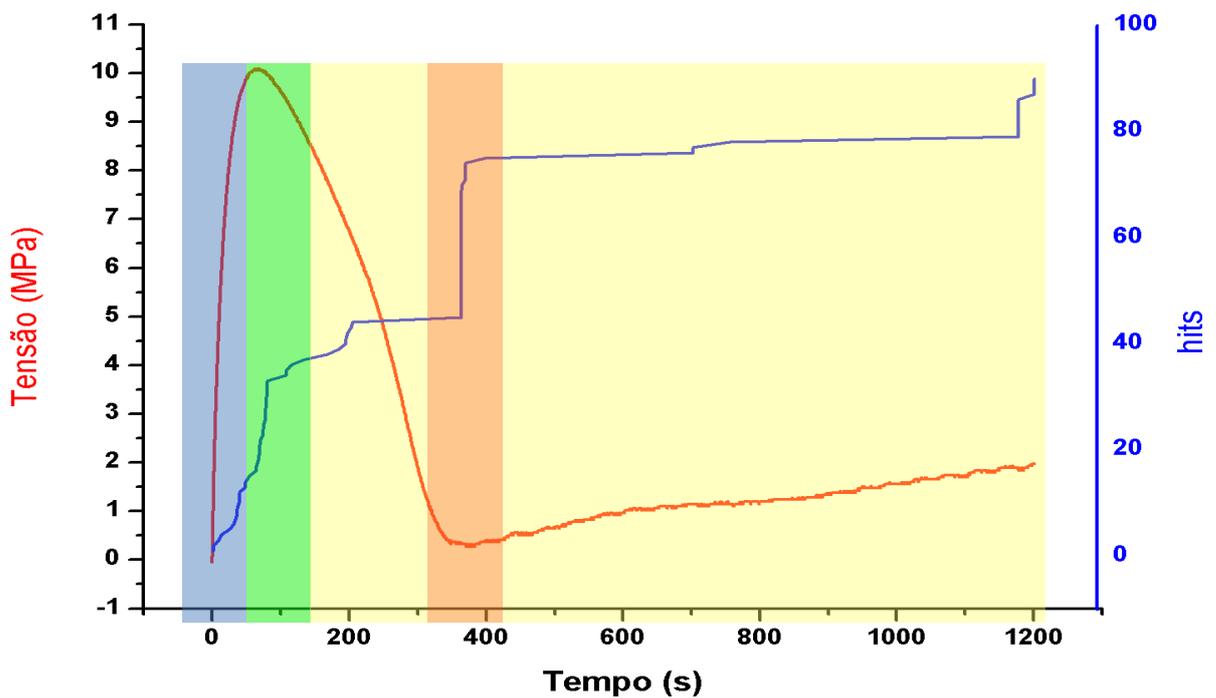


Figura 56 - Resultado de EA durante tração CP 05, tela 7.



Para melhor embasamento da discussão, faz-se necessário apresentar um gráfico no qual é plotado o número sinais de emissão acústica (ou hits) juntamente com a tensão, ambos em função do tempo (Figura 57).

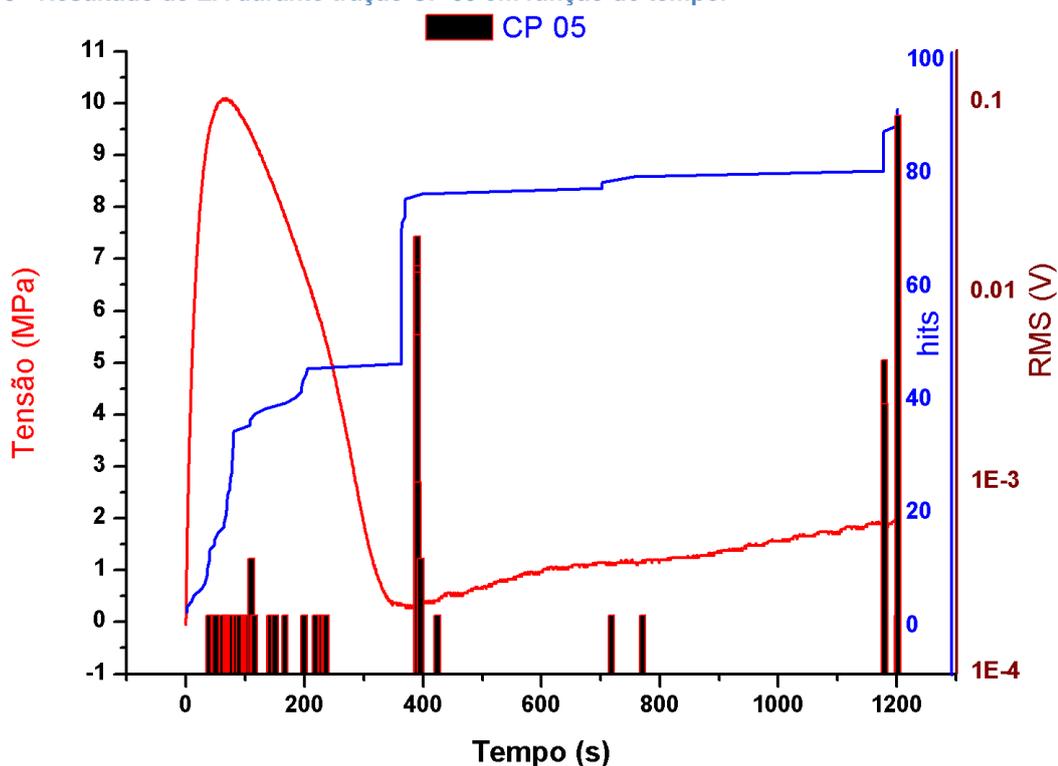
Figura 57 - Hits e Tensão em função do tempo, CP 05.



É observado um baixo número de hits ou baixa atividade acústica durante a fase de deformação elástica (região azul da figura 57), ocorrendo mudança significativa na região de escoamento (região verde da Figura 57). A baixa atividade acústica na fase de deformação elástica pode ser explicada por analogia ao próprio regime de deformação em questão, conforme a carga é aplicada o material absorve energia em forma de tensão deformando-se elasticamente para balancear sua energia, como os sinais de emissão acústica são provenientes da liberação de energia, é compreensível a baixa atividade acústica do material durante o regime de deformação elástica, sendo os sinais captados atribuídos ao provável atrito entre as cadeias poliméricas amorfas durante processo de alinhamento, característico do regime de deformação elástica em polímeros semicristalinos. Na região de escoamento ocorre a transição dos regimes de deformação, onde as primeiras cadeias poliméricas amorfas atingem sua saturação de energia acumulada em forma de tensão e buscam uma alternativa para dissipar energia ou adquirir capacidade de absorver mais energia, esta alternativa é a deformação plástica (região rosa claro da Figura 57). Esse rearranjo da estrutura libera energia e, portanto, pode-se constatar a alta da atividade acústica do material na região de escoamento. A atividade acústica decai, juntamente com a tensão, de acordo com o número de cadeias a serem deformadas, até o ponto em que a porção amorfa do material está completamente deformada plasticamente e então tem-se início à deformação da porção cristalina do material (região rosa escuro da Figura 57), acompanhada por novo pico de atividade acústica devido a deformação dos cristais.

Além da atividade acústica os sinais provenientes de cada região, os sinais gerados também sofrem alterações, como pode-se observar nas figuras anteriores, havendo comportamento similar de aumento da energia, duração, tempo de subida e RMS, por exemplo. A figura 58, a seguir, ilustra a evolução do RMS durante o ensaio.

Figura 58 - Resultado de EA durante tração CP 05 em função do tempo.



Para melhor caracterização dos sinais gerados em cada região foi utilizada, inicialmente, a análise de Fourier, que é um bom indicador, porém como trata-se de sinais não estacionários uma solução mais apropriada é a análise de Ondaletas.

Inicialmente foi utilizado o software da Physical Acoustic Corporation (PAC), Wavelet™, para análise dos sinais. Entretanto, para melhor extração das características do sinal foi realizada uma rotina no software Matlab™, versão 14. Primeiramente foi observado pelo software da PAC a melhor representação do sinal de cada região por uma ondaleta particular, no caso ondaletas de Daubechies grau seis e dezesseis (db6 e db16). No Matlab™ foi constatado a energia dos coeficientes e o erro referente a representação de cada nível em função da ondaleta, assim como a variação do erro de acordo com o nível de decomposição associado para sinais da região elástica e plástica. As tabelas a seguir expressam os resultados obtidos e as figuras ilustram graficamente os resultados, onde “Sinal 1” refere-se ao sinal proveniente da região elástica e “Sinal 2” refere-se ao sinal proveniente da região plástica. Observou-se que para sinais provenientes da região elástica os coeficientes de “detalhe” tinham magnitude relevante até o nível três, enquanto que para os sinais provenientes da região plástica os coeficientes de

“detalhe” tinham magnitude relevante até o nível quatro. Observou-se também que o nível de decomposição não interferia de forma significativa na magnitude dos coeficientes. Então comparou-se o erro e reconstruiu-se as ondaletas associadas respectivamente, onde o sinal original está em azul e a reconstrução em vermelho (Figuras 59 a 65).

Tabela 14 - Energia dos coeficientes de ondaleta do sinal da região elástica.

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

Tabela 15 - Erro associado ao sinal referente a região elástica.

Sinal 1	ERRO		
Nível	J9 – db16	J5 – db16	J5 – db6
1º	3,8236e-14	3,8235e-14	1,575e-13
2º	0,018809	0,018809	0,018578
3º	0,046811	0,046811	0,044735

Tabela 16 - Energia dos coeficientes de ondaleta do sinal da região plástica.

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

Tabela 17 - Erro associado ao sinal referente a região plástica.

Sinal 2		ERRO		
Nível	J9 – db16	J5 – db16	J5 – db6	
1º	5,1995e-13	5,1996e-13	1,4909e-12	
2º	0,11942	0,11942	0,11369	
3º	0,22139	0,22139	0,22716	
4º	0,43129	0,43129	0,4513	

Figura 59 - Comparação das reconstruções a partir do 1º nível com o sinal da região elástica.

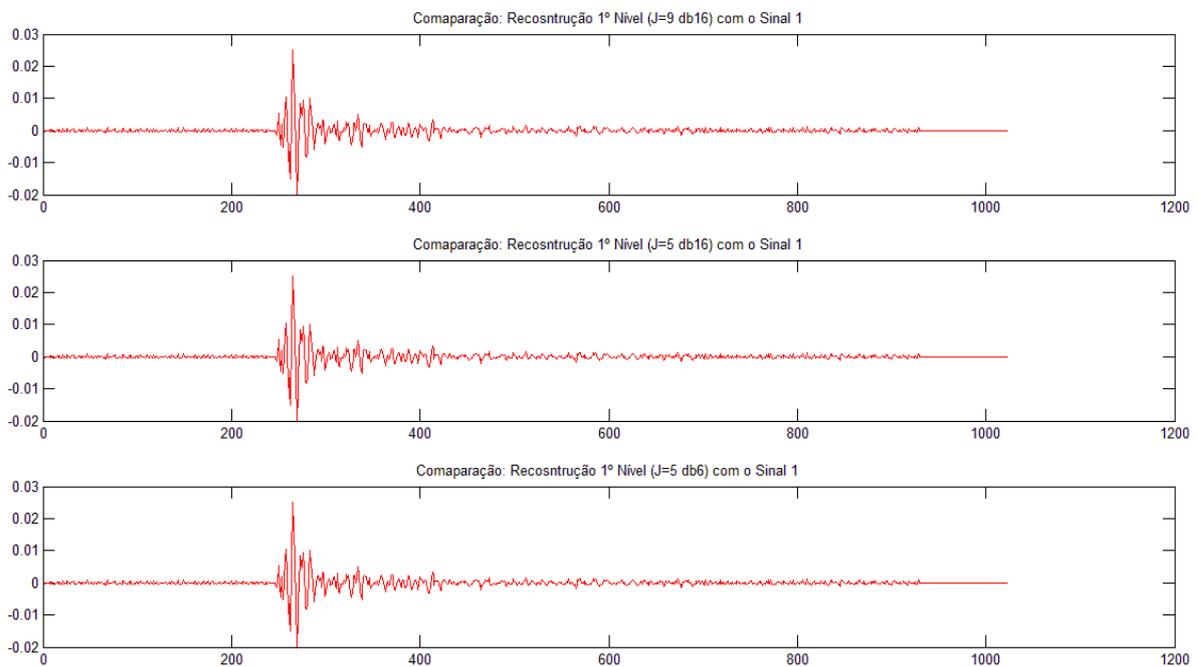


Figura 60 - Comparação das reconstruções a partir do 2º nível com o sinal da região elástica.

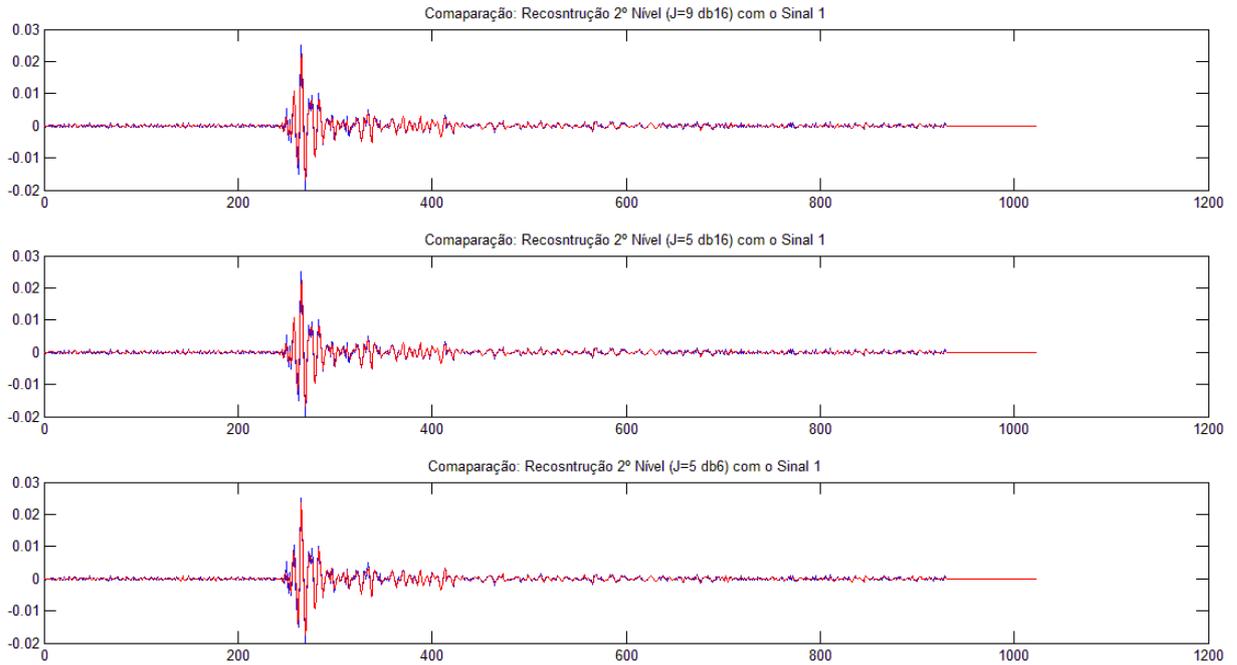


Figura 61 - Comparação das reconstruções a partir do 3º nível com o sinal da região elástica.

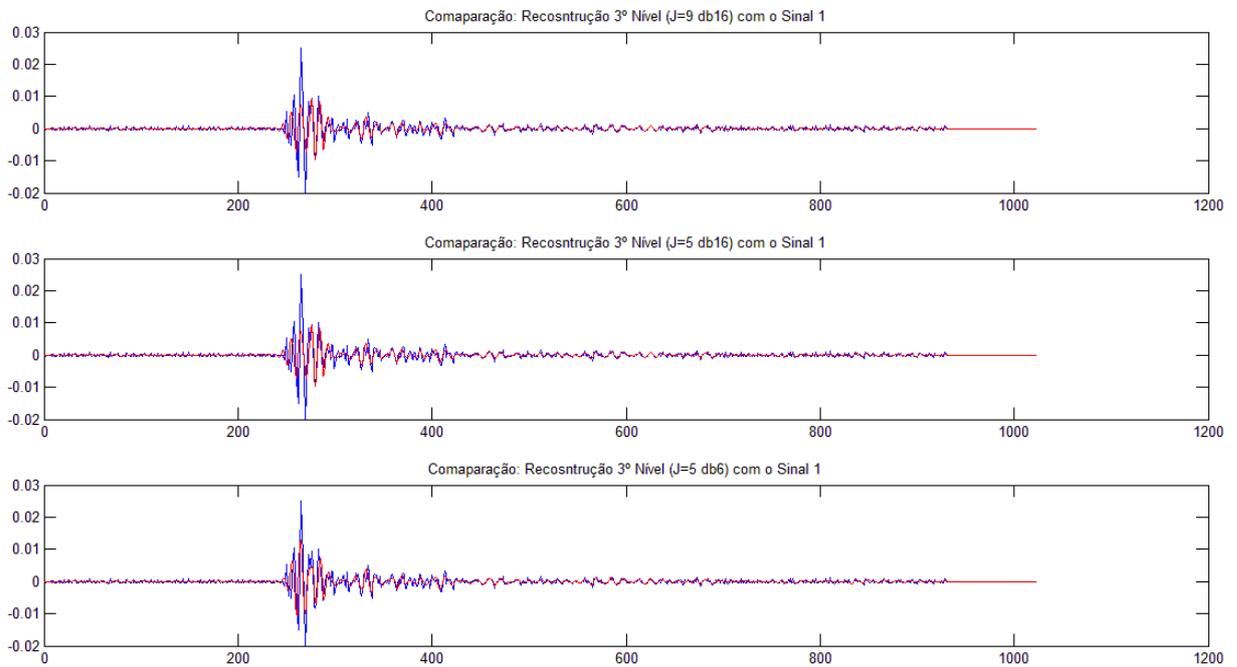


Figura 62 - Comparação das reconstruções a partir do 1º nível com o sinal da região plástica.

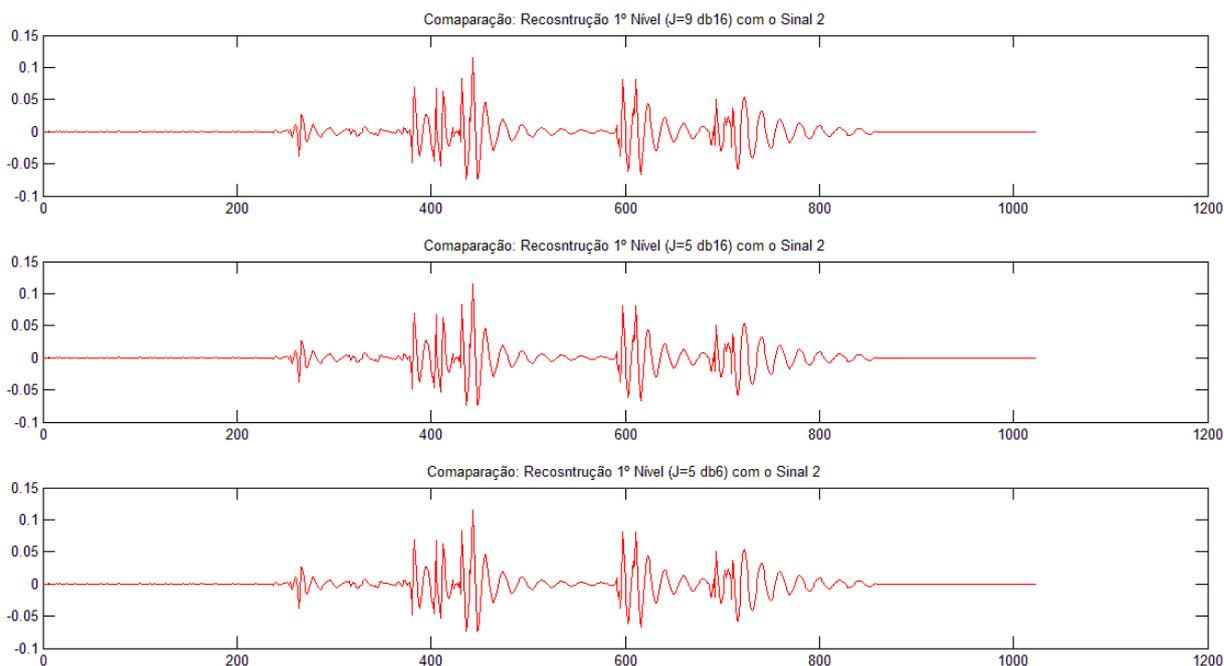


Figura 63- Comparação das reconstruções a partir do 2º nível com o sinal da região plástica.

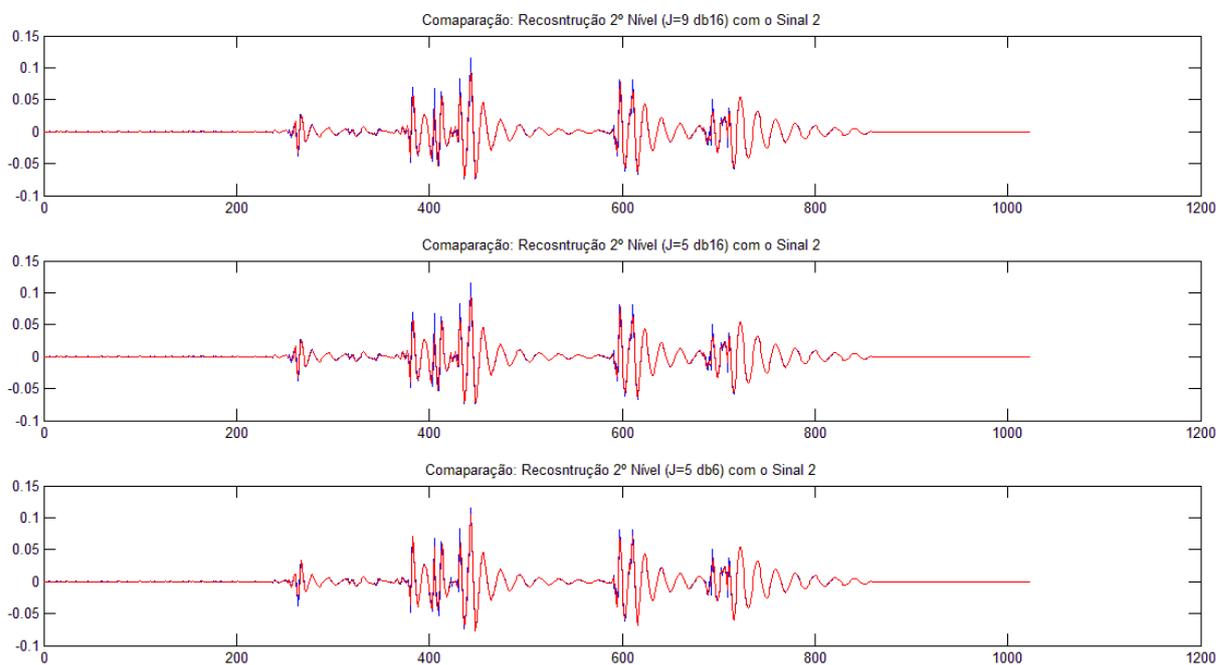


Figura 64- Comparação das reconstruções a partir do 3º nível com o sinal da região plástica.

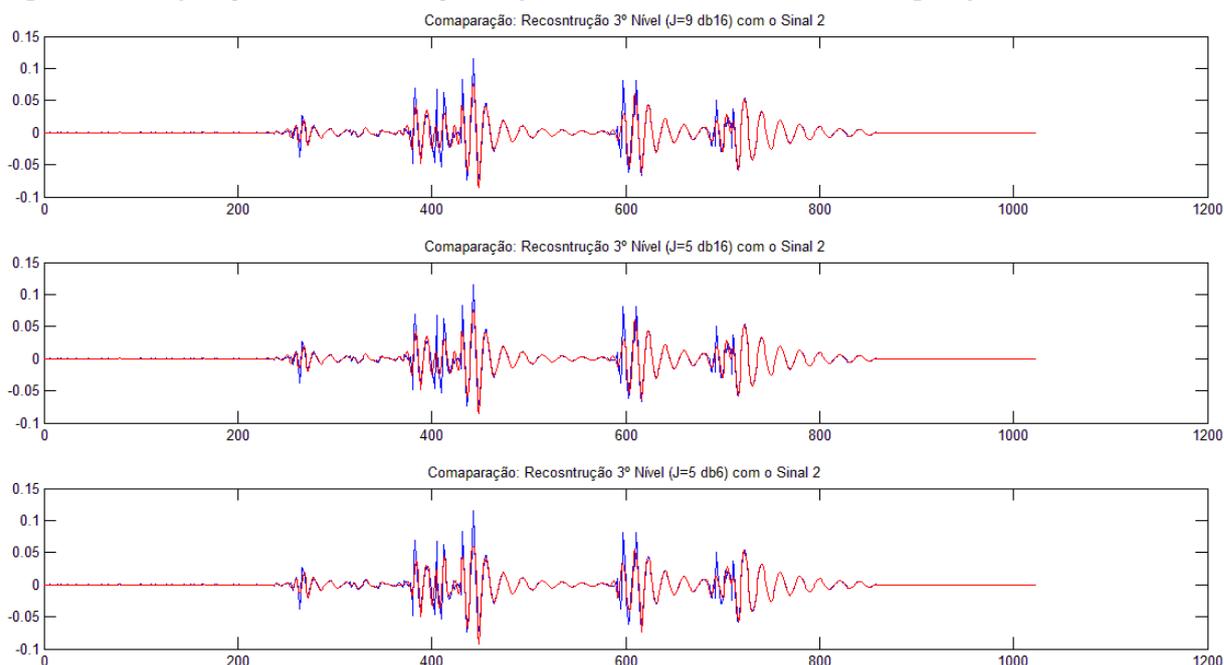
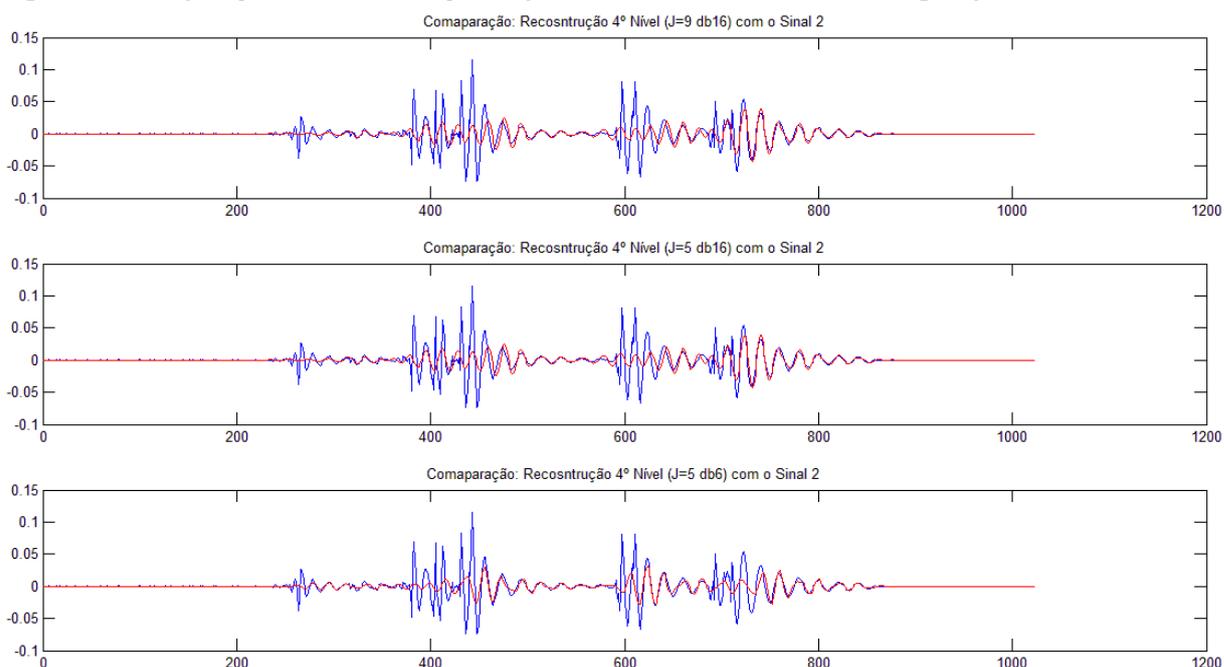


Figura 65 - Comparação das reconstruções a partir do 4º nível com o sinal da região plástica.



Após observar os resultados constatou-se que os sinais provenientes da região elástica são melhor representado pela ondaleta de Daubechies de grau seis e que os sinais provenientes da região plástica são melhor representado pela ondaleta de Daubechies de grau dezesseis, pois a energia dos coeficientes de ondaletas é melhor distribuída entre os níveis de detalhamento e o erro associado as reconstruções com os maiores níveis (ou seja, usando um menor número de pontos para representação do sinal) é menor, para cada caso respectivamente. A

reconstrução, usando um menor número de pontos e com baixo erro associado (menor que 5%), é de fato desejável, pois permite maior velocidade na transmissão e análise dos dados, resultando em uma maior eficiência e otimizando o desempenho do equipamento utilizando para armazenar e analisar os dados. Como há maior interesse em caracterizar sinais provenientes da região plástica optou-se por utilizar cinco níveis de decomposição e a ondaleta de Daubechies de grau dezesseis (db16). Visto que o nível de decomposição não influenciou significativamente a magnitude dos coeficientes e nem os erros associados.

Dando continuidade, aplicou-se a transformada de Fourier nos sinais para observar as frequências relevantes e poder compará-las as pseudo-frequências das ondaletas. Além disso, foi aplicada a transformada de Fourier para cada nível de detalhamento afim de constatar quais informações e suas respectivas frequências eram extraídas do sinal em cada nível decomposição. Os resultados são apresentados nas Figuras 66 a 73 (Figuras 66 a 69, sinal proveniente região elástica e Figuras 70 a 73, sinal proveniente da região plástica), onde a cor azul indica o espectro de frequência do sinal e a cor vermelha a reconstrução da ondaleta ou “detalhes” e nas Figuras 69 e 73, que apresentam os espectrogramas de ondaletas, os termos “Pff” e “PpfW” significam, respectivamente, *Pico de frequência no espectro de Fourier* e *Pico de pseudo-frequência no espectro de Wavelet*.

Figura 66 - Transformada de Fourier sinal da região elástica.

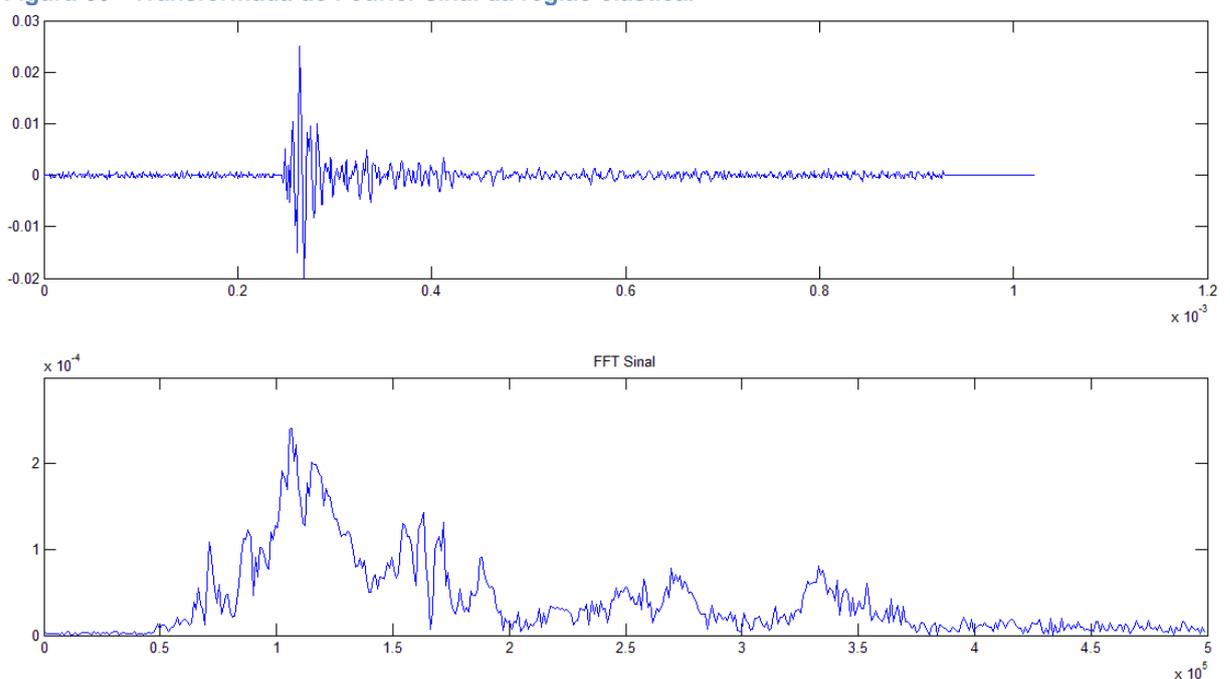


Figura 67 - Transformada de Fourier das Reconstruções do sinal da região elástica.

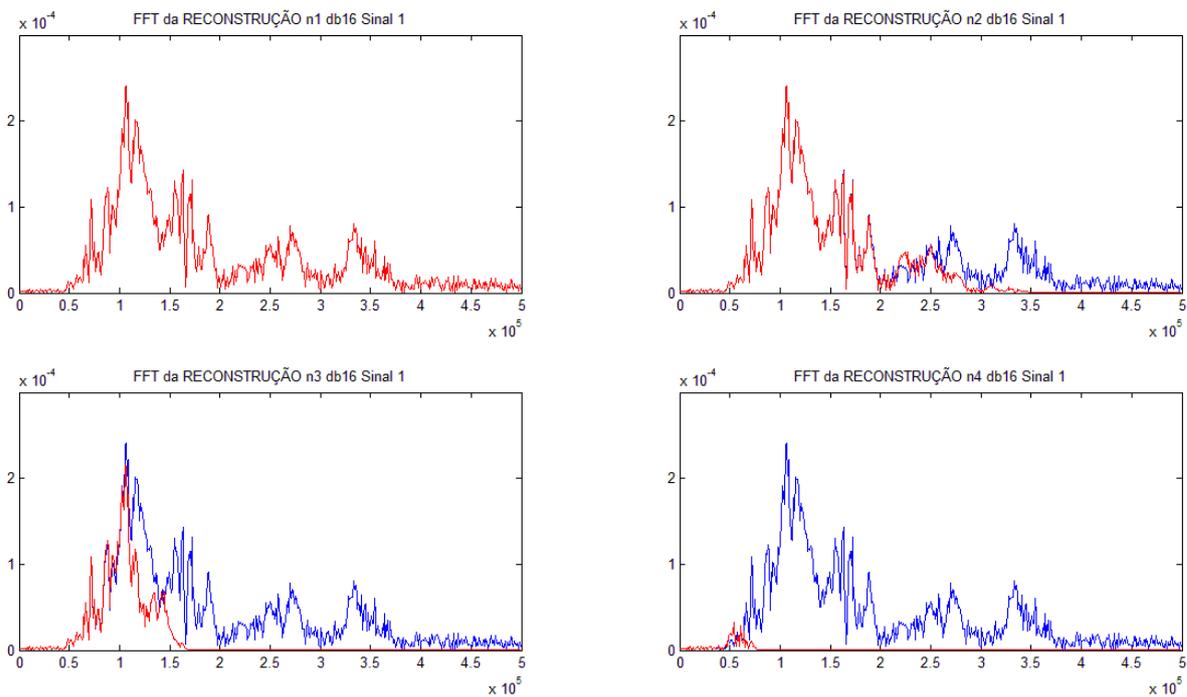


Figura 68 - Transformada de Fourier dos Detalhes do sinal da região elástica.

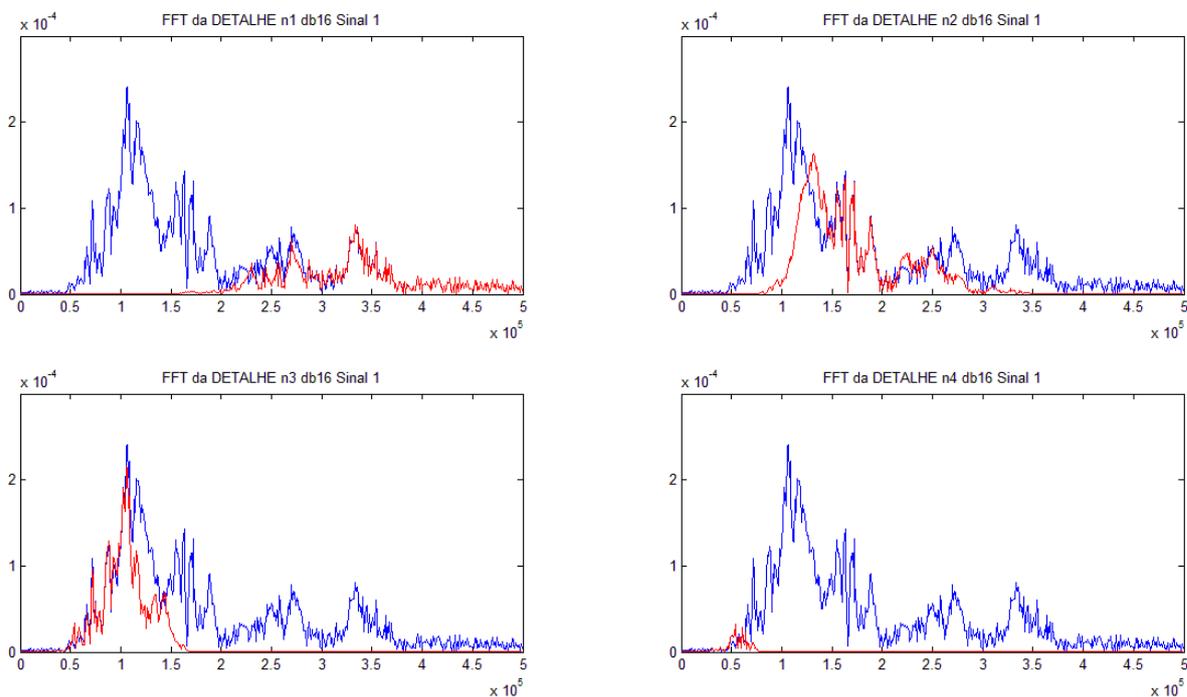


Figura 69 - Espectrograma de ondaletas com comparação de picos de frequência do sinal da região elástica em Hz.

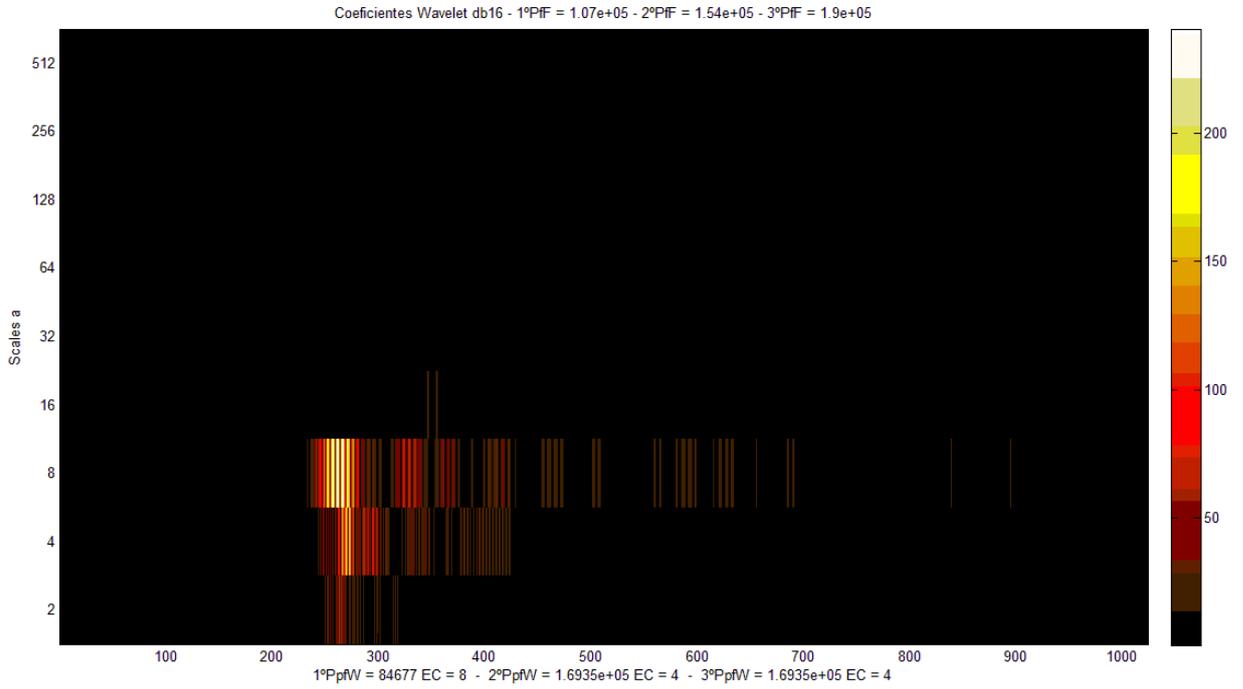


Figura 70 - Transformada de Fourier sinal da região plástica.

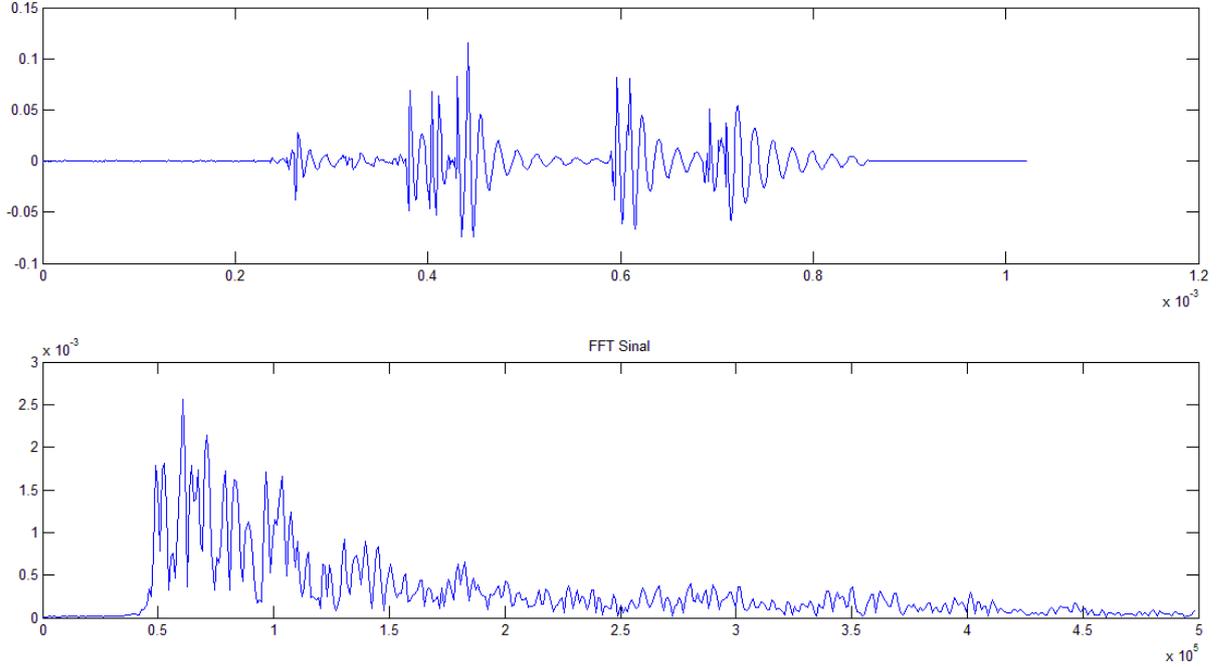


Figura 71 - Transformada de Fourier das Reconstruções do sinal da região plástica.

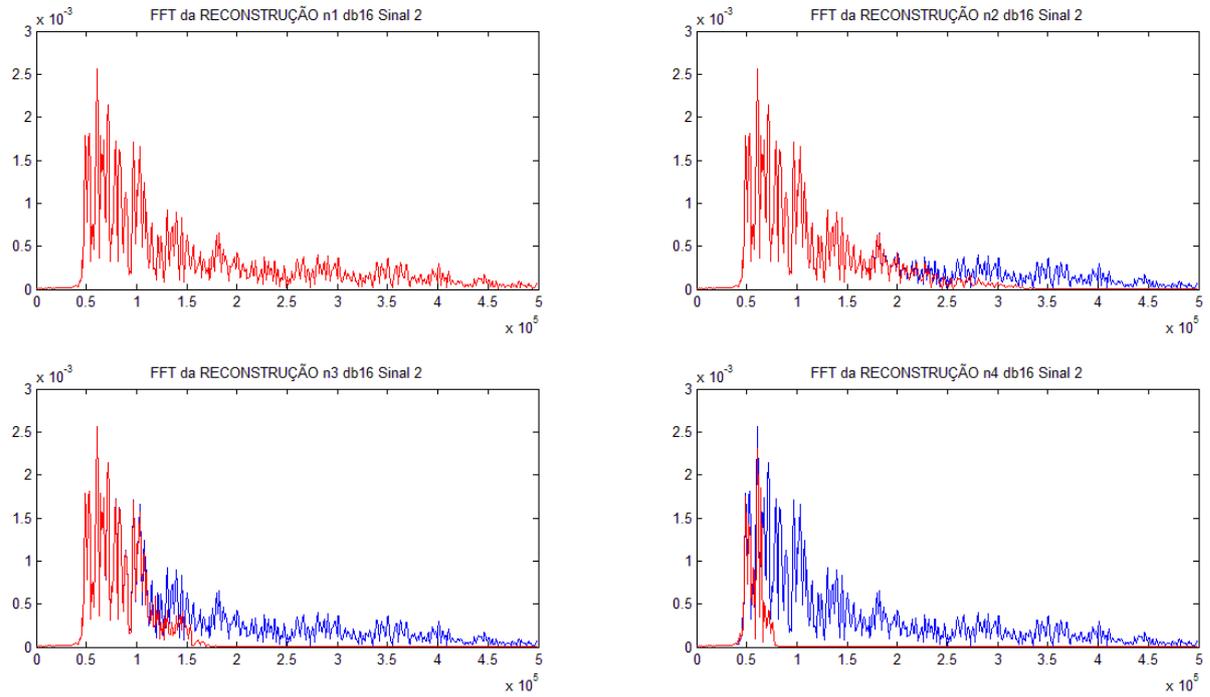


Figura 72 - Transformada de Fourier dos Detalhes do sinal da região plástica.

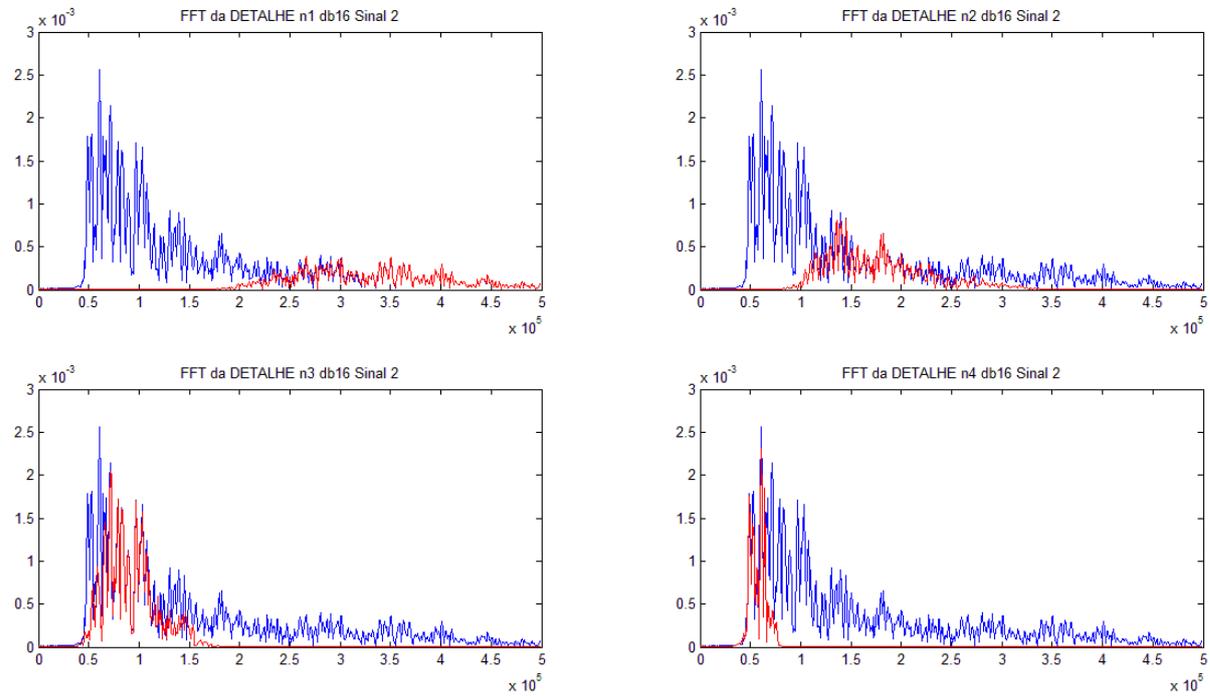
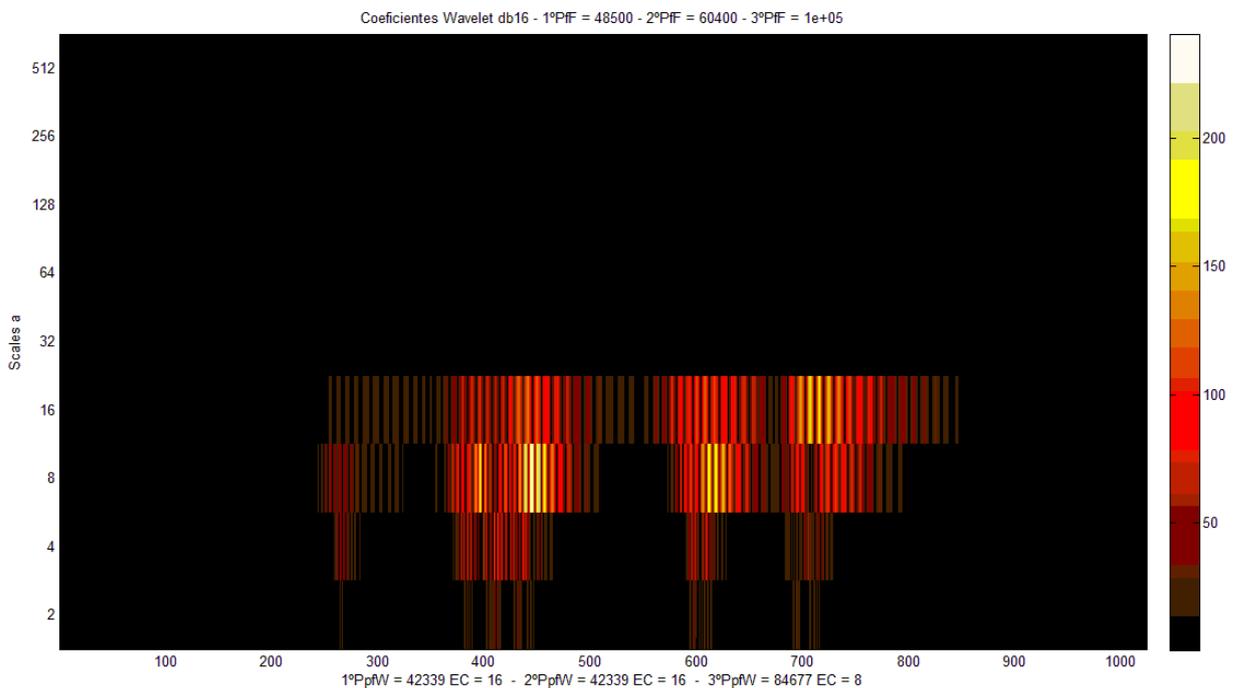


Figura 73 - Espectrograma de ondaletas com comparação de picos de frequência do sinal da região plástica em Hz.



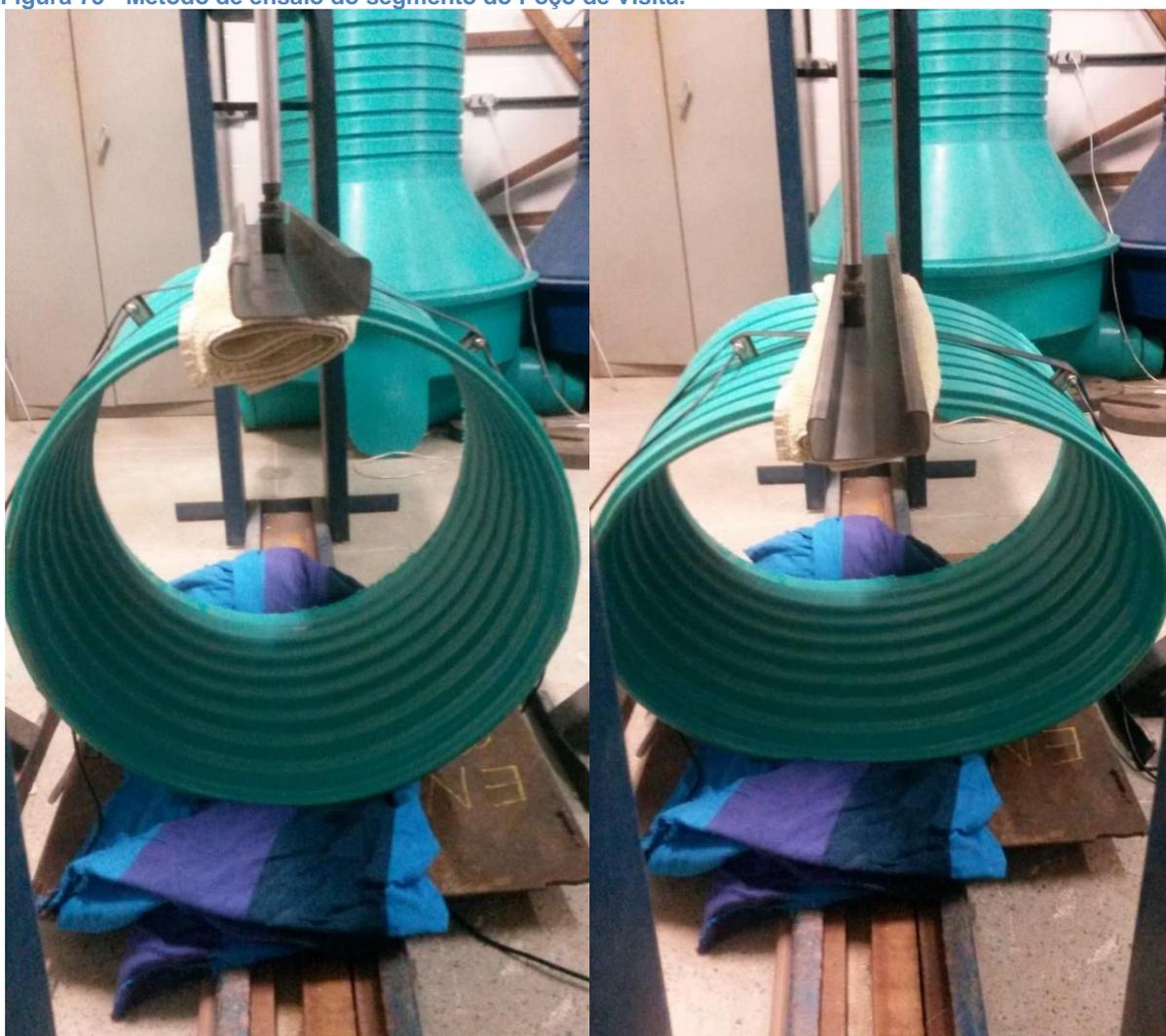
É observado nos resultados, que para o sinal proveniente da região elástica, os picos de frequência estão localizados na escala corresponde (EC) oito e quatro, ou seja, níveis dois e três da decomposição. Para a região plástica os picos de frequência estão localizados na escala corresponde dezesseis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

Para testar a eficácia dos resultados obtido pelo método proposto foi realizado novo ensaio, desta vez no próprio PV (sinais da região elástica) e após em segmento do PV (sinais da região plástica), retratados pelas Figuras 74 e 75, respectivamente.

Figura 74 - Método de ensaio do Poço de Visita.



Figura 75 - Método de ensaio do segmento do Poço de Visita.



Adotando o mesmo procedimento para análise dos sinais, obteve-se resultados semelhantes quanto a caracterização dos sinais provenientes de cada região em particular. Os resultados são apresentados a seguir (Figuras 76 a 81). Como garantia de deformação plástica no ensaio do segmento do PV, é mostrado a diferença de seu diâmetro horizontal e verticalmente, antes e depois do ensaio (Figuras 82 e 83).

Figura 76 - Transformada de Fourier ensaio PV (região elástica).

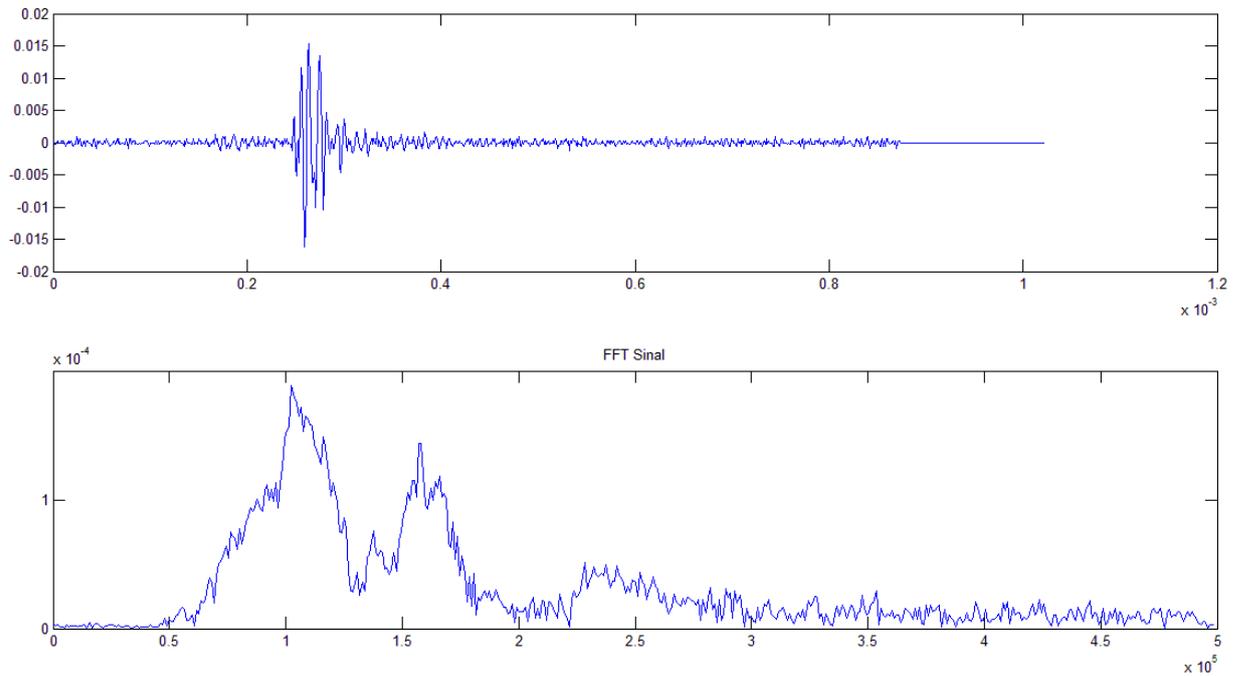


Figura 77 - Transformada de Fourier dos Detalhes ensaio PV (região elástica).

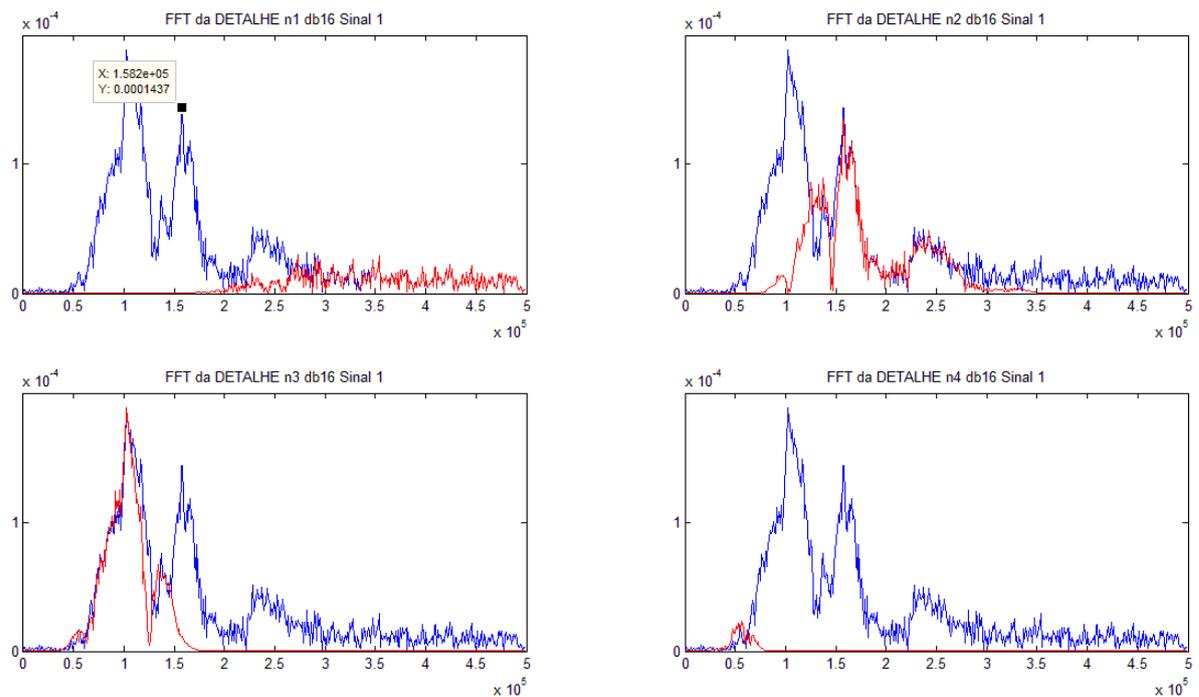


Figura 78 - Espectrograma de ondaleta e correlação dos picos de frequência ensaio PV (região elástica).

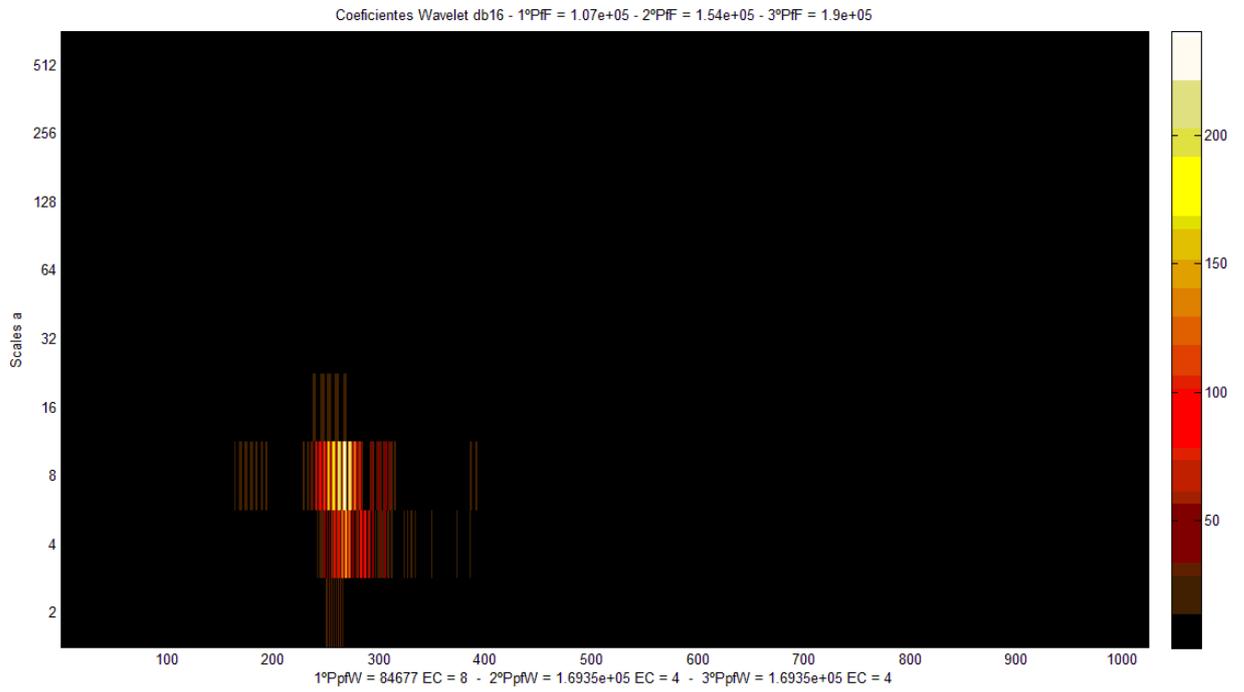


Figura 79 - Transformada de Fourier ensaio segmento PV (região plástica).

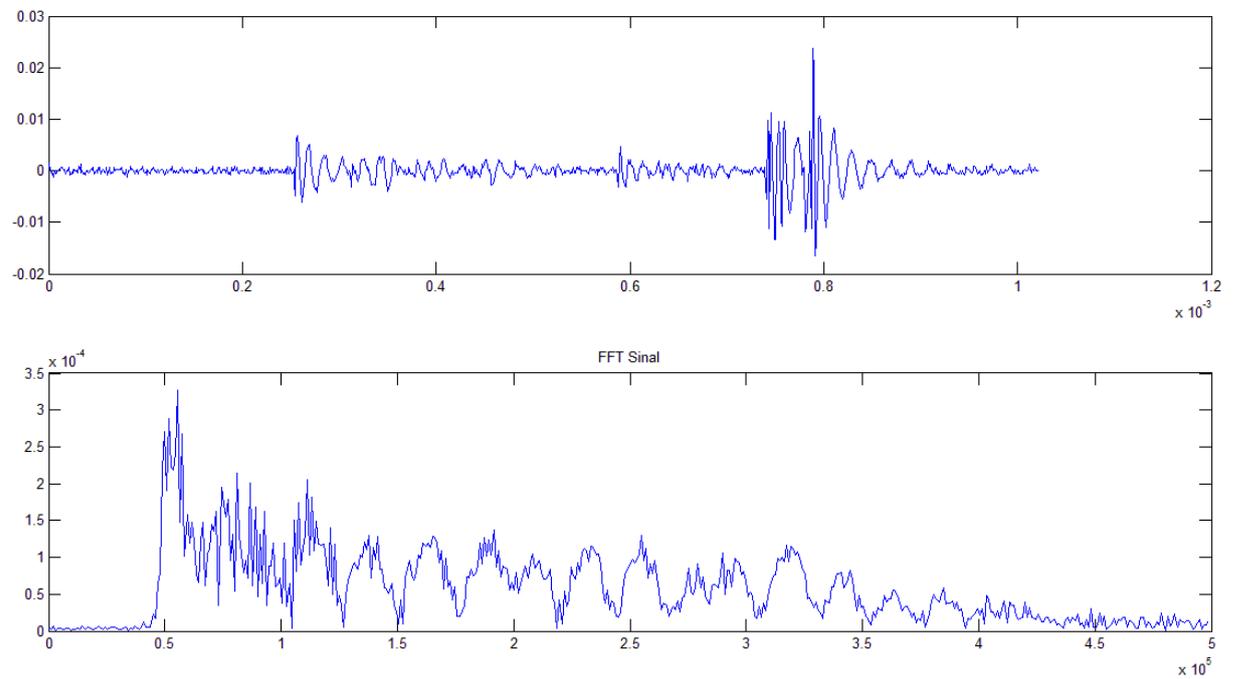


Figura 80 - Transformada de Fourier do Detalhes ensaio segmento PV (região plástica).

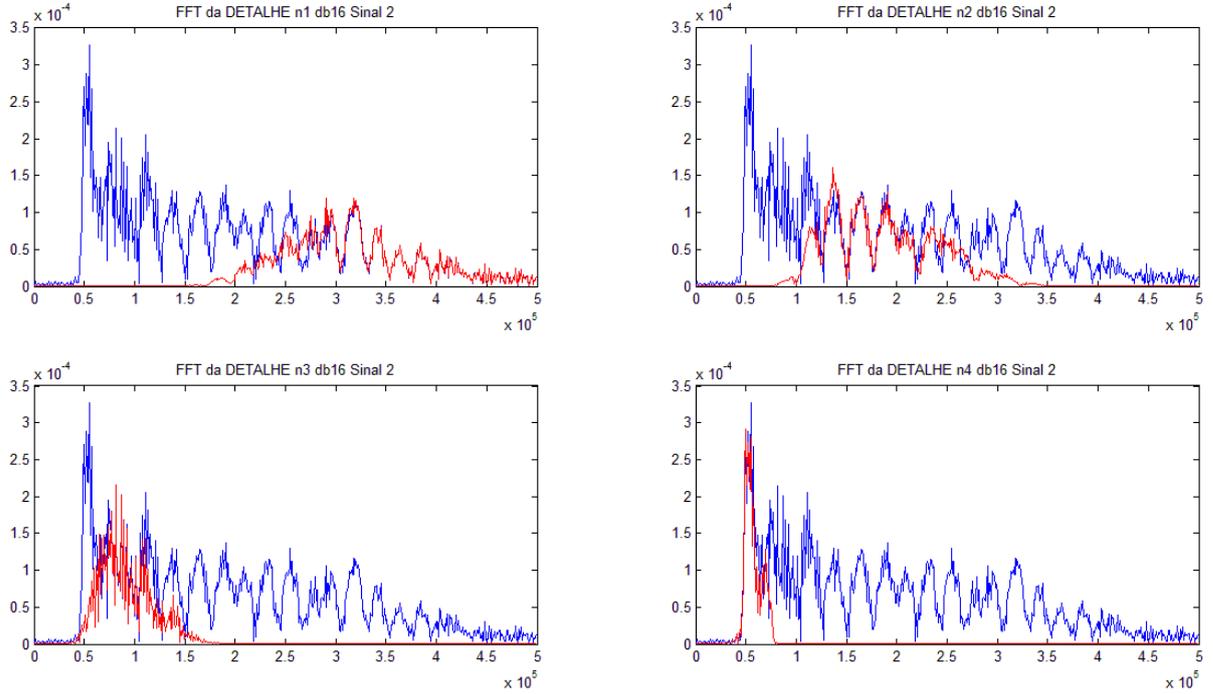


Figura 81 - Espectrograma de ondaleta e correlação dos picos de frequência ensaio segmento PV (região plástica).

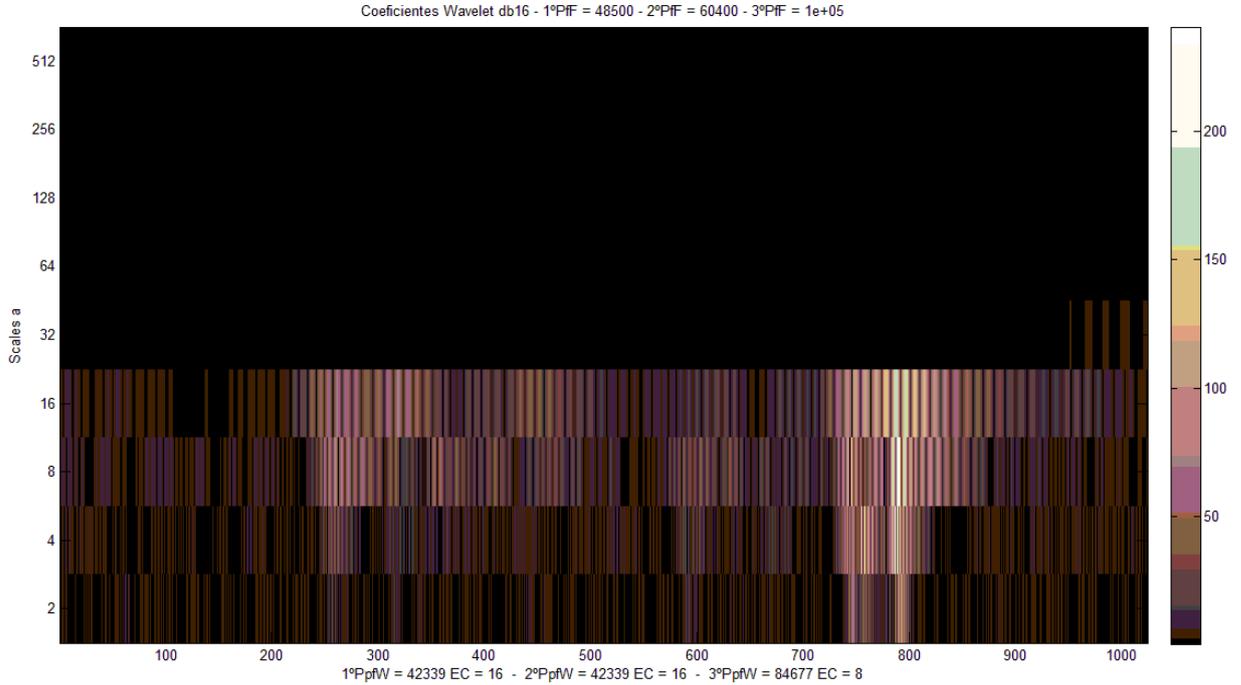


Figura 82 - Medida de diâmetro (altura) ANTES e DEPOIS do ensaio.

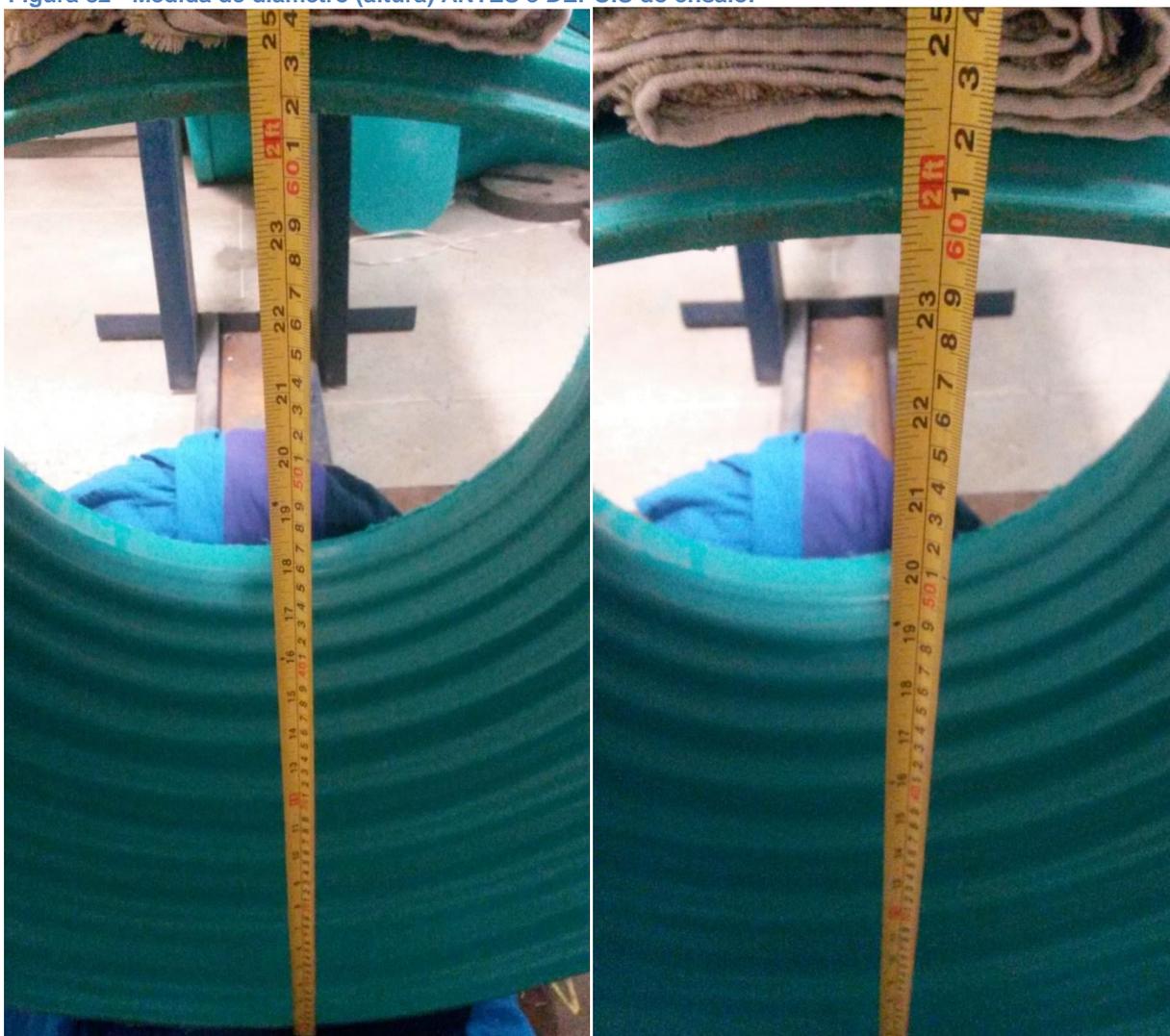
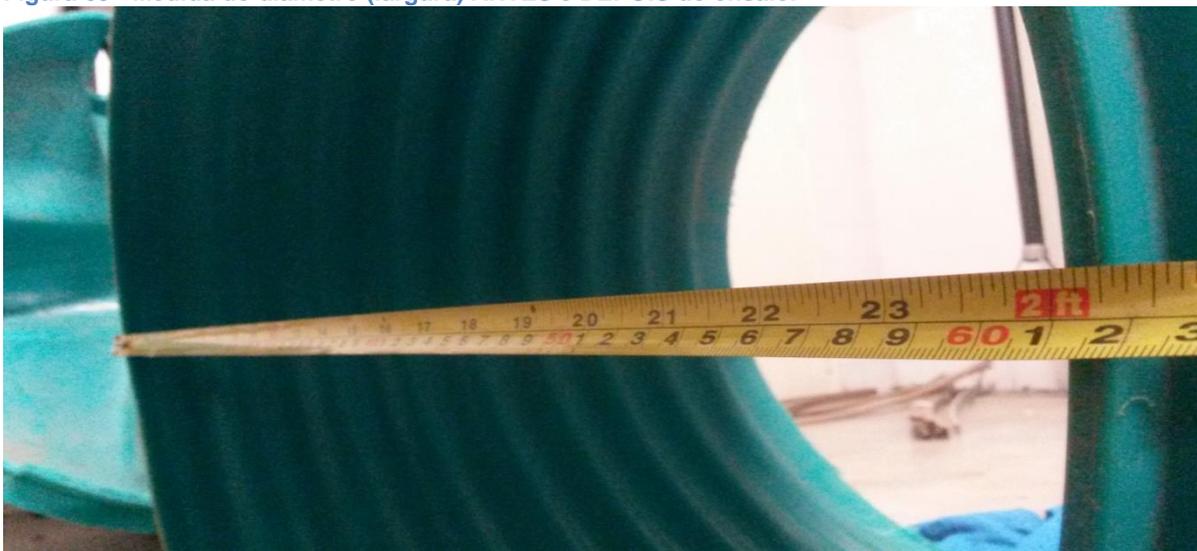


Figura 83 - Medida do diâmetro (largura) ANTES e DEPOIS do ensaio.



6. Conclusão

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

Suas propriedades térmicas praticamente não apresentaram desvio considerável, mantendo-se dentro da faixa referenciada na bibliografia citada durante o capítulo de Revisão Bibliográfica, estando diretamente associada ao nível de cristalinidade do material e na força de ligação atômica das moléculas. A composição química e grupos funcionais também não apresentaram desvio da literatura. Por tanto, conclui-se que os parâmetros e o processo de rotomoldagem não ocasionaram alterações significativas referente a estas propriedades.

Quanto à caracterização dos sinais de emissão acústica provenientes da deformação do PV, é observado de maneira mais significativa a diferença de comportamento no espectro do sinal proveniente dos diferentes regimes de deformação através da aplicação da análise de ondaletas quando comparada a análise de Fourier, para tratamento do sinal. Obtendo resultados eficazes para caracterizar e diferenciar os sinais provenientes de cada regime de deformação no PV.

Caracterizando os sinais provenientes dos regimes de deformação elástica e plástica, foi estabelecida as assinaturas dos sinais referente a cada tipo de deformação. Assim, assinatura para os sinais provenientes do regime de deformação elástica foi estabelecida pelas frequências dominantes entre 1 e 1,5 KHz, representadas pela maior energia acumulado pelos níveis de detalhamento 2 e 3 pela análise de ondaletas com 5 níveis de resolução, utilizando como ondaleta mãe a ondaleta de Deaubechies de grau 16 (db16), podendo ser representada até pelo 3º nível de reconstrução (ou seja, 256 pontos) com erro menor que 5%. Para os sinais provenientes de deformação plástica, obteve-se a assinatura do defeito de deformação plástica no PV. A assinatura do defeito foi estabelecida com as

frequências dominantes apresentando-se entre 0,5 e 1 KHz, representadas pela maior energia acumulada nos níveis 3 e 4 de detalhamento pela análise de ondaletas com 5 níveis de resolução, sendo ondaleta mãe a ondaleta de Daubechies de grau 16 (db16), podendo ser representada até pelo 4º nível de reconstrução (ou seja, 128 pontos) com erro menor que 5%.

7. Sugestão de Trabalhos Futuros

- Medição detalhada do coeficiente de atenuação do material;
- Implementação de rede neural;
- Ensaio em PV enterrado antes e durante o desempenho de sua função;
- Análise de Fractais e outros métodos de processamento de sinais;
- Correlação das propriedades térmicas e índice de cristalinidade, velocidade de propagação do material e coeficiente de atenuação, resistência mecânica e dureza.
- Estudo de fadiga no PV com amplitude fixa e variável.
- Correlação da fadiga no PV com sinais de emissão acústica.

8. Bibliografia

ABNT, N. 1. (2004). *Ensaio não destrutivo - Emissão Acústica - Terminologia*. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

Albuquerque, J. A. (1999). *O plástico na prática*. Porto Alegre: Sagra Luzzatto.

ALLEVATO, C. R. (1980). *Aplicações da Técnica de Emissão Acústica em Ensaio de Corrosão*. Rio de Janeiro: Petrobrás.

A.V. Oppenheim and R.W. Schaffer, Prentice Hall, *Discrete-Time Signal Processing*. 1989/1999.

Callister Jr, W. (1994). *Materials Science and Engineering – An introduction*. New York: John Wiley & sons.

Canevarolo Jr., S. V. (2006). *Ciência dos Polímeros*. São Paulo: Artliber Editora Ltda.

Coates, J. (2000). *Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach*. In: R. Meyers, *Encyclopedia of Analytical Chemistry* (pp. 10815–10837). Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

Crawford, R.J., Gibson, S. - *Rotational moulding, the basics for designers*. Disponível em <http://www.rotationmag.com/article2.htm> em 05/05/2012;

Deaubechies, I. - "*Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets*". *Comm. Pure Applied Mathematics*, n.41, pp 909-996, 1988.

Deaubechies, I.; Grossmann, A. & Meyer, I. - "*Painless Nonorthogonal Expansions*". *Journal of Mathematical Physics*, n.27, pp 1271-1283, 1986.

DEC.UFCG. (01 de Janeiro de 2014). Acesso em 01 de Janeiro de 2014, disponível em http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/ES08_01.html

Estênio, F. S. (2002). Dissertação de Mestrado - *Análise da Integridade Estrutural de Compósitos Através da Caracterização Fractal de Sinais de Emissão Acústica* - Universidade Federal Do Ceará. Ceará.

Estênio, F. S. (2011). Dissertação de Doutorado - *Reconhecimento de Padrões Através de Análises Estatísticas e Fractais Aplicadas a Dados de Ensaios Não-Destrutivos* - Universidade Federal Do Ceará. Ceará.

Ferro, S. - *Processo reconquista os transformadores*. Plástico Moderno, QD editora, São Paulo, nº 283, janeiro, 1998.

Fourier, J. B. - *Théorie Analytique de la Chaleur*. Paris, F. Didot, 1822.

Grossmann, A. & Morlet, J. - *'Decomposition of Hardy Functions Into Square Integrable Wavelets of Constant Shape'*. *SIAM Journal of Mathematics*, n. 15, pp. 723-736, 1984.

Haar, A. - *"Zur Theorie der Orthogonalen Funktionensysteme"*, *Mathematische Annalen*, n.69, pp. 331-371, 1910.

HILBORN, R. C. *"Chaos and Nonlinear Dynamics – An introduction for scientists and engineers"*, Oxford University Press, 1994.

Hubbard, B. B. - *"The World According to Wavelets"*. Wellesley, A. K. Peters, 1996.

J. Billmeyer. F. (1984). *Textbook of Polymer Science*. USA: Wiley Interscience.

Jacques, R. C. (2009). *Avaliação de Parâmetros de Emissão Acústica para Monitoramento de Risers Flexíveis*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

JOM - Nondestructive Evaluation: Overview - *Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research*. vol. 50. Nº 11, 1998. Acessado em 10/01/2015 e Disponível em <http://www.tms.org/pubs/journals/jom/9811/huang/huang-9811.html>

Krautkrämer, J. K. (1977). *Ultrasonic Testing of Materials*. Estados Unidos da América: Springer-Verlag.

Lucas., E. F., Soares., B. G., & Monteiro., E. E. (2001). *Caracterização de Polímeros - Determinação do Peso Molecular e Análise Térmica*. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais Ltda.

M. Narkis, N. R. (1995). *Polymer Powder Technology* . John Wiley & Sons.

Mendonça M. J. C, Motta R. S. (2007). *Saúde e Saneamento no Brasil*. - Planejamento e Políticas Públicas, volume 30, jun./dez. 2007.

Meyer, Y. - "*Principe d'incertitude, bases Hilbertinnes et algèbres d'oérateurs*". Séminaire Bourdaki, n.662, pp 209-223, 1985.

Meyer, Y. - "*Wavelets: Algorithms and Applications*". Filadélfia, SIAM, 1993.

Miller, R. K. (1987). *Nondestructive Testing Handbook - Volume Five, Acoust emission testing*. Estados Unidos da América: American Society for Nondestructive Testing – ASNT.

Misiti M., Misiti Y., Oppenheim G., Poggi J-M. (2001). *Wavelet Toolbox - User's Guide MatLab*. Version 2.1 - The Math Works (2001).

Morettin P.A. - *Ondas e Ondaletas*. Edusp - 1ª edição. São Paulo, 1999.

Morettin P.A. - *Ondas e Ondaletas*. Edusp - 2ª edição. São Paulo, 2014.

Paoli, M.-A. d. (2008). *Degradação e Estabilização de Polímeros*. São Paulo: Chemkeys - editado por João Carlos de Andrade.

PASA, P. A. (2005). *SAMOS AE SYSTEM USER'S MANUAL*. Princeton Junction: Physical Acoustic Corporation.

Pennafort, L. G. - *Caracterização Mecânica com Auxílio da Emissão Acústica do Compósito Reciclado: Pvc/Fibra de Coco*. - 12º CBPol. Santa Catarina, 2013.

Plastics Europe - *Plastics the Facts* - 2012. Association of plastics manufacturers. Disponível <http://www.plasticseurope.org/Document/plastics-the-facts-2012.aspx?FolID=2>

Rahner, S. (1999). *Avanços técnicos ampliam os horizontes da rotolmodagem*. Plástico Industrial , 32-43.

Reto, M. A. (2000). *Revista Plástico Moderno* , 22.

Rubin, I. (1993). *Handbook of plastic materials and technology*. New York: Wiley Interscience.

S. Soares, D. (2008). *Correlações Entre Emissão Acústica de Defeitos e Parâmetros de Mecânica da Fratura na Avaliação da Integridade de Equipamentos Pressurizados*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Soares, S. D. (2001). *Apostila - Emissão Acústica*. São Paulo: Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos - ABENDE.

Teixeira L. I. (2011). *Dissertação - Evidências Empíricas das Políticas de Saneamento Básico Sobre Indicadores de Saúde para Municípios Brasileiros*. Fundação Getúlio Vargas Escola de Economia De São Paulo. São Paulo 2011.

TRM Ltda, T. R. (2007). *Rotolmodagem Prática*. Acesso em 01 de Janeiro de 2014, disponível em www.trmplasticos.com.br: www.trmplasticos.com.br

V. Lopresto; C. Leone; G. Caprino; I. de Iorio, Proc of 17th Int. Conference on Composite Materials – ICCM-17, Edinburgh – UK, pp. 1-10, 2009.

Venkataraman S., N. Kalpakian, and J. Sahambi, *A Novel Ondaleta Based Technique for Detection and De-Noising of Ocular Artifact in Normal and Epileptic Electroencephalogram*. Proceedings of the 6th Nordic Signal Processing Symposium - NORSIG 2004, 2004. June 9(11): p. 180-183.