



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE  
MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA

Marcos Daniel Gouveia Filho

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE POÇOS DE VISITA EM  
POLIETILENO PELO MÉTODO NÃO DESTRUTIVO DE EMISSÃO  
ACÚSTICA

FORTALEZA – CE  
Janeiro de 2014

Marcos Daniel Gouveia Filho

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE POÇOS DE VISITA EM  
POLIETILENO PELO MÉTODO NÃO DESTRUTIVO DE EMISSÃO  
ACÚSTICA

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pontes de Deus.

FORTALEZA – CE  
Janeiro de 2014

Marcos Daniel Gouveia Filho

AVALIAÇÃO ESTRUTURAL DE POÇOS DE VISITA EM  
POLIETILENO PELO MÉTODO NÃO DESTRUTIVO DE EMISSÃO  
ACÚSTICA

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovado em \_\_/\_\_/\_\_

---

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

---

Prof. Dr. Marcelo José Gomes  
Universidade Federal do Ceará

---

Eng. Luiz Pennafort Jr.  
Universidade Federal do Ceará

## RESUMO

Poço de visita (PV) é uma estrutura de redes coletoras de esgoto onde há a interligação dos fluxos de esgoto. 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). Devido ao material de sua composição são facilmente sujeito a degradação, ao sofrer desgaste acabam liberando areia, acarretando vários problemas no equipamento de tratamento e no próprio tratamento do esgoto além dos transtornos públicos ocasionado pela sua falha. 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. Como a estrutura se trata de um protótipo, a influência de defeitos em sua integridade estrutural ainda não se encontra estabelecida. Neste trabalho investiga-se a concentração de tensão em sua estrutura e influência de defeitos na concentração de tensões no PV, previstas por simulação computacional e comprovadas por emissão acústica. O ensaio não destrutivo de emissão acústica consiste analisar as ondas elásticas transientes, de frente de onda de forma esférica, que são produzidas através de liberação de energia mecânica a partir de uma determinada fonte, neste caso a fonte é o próprio PV sujeito a uma carga uniaxial de compressão, utilizando os mesmos parâmetros da simulação computacional. Nesse contexto, analisam-se os sinais gerados pelo PV em regiões isentas de defeito e regiões com defeito presente, criando um padrão representativo para as regiões. As regiões que apresentaram indicação de defeito foram submetidas a uma averiguação local para confirmação e qualificação do defeito, propondo assim um método confiável e não destrutivo para avaliação do PV durante toda a fase de testes quanto protótipo. O estudo foi realizado em três PVs. Ao termino deste trabalho pode-se identificar as regiões que mais concentram tensões no PV, logo estão mais sujeitas a falhar perante solicitação e assim merecem uma maior atenção quando iniciado os testes do protótipo. Também se pode concluir que não há falhas comprometedoras em relação à integridade estrutural do terceiro PV, assegurando assim seu correto funcionamento perante as solicitações mecânicas, portanto está em perfeitas condições para implementação e testes quanto a protótipo.

Palavras-chave: Poço de visita, Polietileno, Emissão acústica.

## ABSTRACT

Manhole (PV) is a framework of sewage systems where there is interconnection flows of sewage. Currently the majority of PVs in use is made of precast concrete rings, reinforced concrete, and masonry (with concrete blocks or clay bricks). Due to its material composition it is easily subject to degradation, to wear out eventually releasing sand, causing various problems in water treatment equipment and wastewater treatment itself beyond public disorders caused by its failure. Aiming to solve these problems, improve the quality and conditions of sewage treatment, seek to implement manholes made of polyethylene polymer material with appreciable characteristics for this purpose, for example, its inert character, weight, strength and life. Since it is the structure of a prototype influence of defects in its structural integrity is not established. In this paper it is investigated the stress concentration in its structure and influence of defects on the stress concentration in PV, predicted by computer simulation and proved by acoustic emission. Non-destructive testing is to analyze the acoustic emission transient elastic waves in front of spherical wave, which are produced by release of mechanical energy from a given source, in this case the source is the PV itself subject to a uniaxial compressive load, using the same parameters of the computational simulation. In this context we analyze the signals generated by PV in defect-free regions and regions with this defect , creating a representative standard for the regions. The regions that showed indication of defect underwent a site investigation for confirmation and identification of the defect, thus proposing a reliable and non-destructive method for the assessment of PV throughout the testing phase as prototype. At the end of this study, it was identified the regions with the greatest concentration in PV tensions soon are more likely to fail upon application and so deserve greater attention when launched prototype testing. And one can conclude that there is no compromising failures in relation to the structural integrity of the PV 3, thus ensuring correct operation before the mechanical requests, so it's in perfect condition for implementation and testing as a prototype.

Key words: Manhole, acoustic emission, polyethylene.

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos que tornaram esse momento possível. Além da realização deste trabalho me ajudaram na vida.

Agradeço primeiramente a Deus por me dar esta oportunidade e poder desfrutar da presença de todos que me ajudaram.

Agradeço ao Prof. Dr. Enio Pontes de Deus por acreditar na minha capacidade e me apoiar durante todo o percurso desde a minha entrada no LAMEFF.

Agradeço a todos os companheiros de laboratório, principalmente o Ruy pela parceria e comprometimento, sem ele realmente teria sido impossível.

Agradeço a Mãe, Pai, Irmã, Namorada e toda a família que me deu suporte e apoio.

Agradeço a empresa Plastisan Plásticos do nordeste por disponibilizar o material de estudo e pelo suporte prestado para a realização deste trabalho.

Agradeço ao CNPq por financiar e apoiar esta pesquisa.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura intermolecular dos polímeros. Fonte: Cristalinidade dos Polímeros. ....	17
Figura 2 - Produção mundial de plástico em milhões de toneladas. Fonte: PLASTIC EUROPE, 2012. ....	20
Figura 3 - Consumo por segmento produtivo no ano de 2011. Fonte: PLASTIC EUROPE, 2012. ....	20
Figura 4 - Segmentação do mercado de plásticos no Brasil no ano de 2003. Fonte: Ciência dos Polímeros. ....	21
Figura 5 - A) Etileno B) Polietileno. Fonte: Autor. ....	22
Figura 6 – Esquema de obtenção de alguns polímeros através da destilação do carvão mineral. Fonte: Ciência dos Polímeros. ....	23
Figura 7 – Destilação fracionada do petróleo e pirólise do nafta para obtenção das frações gasosas. Fonte: Ciência dos Polímeros. ....	23
Figura 8 - Representação da conformação da cadeia polimérica do PE. Fonte: Autor. ....	26
Figura 9 - Representação da estrutura do esferulito. Fonte: Materials Science and Engineering. ....	27
Figura 10 - Esferulitos (cruz de malta) visto sob microscopia ótica com luz polarizada. Fonte: Materials Science and Engineering. ....	27
Figura 11 - Célula unitária do polietileno. Fonte: Materials Science and Engineering. ....	28
Figura 12 - Poço de visita. Fonte: <a href="http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/ES08_01.html">http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/ES08_01.html</a> .....	30
Figura 13- Poço de visita em concreto, alvenaria e tijolos cerâmicos. Fonte: <a href="http://agele.com.br/category/desentupidora-de-pv-pocos-de-visita/">http://agele.com.br/category/desentupidora-de-pv-pocos-de-visita/</a> .....	31
Figura 14 - Processo de formação de ácidos em redes coletoras de esgoto. Fonte: <a href="http://www.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/fissuracao/exemplo126.pdf">www.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/fissuracao/exemplo126.pdf</a> .....	32
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). ....	33
Figura 16 - Poço de visita em polietileno. Fonte: Autor. ....	34
Figura 17 - Etapas do processo de rotolmodagem. Fonte: Rotolmodagem estudo superior. ....	35
Figura 18 - Molde para produção do PV em polietileno. Fonte: Autor. ....	35
Figura 19 - Consumo dos produtos rotolmodados por segmento. Fonte: Rotolmodagem estudo superior. ....	36
Figura 20 - Processo de coalescência. Fonte: Autor. ....	36
Figura 21 - Ilustração de uma fonte de emissão acústica. Fonte: Autor. ....	39
Figura 22 - Fenômenos de reflexão nas fronteiras do material que contém a fonte de emissão acústica (L, onda longitudinal; T, onda transversal; e S, onda superficial). Fonte: Soares, 2001. ....	39
Figura 23 - Analogia à atenuação geométrica. Fonte: Jacques, 2009. ....	40
Figura 24 - Onda Longitudinal. Fonte: Jacques, 2009. ....	42
Figura 25 - Onda Transversal. Fonte: Jacques, 2009. ....	42
Figura 26 - A) Movimento de uma partícula em função do tempo. B) Movimento instantâneo. Fonte: S. Soares, 2008. ....	43
Figura 27 - Sinal de emissão acústica. Fonte: Autor. ....	45
Figura 28 - Medição da massa A) corpo de prova e B) proveta. Fonte: Autor. ....	48
Figura 29 - Corpo de prova para ensaio de tração. Fonte: ASTM 638. ....	50
Figura 30 - Representação do equipamento de análise termogravimétrica. Fonte: Autor. ....	52
Figura 31 - Representação do equipamento de DSC. Fonte: Autor. ....	53

Figura 32 - Seleção da base de sustentação do Poço de Visita. Fonte: Autor. ....	55
Figura 33 - Parâmetros temporais de aquisição: <i>PDT</i> , <i>HDT</i> e <i>HLT</i> . Fonte: Manual Physical Acoustic Corporation, 2005.....	56
Figura 34 - Ilustração do ensaio para determinação da velocidade de propagação. Fonte: Pennafort Jr., 2013.....	57
Figura 35 – Método de ensaio do Poço de Visita. Fonte: Autor. ....	58
Figura 36 - Averiguação da carga aplicada pela célula de carga. Fonte: Autor.....	58
Figura 37 - Localização de fonte de emissão acústica com dois sensores em um plano infinito. Fonte: Miller, 1987. ....	59
Figura 38 - Localização da fonte de emissão acústica por triangulação. Fonte: Autor. ....	60
Figura 39 - Resultado ensaio de tração. ....	61
Figura 40 - Resultado da análise termogravimétrica. ....	62
Figura 41 - Resultado da calorimetria diferencial de varredura. ....	63
Figura 42 - Resultado da espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier.....	64
Figura 43 - Indicação das regiões mais comprometidas por simulação computacional. .....	65
Figura 44 - Ensaio de emissão acústica na chaminé do PV na posição 1e na posição 2 (+15cm).....	66
Figura 45 - Ensaio de emissão acústica na parte cônica. ....	66
Figura 46 - Defeitos circulares. ....	67
Figura 47 - Gráfico: Energia x Amplitude x Canal, de uma mesma região A) Sem e B) Com defeito. ....	68
Figura 48 - Inclusão metálica localizada no PV 2. ....	69
Figura 49 - Sinal gerado na região cônica. ....	70
Figura 50 - Resultado do ensaio de emissão acústica realizado no anel de sustentação do PV 2. ....	70
Figura 51 - Região interna 1 do anel de sustentação do PV 2. ....	71
Figura 52 - Região interna 2 do anel de sustentação do PV 2. ....	72
Figura 53 - Região interna 3 do anel de sustentação do PV 2. ....	72
Figura 54 - Região interna 4 do anel de sustentação do PV 2. ....	73
Figura 55 - Comparação entre a profundidade das regiões internas do anel de sustentação do PV 2.....	73
Figura 56 - Simulação levando em conta a profundidade da região interna do anel de sustentação. ....	75



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Primeira ocorrência e primeira produção industrial de alguns polímeros. ....	15
Tabela 2 - Consumo de plásticos em alguns países no ano de 2002. (em 1000 toneladas) .....	21
Tabela 3 - Comparação de propriedades do PEAD com o PEBD. Fonte: Ciência dos Polímeros.....	25
Tabela 4 – Comparação de propriedades entre PEBD, PEMD e PEAD. ....	25
Tabela 5 - Consumo e crescimento de polietileno na Europa, Estados Unidos e Brasil no ano 2010.....	29
Tabela 6 - Velocidades de onda (c) e impedâncias acústicas (Z) de materiais para ondas longitudinais (l), transversais (s) e Rayleigh (r). Fonte: Miller, 1987.....	44
Tabela 7 - Escala de dB <sub>EA</sub> .....	46
Tabela 8 - Medidas para cada tipo de corpo de prova. ....	50
Tabela 9 - Resultado da densidade indireta.....	61
Tabela 10 - Resultado do ensaio de tração.....	62
Tabela 11 - Resultado da análise térmica. ....	63
Tabela 12 - Resultado da velocidade de propagação. V = velocidade (m/s) e A = atenuação(dB/cm).....	65
Tabela 13 - Resultado do ensaio de emissão acústica para o PV 1.....	67
Tabela 14 - Resultado do ensaio de emissão acústica pra o PV 1 com defeito. ....	67
Tabela 15 - Resultado para o ensaio de emissão acústica no PV 2.....	69
Tabela 16 - Resultado do ensaio de emissão acústica feito no anel de sustentação do PV 2.....	71
Tabela 17 - Medição da profundidade das regiões interna do anel de sustentação PV 2.....	74
Tabela 18 - Medidas das regiões internas do anel de sustentação do PV 3.....	74
Tabela 19 - Resultado dos ensaios de emissão acústica no PV 3.....	74
Tabela 20 - Comparação de resultados.....	76

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	12
<b>2. OBJETIVO</b>	13
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA</b>	
3.1 POLÍMEROS	
3.1.1 CONCEITO HISTÓRICO	14
3.1.2 DEFINIÇÃO	15
3.1.3 MERCADO	19
3.2 POLIETILENO	
3.2.1 CONCEITO	22
3.2.2 MERCADO	28
3.2.3 PROPRIEDADES	29
3.3 POÇO DE VISITA	
3.3.1 CONCEITO	30
3.3.2 ROTOMOLDAGEM	
3.3.2.1 TEORIA	33
3.3.2.2 PROCESSO DE ROTOMOLDAGEM	36
3.4 EMISSÃO ACÚSTICA	
3.4.1 CONCEITO	37
3.4.2 ATENUAÇÃO DE SINAS DE EMISSÃO ACÚSTICA	40
3.4.3 PROPAGAÇÃO DAS ONDAS	41
3.4.4 CARACTERISTICA DA ONDA DE EMISSÃO ACÚSTICA	43
<b>4. MATERIAIS E METODOS</b>	
4.1 AMOSTRAS	47
4.2 DENSIDADE	47
4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO	49
4.4 ANÁLISE TÉRMICA	51
4.4.1 ANÁLISE TERMOGRAVIMETRICA	51
4.4.2 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA	52
4.5 ESPECTROMETRIA INFRAVERMELHA COM TRANSFORMADA DE FOURIER	53
4.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	54
4.7 EMISSÃO ACÚSTICA	55
4.8 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	
4.8.1 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO	56
4.8.2 ENSAIO DO POÇO DE VISITA	57

<b>5. RESULTADO E DISCUSSÃO</b>	
5.1 DENSIDADE .....	61
5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO .....	61
5.3 ANÁLISE TÉRMICA .....	62
5.4 ESPECTROMETRIA DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER .....	63
5.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	65
5.6 EMISSÃO ACÚSTICA .....	65
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	<b>77</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>78</b>

# 1. INTRODUÇÃO

A preservação do meio ambiente e a saúde pública é o papel principal 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.

Visando preservar os investimentos, com confiabilidade necessária da utilização dos materiais na sua infraestrutura (gestão de ativos), é que as empresas vêm se preocupando, pois além de incidir na sua sustentabilidade econômico-financeira, há o desgaste da imagem.

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 estes esforços, ficam susceptíveis a serem carregados 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. O primeiro 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.

## 2. OBJETIVO

- Objetivo Geral.

Para fins de implementação do PV é preciso garantir que o protótipo desempenhe sua função com louvor, para isso é preciso garantir sua integridade estrutural. O ensaio não destrutivo de emissão acústica será realizado a fim de averiguar as regiões mais propícias a falhar perante solicitação mecânica e garantir integridade estrutural PV antes que seja implementado no sistema de esgoto para teste.

- Objetivo Específico.

Investigar as concentrações de tensão na estrutura do PV e influência de defeitos na concentração de tensão.

Garantir integridade estrutural PV antes que seja implementado no sistema de esgoto para teste.

## 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

Vamos começar pelo termo mais importante que é 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. 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 sernicristalino, o amolecimento se dá com a fusão da fase cristalina. São fusíveis, solúveis, recicláveis. Exemplos: polietileno (PE), poliestireno (PS), poliamida (Náilon), etc. (Canevarolo Jr., 2006)

**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)

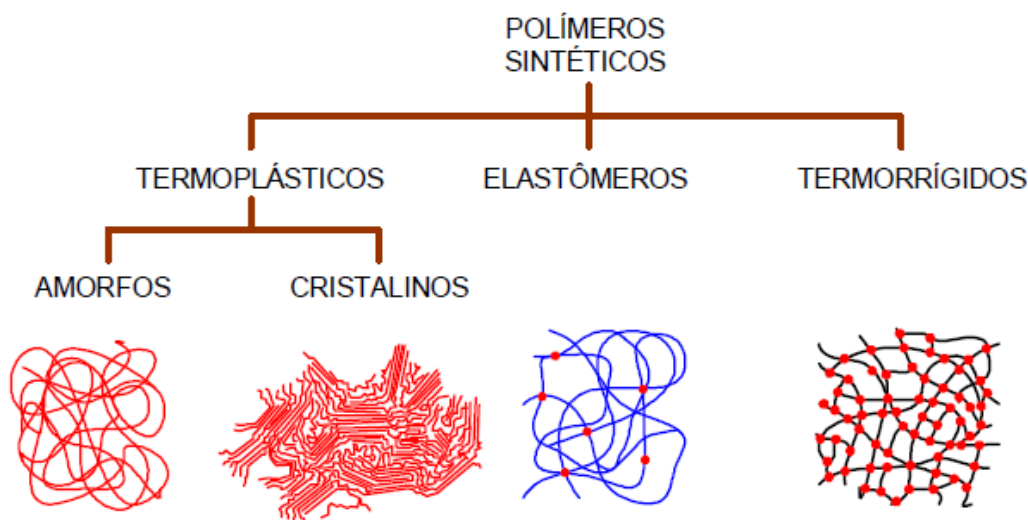
As Borrachas são elastômeros, tanto de origem natural como sintética. E por sua vez elastômero é um polímero que, à temperatura ambiente, pode ser deformado repetidamente com pelo menos duas vezes o seu comprimento original. Retirado o esforço, deve voltar rapidamente ao tamanho original. Para apresentar estas características, os elastômeros normalmente possuem cadeias flexíveis amarradas uma 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)

Para completo entendimento faz-se necessário adicionar algumas definições de termos particulares da área, como os seguintes:

**Grau de polimerização (GP)** - número de unidades de repetição da cadeia polimérica. Normalmente o grau de polimerização fica acima de 750.

**Massa molar do polímero (MM)** -  $MM = GP \times MM_{\text{mero}}$ . Polímeros de interesse comercial apresentam geralmente  $MM > 10\ 000$ .

**Oligômero** - polímero de baixa massa molar (normalmente para  $MM < 10\ 000$ ).

**Polimerização ou síntese de polímeros** - conjunto de reações químicas que provocam a união de pequenas moléculas por ligação covalente com a formação de um polímero.

**Ligações cruzadas** - ligações covalentes formadas entre duas cadeias poliméricas, que as mantêm unidas por forças primárias, formando uma rede tridimensional. Para quebrar a ligação cruzada, é necessário fornecer um nível de energia tão alto que seria suficiente para destruir também a cadeia polimérica. Quando presente em baixa concentração produz pequenos volumes não desagregáveis na massa polimérica, conhecido por "olho de peixe". Quando em quantidades intermediárias, é típico das borrachas vulcanizadas, e quando em grande quantidade, é característico dos termofixos.

**Cura** - mudança das propriedades físicas de uma resina por reação química, pela ação de um catalisador e/ou calor e um agente de cura. A cura gera a formação de ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas. Antes da cura, o termorrígido é um oligômero ( $MM < 10\ 000$ ), apresentando-se como um líquido viscoso ou em pó. Este termo é preferencialmente utilizado para termofixos. Em borrachas, ele se confunde com o termo vulcanização.

**Vulcanização** - processo químico de fundamental importância às borrachas, introduzindo a elasticidade e melhorando a resistência mecânica. Esta se dá através da formação de ligações cruzadas entre duas cadeias. O enxofre é o principal agente de vulcanização.

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.

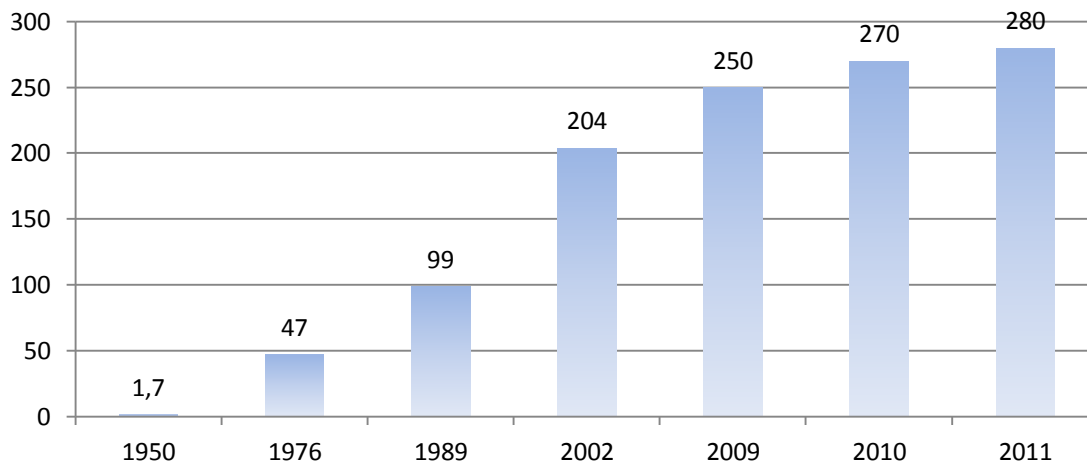
- Temperatura de cristalização ou  $T_c$ .

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.

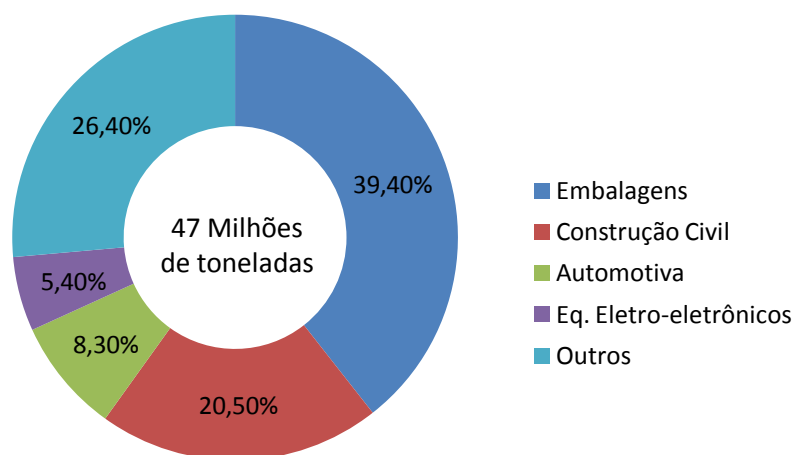
### 3.1.3 MERCADO

A indústria do plástico vem crescendo 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%. (PLASTIC EUROPE, 2012).



**Figura 2 - Produção mundial de plástico em milhões de toneladas.**  
 Fonte: PLASTIC 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: PLASTIC EUROPE, 2012.

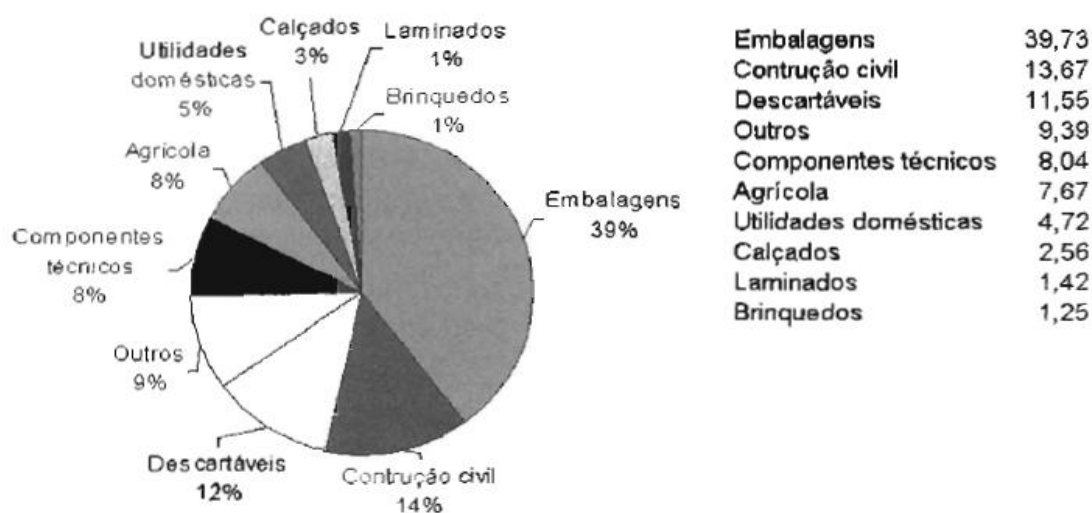
A Tabela 2 apresenta o consumo de plástico nos principais países no mundo, em 2002, em milhares de toneladas. Os EUA foram (e são) os maiores consumidores, com 43 milhões de toneladas. O Brasil, em oitavo lugar, consumiu apenas um décimo deste valor. O consumo mundial estimado, para 2002, foi de 120 milhões de toneladas anuais. Para uma simples comparação, assumindo-se a densidade média de 1g/cm<sup>3</sup>, 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 7 898 empresas no setor de transformação do plástico, empregando 220 000 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 utiliza 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.

Como comentário final, e também como informação para aqueles que acham que os plásticos vão acabar com o esgotamento mundial das reservas de petróleo, lembro que somente 4% do consumo de petróleo são utilizados para a produção de plásticos. A maior parte é queimada para fins de climatização (39%), transporte (29%), geração de energia (22%) e outras aplicações (7%). O uso do petróleo para a produção de plásticos é e continuará sendo economicamente atraente, pois eles são um bem de consumo leve, versátil e reciclável, o que os torna nobres, incomparáveis com a prática atual, e fadada ao desaparecimento, de simplesmente queimar o petróleo para gerar calor ou força motriz. (Canevarolo Jr., 2006)

## 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. (J., 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  $\pi$  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.

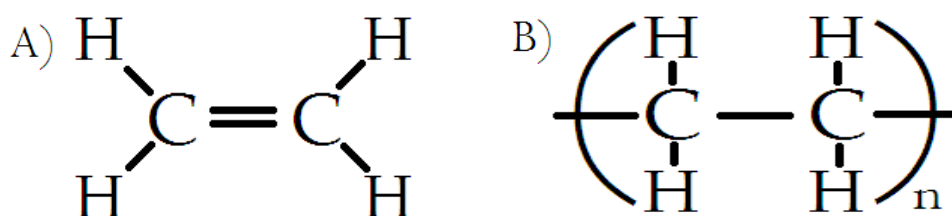


Figura 5 - A) Etileno B) Polietileno.  
Fonte: Autor.

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. (Figura 7)

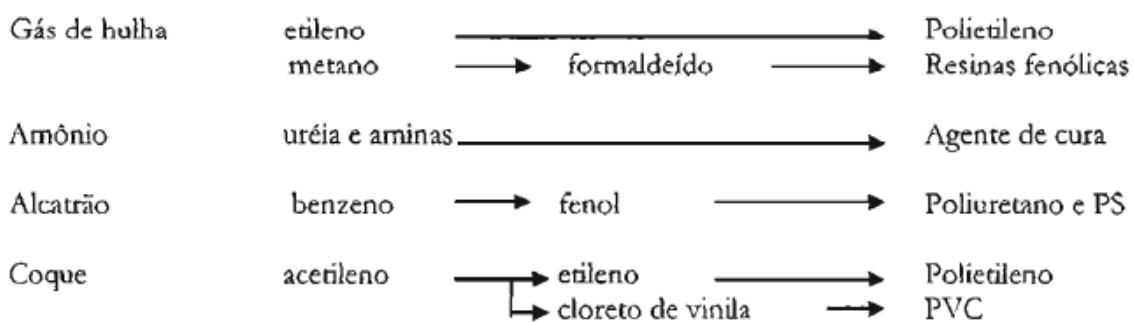


Figura 6 – Esquema de obtenção de alguns polímeros através da destilação do carvão mineral. Fonte: Ciência dos Polímeros.

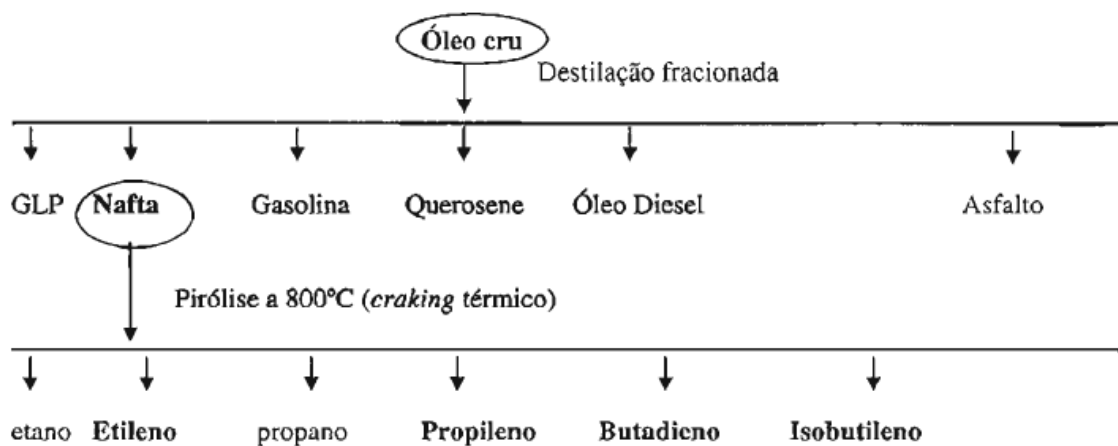


Figura 7 – Destilação fracionada do petróleo e pirólise do nafta para obtenção das frações gasosas. Fonte: Ciência dos Polímeros.

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 conferem 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 um polímero 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 1Tabela 4) logo adiante:

**Tabela 3 - Comparação de propriedades do PEAD com o PEBD.**

Tipo de cadeia			HDPE	LDPE
			linear	ramificada
Ramificações	Longa (por molécula)		~ zero	< 1
	Curta (por 1 000 átomos de C)	C2	6	20
		C4	~ zero	10
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )			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.

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

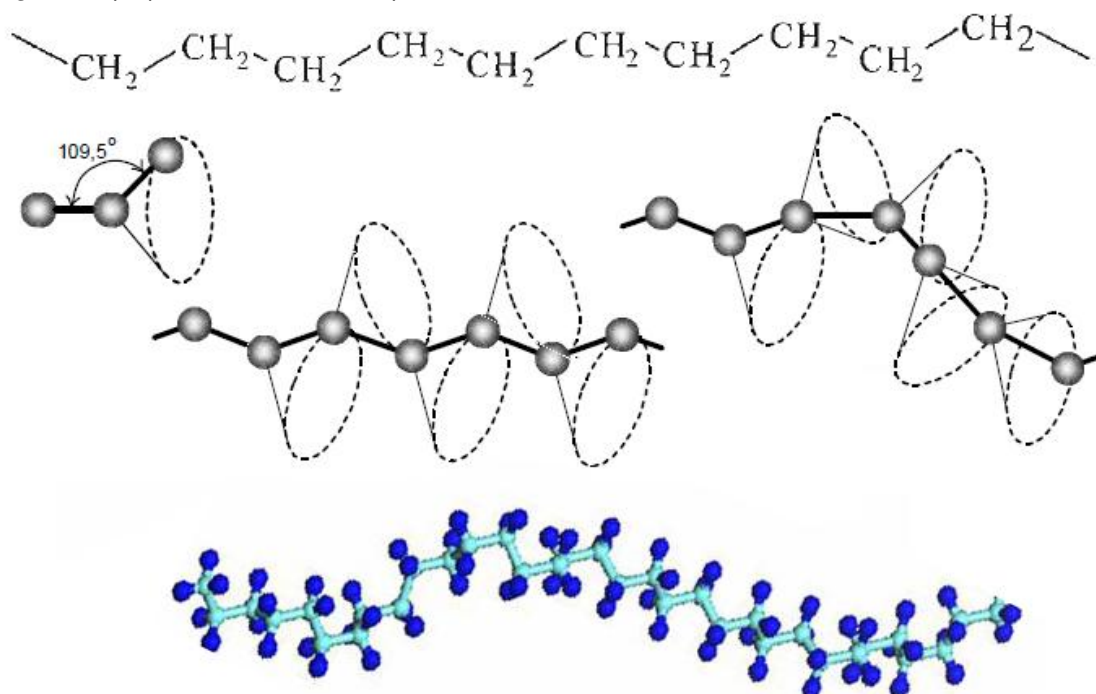
Testes DIN, ASTM	Propriedades	Densidade dos PE's		
		Baixa	Média	Alta
<b>Físicas</b>				
D(53479)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,910-0,925	0,926-0,940	0,941-0,965
D(53473)	Absorção de água 24h, 3mm de espessura (%)	< 0,01	< 0,01	< 0,01
<b>Mecânicas</b>				
D(53455)	Resistência à tração (10 <sup>3</sup> Kgf/cm <sup>2</sup> )	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 <sup>4</sup> Kgf/cm <sup>2</sup> )	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
<b>Térmicas</b>				
D(52612)	Condutividade térmica (10 <sup>-3</sup> cal/s cm <sup>2</sup> °C/cm)	8,0	8,0-10,0	11,0-12,4
D(52328)	Expansão térmica linear (10 <sup>-5</sup> cm/°C)	20	15	14
D(53461)	Temperatura de deflexão (°C)	32-42	42-50	45-55
<b>Ópticas</b>				
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.

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)

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.

O polietileno é um polímero semicristalino, cuja parte cristalina 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:  $a = 0.791$  nm;  $b = 0.494$  nm;  $c = 0.255$  nm. Figura 11) (Callister Jr, 1994)



**Figura 8 - Representação da conformação da cadeia polimérica do PE.**  
Fonte: Autor.

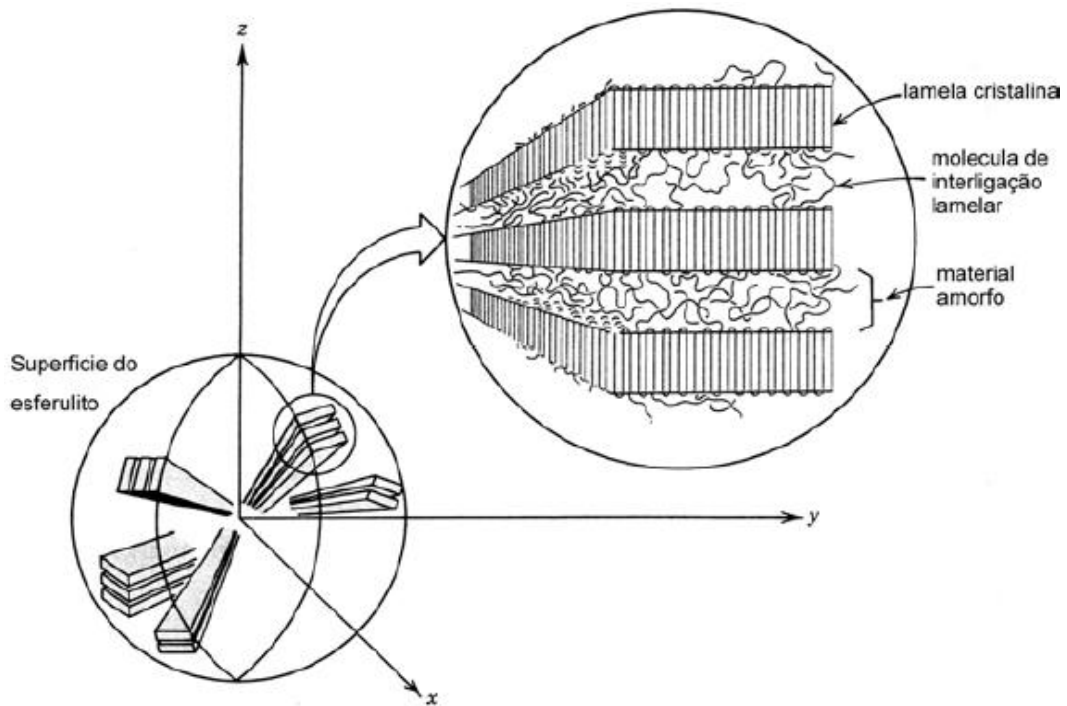


Figura 9 - Representação da estrutura do esferulito.  
 Fonte: Materials Science and Engineering.

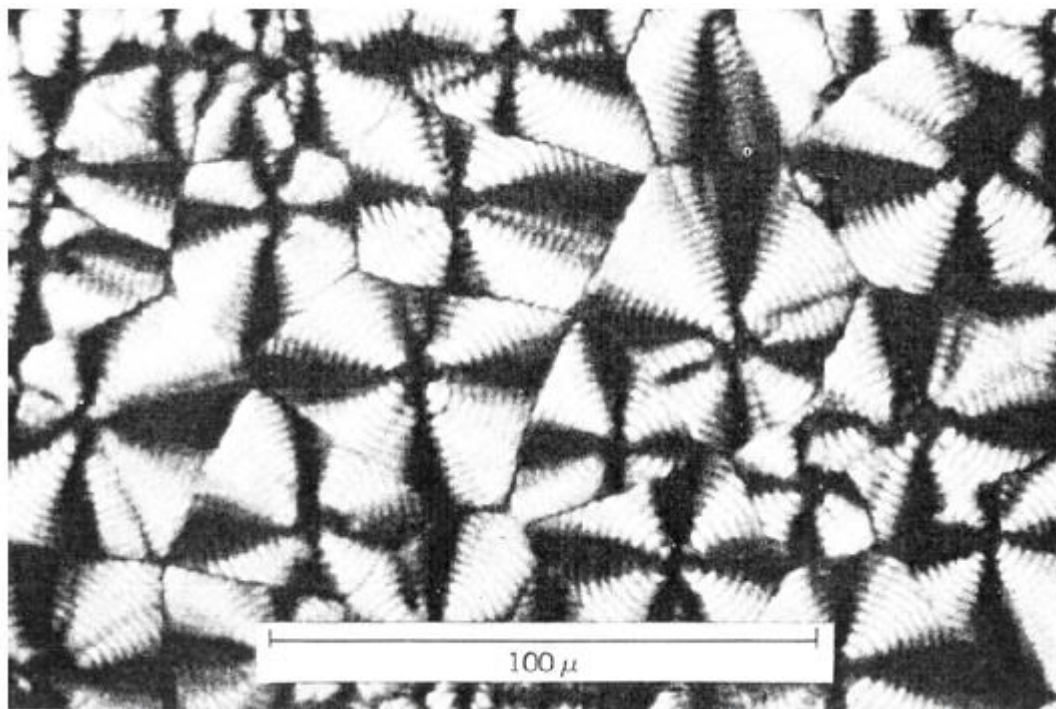
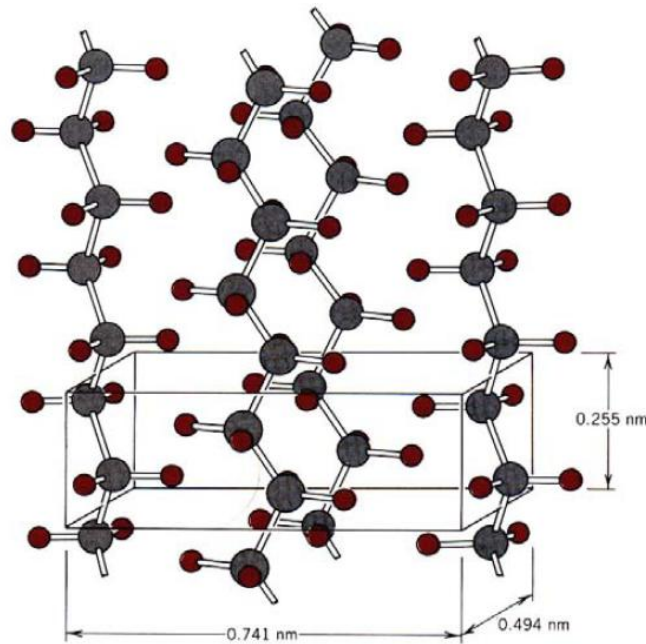


Figura 10 - Esferulitos (cruz de malta) visto sob microscopia ótica com luz polarizada.  
 Fonte: Materials Science and Engineering.



**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 toneladas/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)
- Índice de Quebra igual a Zero (observando o correto procedimento de instalação)

### 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.

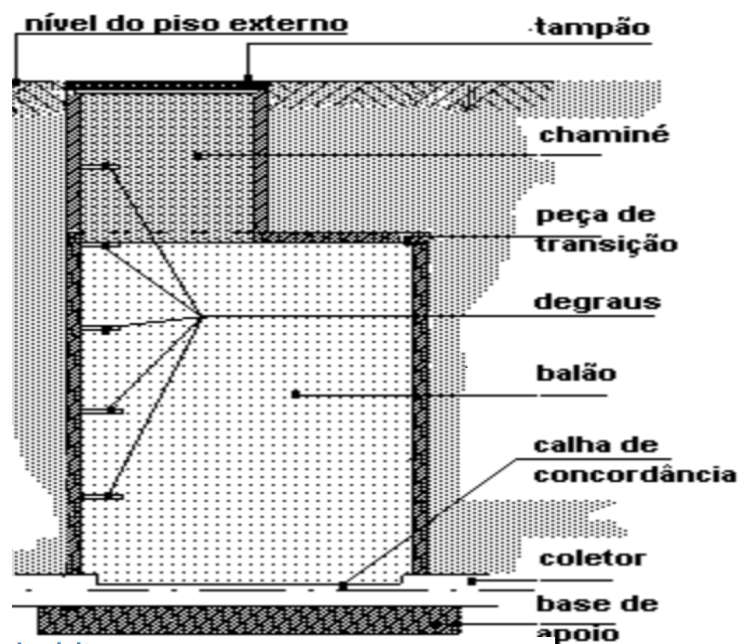


Figura 12 - Poço de visita.

Fonte: [http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/ES08\\_01.html](http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/ES08_01.html)

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.

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, sua formação é explicada e se dá pela sequência a seguir:



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

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

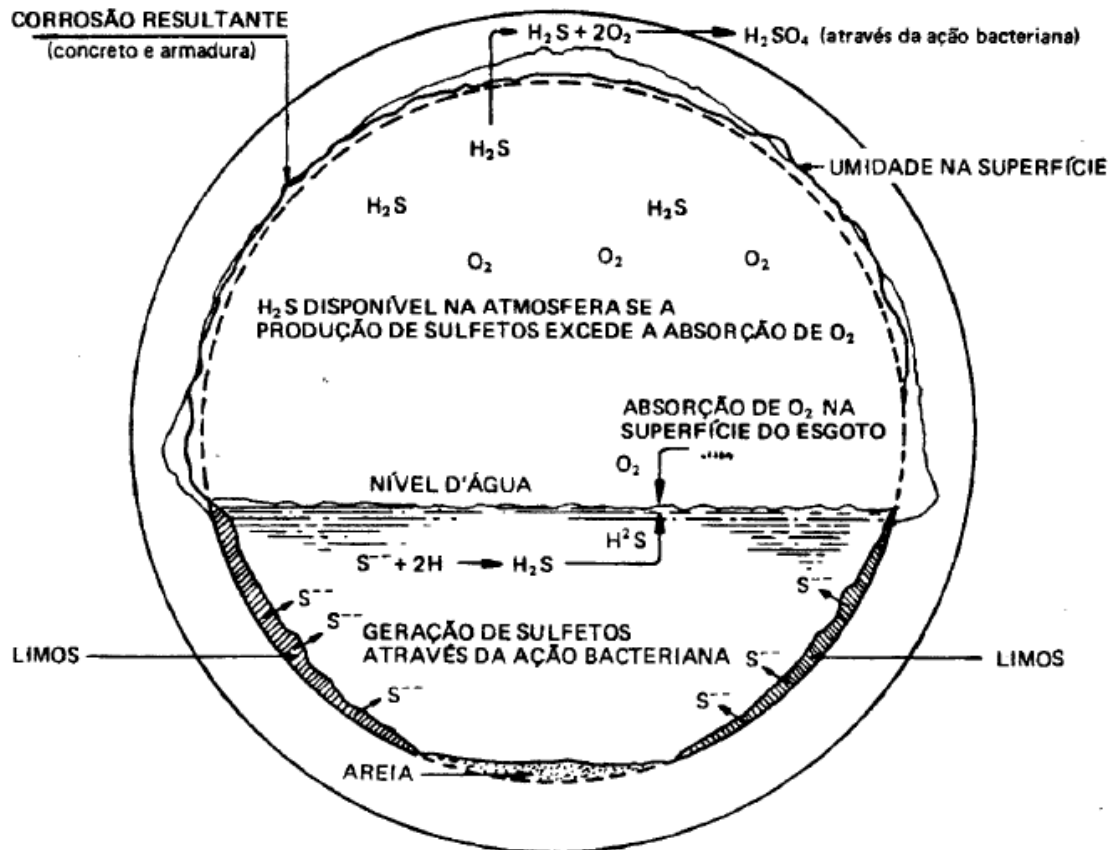


Figura 14 - Processo de formação de ácidos em redes coletoras de esgoto.

Fonte: [www.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/fissuracao/exemplo126.pdf](http://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, da necessidade de materiais mais resistentes às reações específicas que ocorrem em efluentes sanitários, 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.

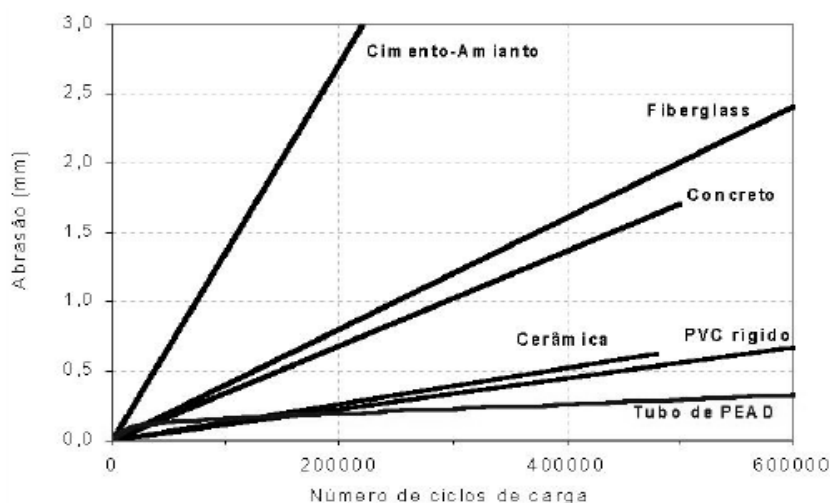


Figura 15 - Gráfico de abrasão por número de ciclos da carga (água com areia).

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

### 3.3.2 ROTOMOLDAGEM

#### 3.3.2.1 TEORIA

Os PVs de polietileno, mostrado na Figura 16, são produzidos através do processo de rotomoldagem que será explanado a seguir.

A rotomoldagem, também chamada de moldagem rotacional ou fundição rotacional, 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 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 mostra o molde real utilizado na empresa Plastisan Plásticos do Nordeste para a produção do PV em polietileno.

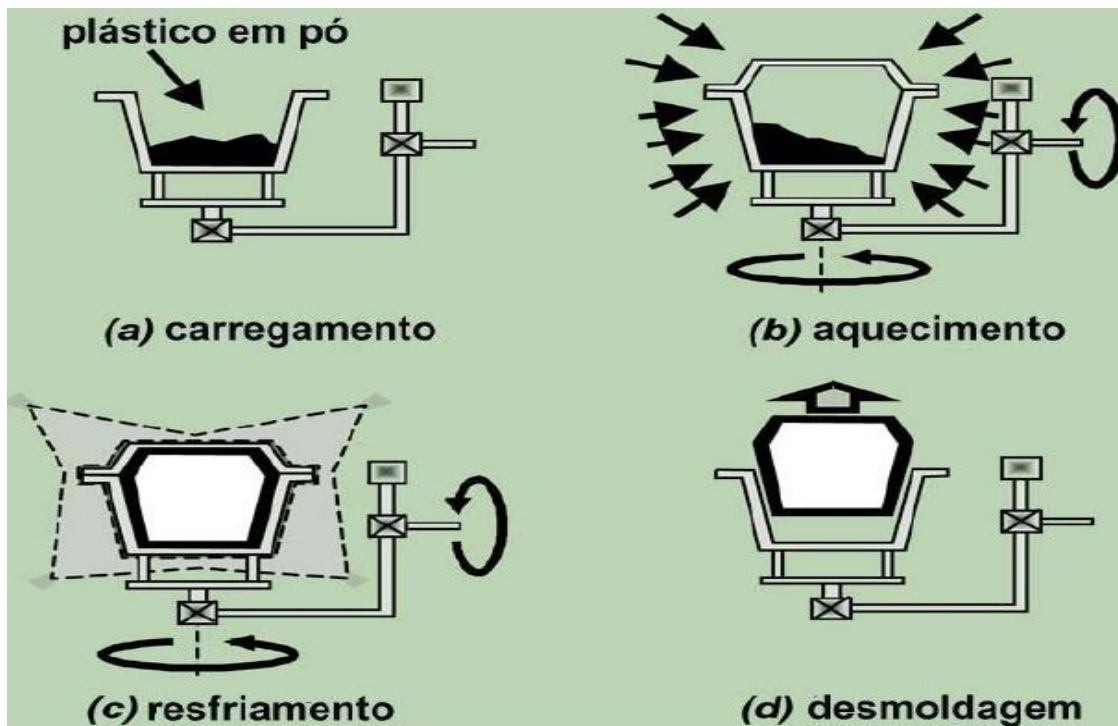


Figura 17 - Etapas do processo de rotolmodagem.  
 Fonte: Rotolmodagem estudo superior.



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.

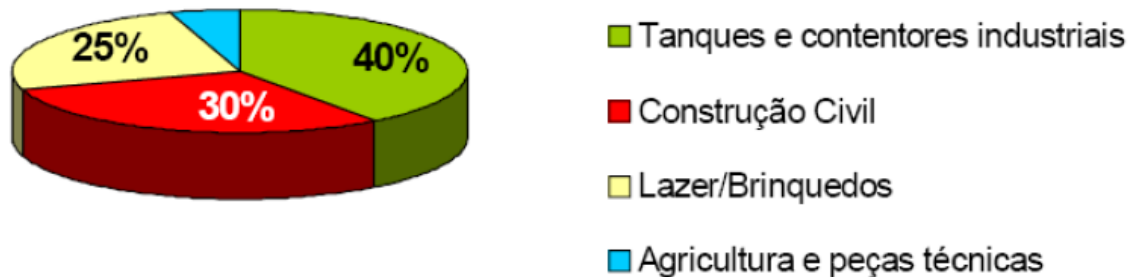


Figura 19 - Consumo dos produtos rotomoldados por segmento.  
Fonte: Rotomoldagem estudo superior.

### 3.3.2.2 PROCESSO DE ROTOMOLDAGEM

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 é a representão 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.

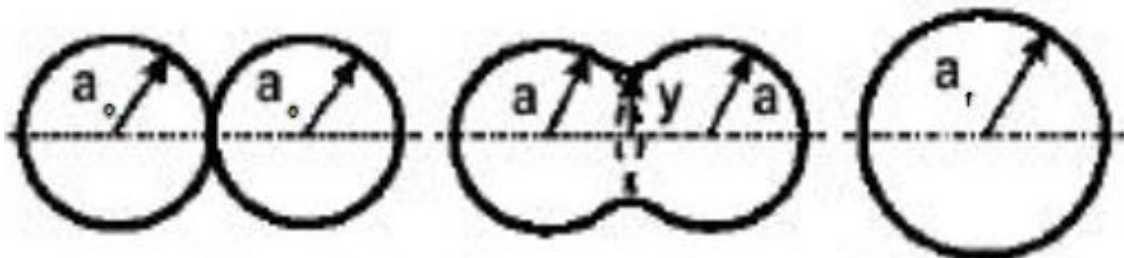


Figura 20 - Processo de coalescência.  
Fonte: Autor.

Com a continuidade do aquecimento as partículas coalescidas fundem, e o ar entre as mesmas é retido, formando-se 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. Podendo indicar desde descontinuidades do material até início e propagação de trincas, deslocamento de contornos de grão, movimentos de discordância, deformações plásticas, entre outras.

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, medida de espessura de materiais e revestimentos e determinação de outras características de materiais e produtos industriais (Soares, 2001)

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.

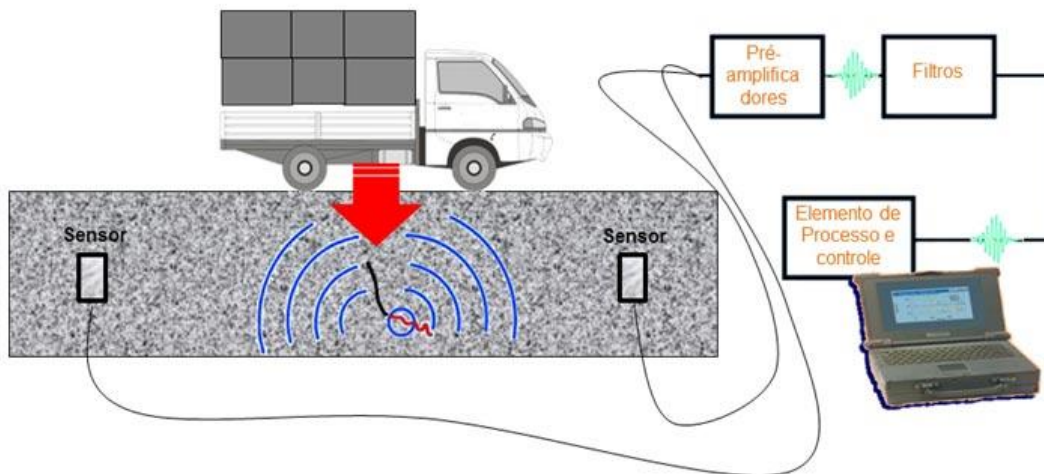
O método de inspeção com a técnica de emissão acústica é capaz de detectar vazamentos em equipamentos submetidos à pressão interna e detectar prematuramente falhas em estruturas permitindo a monitoração constante e em tempo real de estruturas industriais.

Segundo Allevalo 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.

Emissão Acústica é 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 no 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. Eventuais áreas portadoras de defeitos são localizadas através do estudo de cada forma de onda particular.

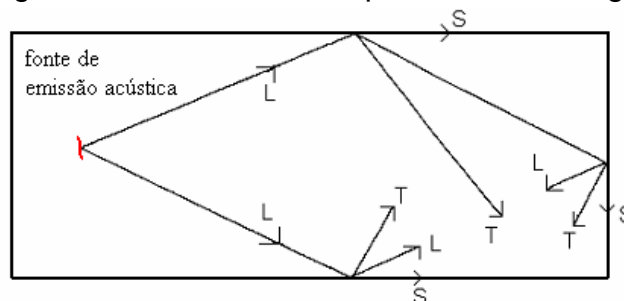
Emissão acústica é definida como um fenômeno no qual ondas elásticas transientes, de frente de onda de forma esférica, são produzidas através de liberação de energia mecânica a partir de uma determinada fonte. (ABNT, 2004)

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.



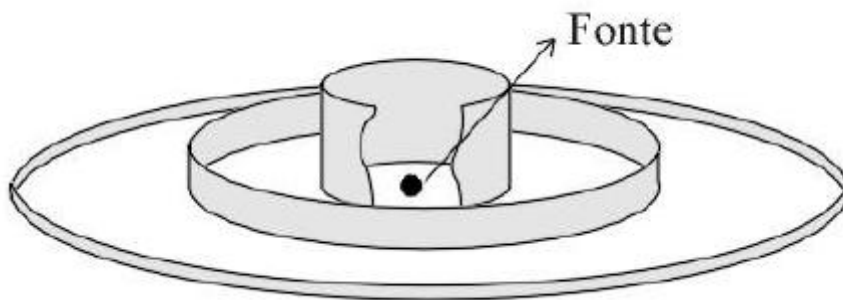
**Figura 22 - Fenômenos de reflexão nas fronteiras do material que contém a fonte de emissão acústica (L, onda longitudinal; T, onda transversal; e S, onda superficial).**  
**Fonte: Soares, 2001.**

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 consequente 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, sendo 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.



Em componentes industriais não existem sólidos perfeitos sem acessórios, tais como: bocais, conexões, penetradores e outras descontinuidades de forma (geométricas). Sinais de emissão acústica propagados neste tipo de estrutura sofrerão interações com os acessórios, resultando em reflexões, refrações e difrações dos sinais. Estas provocarão um decréscimo da amplitude do sinal pelo espalhamento de sua energia no material. Este fenômeno de atenuação é conhecido como espalhamento e difração.

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

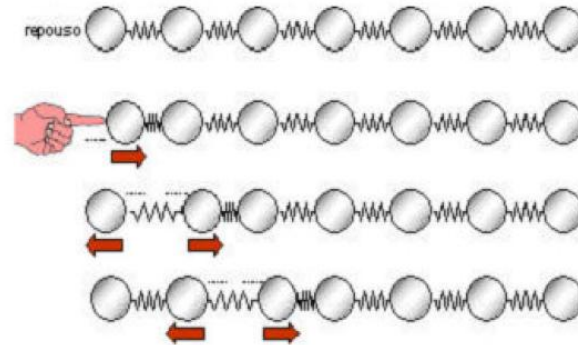
Quando um átomo ou molécula é deslocado de sua posição de equilíbrio por uma força, tensões internas agem de modo a restaurar as partículas à suas posições originais. Devido às forças interatômicas entre partículas adjacentes de material, o deslocamento de um ponto induz o deslocamentos nos pontos vizinhos, 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.

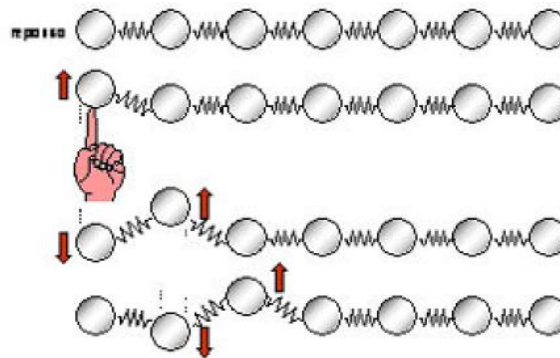
Ondas Longitudinais: (Figura 24) também conhecidas como ondas de compressão, as ondas longitudinais se deslocam no material como uma série de compressões e rarefações nas quais as partículas que transmitem a onda

vibram na mesma direção de deslocamento da onda. São as mais velozes e tem capacidade de se propagar tanto em sólidos, como em líquido e gases.



**Figura 24 - Onda Longitudinal.**  
Fonte: Jacques, 2009.

Ondas Transversais: (Figura 25) 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 - 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.

$$y = A \cdot \text{sen} 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - f \cdot t \right)$$

Equação 1

onde:

$y$ , deslocamento (amplitude);

$x$ , posição;

$t$ , tempo;

$\lambda$ , 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.

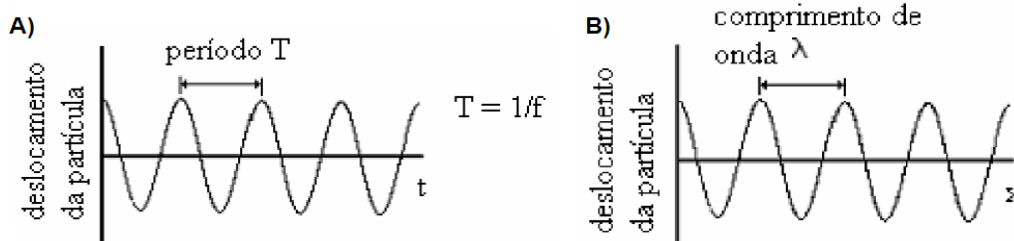


Figura 26 - A) Movimento de uma partícula em função do tempo. B) Movimento instantâneo.  
Fonte: S. Soares, 2008.

Nas figuras 2.3 e 2.4 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,

$\lambda$ , 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.

$$V = V_0 \cdot \exp(-B \cdot t) \sin(\omega \cdot t)$$

Equação 4

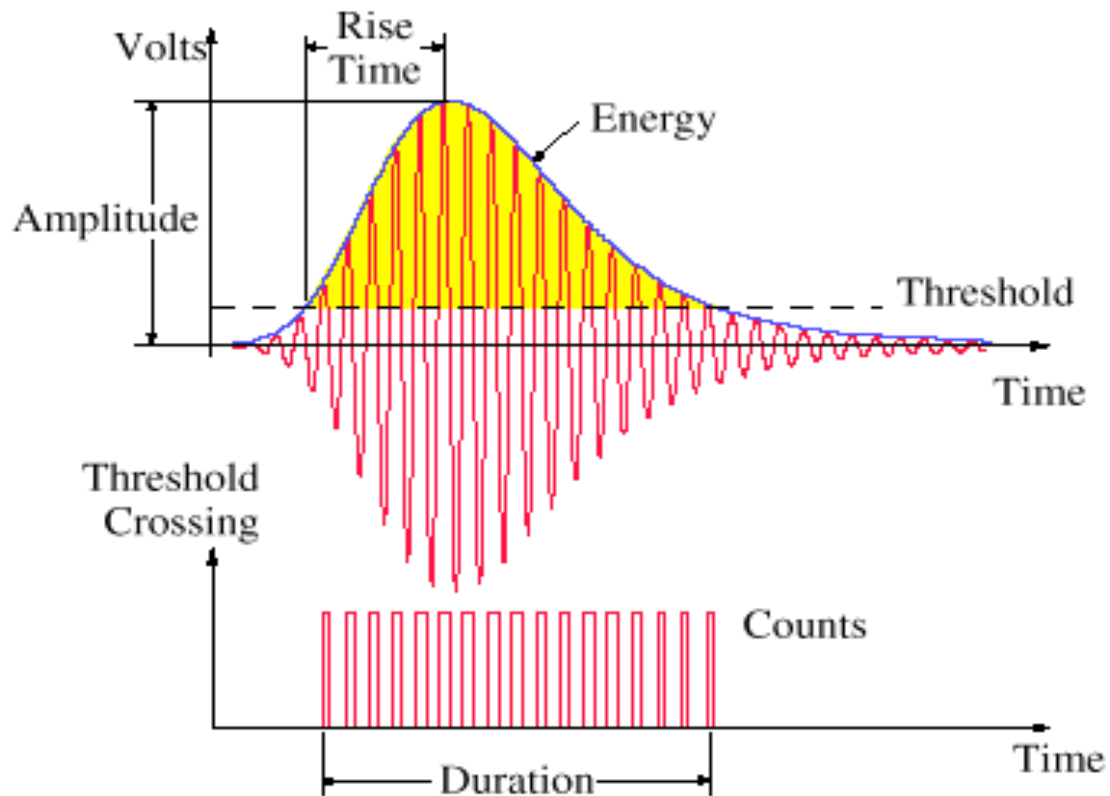


Figura 27 - Sinal de emissão acústica.

Fonte: Autor.

Para a análise dos sinais/ondas/hits de emissão acústica os principais parâmetros considerados, descritos pela (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.

Duração(duration): é o intervalo de tempo entre a primeira e última vez que o sinal ultrapassa o limiar. Expresso em microsegundos ( $\mu$ 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 em que o pico de amplitude é atingido. Expresso em microsegundos ( $\mu$ s).

Energia(energy): É a medida da área retificada do sinal de emissão acústica.

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 ( $dB_{EA}$ ), descrita na Tabela 7.

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.

A escala de decibel em emissão acústica é um caso particular da equação geral para decibel (dB) que é descrita na equação 5.

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

Equação 5

## 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, dispoendo de três PVs, sendo o primeiro descartado para criação de um padrão de falha.

### 4.2 DENSIDADE

O método utilizado para identificarmos 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.

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

$$\rho = M/V \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$\rho$  é a densidade, geralmente expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm<sup>3</sup>);

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 liquido;
- 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 liquido 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 a fratura 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 garantirmos os resultados a serem obtidos.

Primeiro, colocamos um Becker de 100 mililitros na balança, para apoiar os corpos de prova, e taramos a balança. Assim colocamos o corpo de prova dentro do Becker, e registramos sua massa, como apresentado na Figura 28.

Após registrado as massas dos corpos de prova, retiramos o Becker e colocamos a proveta calibrada, registramos a massa da proveta (como apresentado na Figura 28), e inserimos o álcool etílico com o manuseio do macropipetador manual com as pipetas volumétricas de 20 e 10 mililitros cada (utilizando a regra do menisco), afim de imergirmos o corpo de prova dentro da proveta 30 mililitros de álcool etílico, garantindo sua imersão completa.

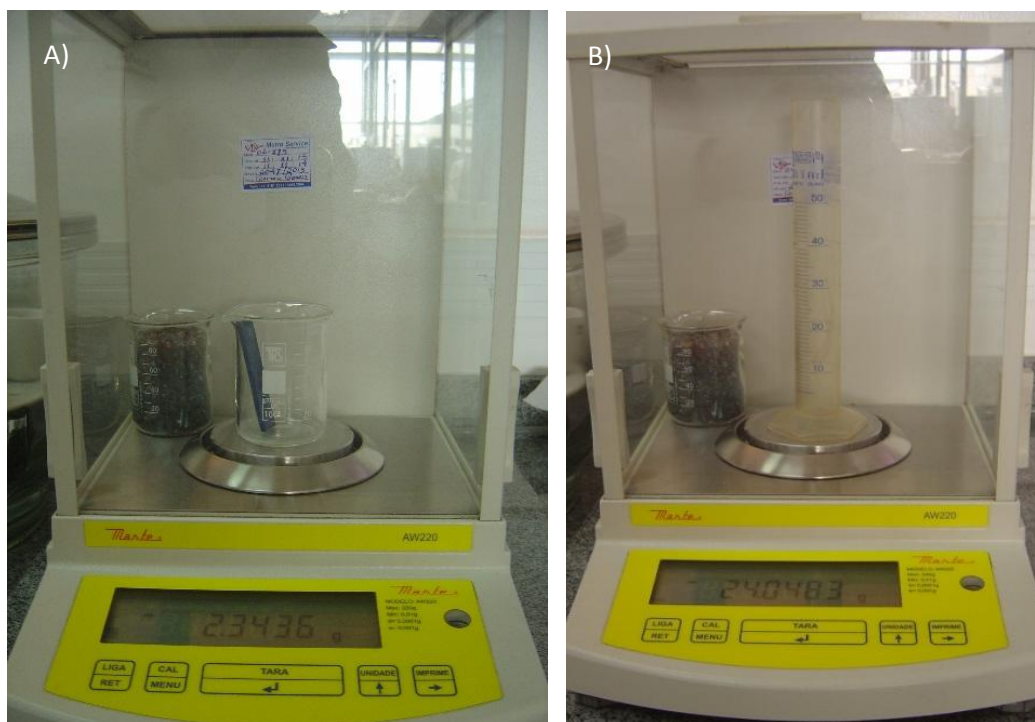


Figura 28 - Medição da massa A) corpo de prova e B) proveta.  
Fonte: Autor.

Assim, sabemos da massa do conjunto vidraria com fluido. Logo determinamos a densidade do líquido ( $\rho_l$ ).

Agora inserimos o corpo de prova dentro da proveta com álcool etílico, na balança, e registramos a massa do conjunto ( $M_{conj}$ ),  $M_{prov}$  com  $M_l$  e  $M_{cp}$ .



Para encontrarmos o volume total do líquido mais o corpo de prova, temos a equação 7:

$$V_{tot} = (M_{conj} - M_{prov})/\rho_l \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

$\rho_l$  é a densidade do líquido, neste caso o álcool etílico (g/cm<sup>3</sup>);

$M_{conj}$  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, sabemos o volume adicionado, que é constante, 30 mililitros. Assim subtraímos  $V_{tot}$  de 30 mililitros, sabendo agora o volume do corpo de prova  $V_{cp}$ .

Conhecidos a massa ( $M_{cp}$ ) e o volume ( $V_{cp}$ ) do corpo de prova, aplicamos a equação 03 para encontrarmos a densidade do corpo de prova ( $\rho_{cp}$ ) com apresentado na equação 8.

$$\rho_{cp} = M_{cp}/V_{cp} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$\rho_{cp}$  é a densidade do corpo de prova, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm<sup>3</sup>);

$M_{cp}$  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 29) 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 8)

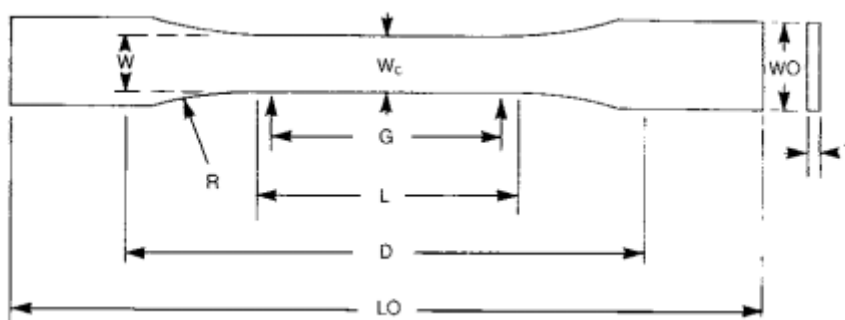


Figura 29 - Corpo de prova para ensaio de tração.  
Fonte: ASTM 638.

Tabela 8 - Medidas para cada tipo de corpo de prova.

Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, $T$ , mm (in.) <sup>A</sup>					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 <sup>B</sup>	Type V <sup>C,D</sup>	
$W$ —Width of narrow section <sup>E,F</sup>	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	$\pm 0.5 (\pm 0.02)^{B,C}$
$L$ —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	$\pm 0.5 (\pm 0.02)^C$
$WO$ —Width overall, min <sup>G</sup>	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
$WO$ —Width overall, min <sup>G</sup>	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
$LO$ —Length overall, min <sup>H</sup>	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	$\pm 0.25 (\pm 0.010)^C$
$G$ —Gage length <sup>I</sup>	...	...	...	25 (1.00)	...	$\pm 0.13 (\pm 0.005)$
$D$ —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) <sup>J</sup>	25.4 (1.0)	$\pm 5 (\pm 0.2)$
$R$ —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	$\pm 1 (\pm 0.04)^C$
$RO$ —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	$\pm 1 (\pm 0.04)$

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, foram ensaiados cinco corpos de prova utilizando-se a máquina de ensaio 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)

A termogravimétrica 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.

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. (Figura 30)

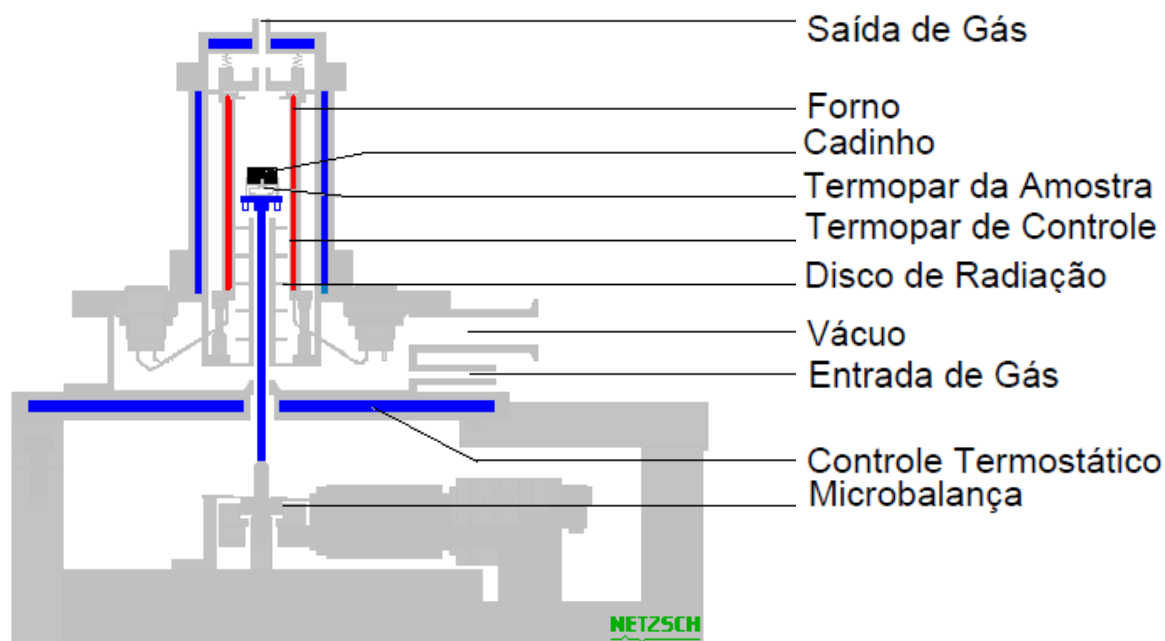


Figura 30 - Representação do equipamento de análise termogravimétrica.

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 [ $\mu\text{V}$ ] correspondente ao aumento da temperatura de ambos os cadinhos no interior do forno devem aumentar linearmente e simetricamente.

Assim, uma curva de  $\mu\text{V}$  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  $\text{mW/mg}$  (miliwatts por miligramas) na abscissa.

O esquema dos equipamentos é ilustrado a seguir: (Figura 31)

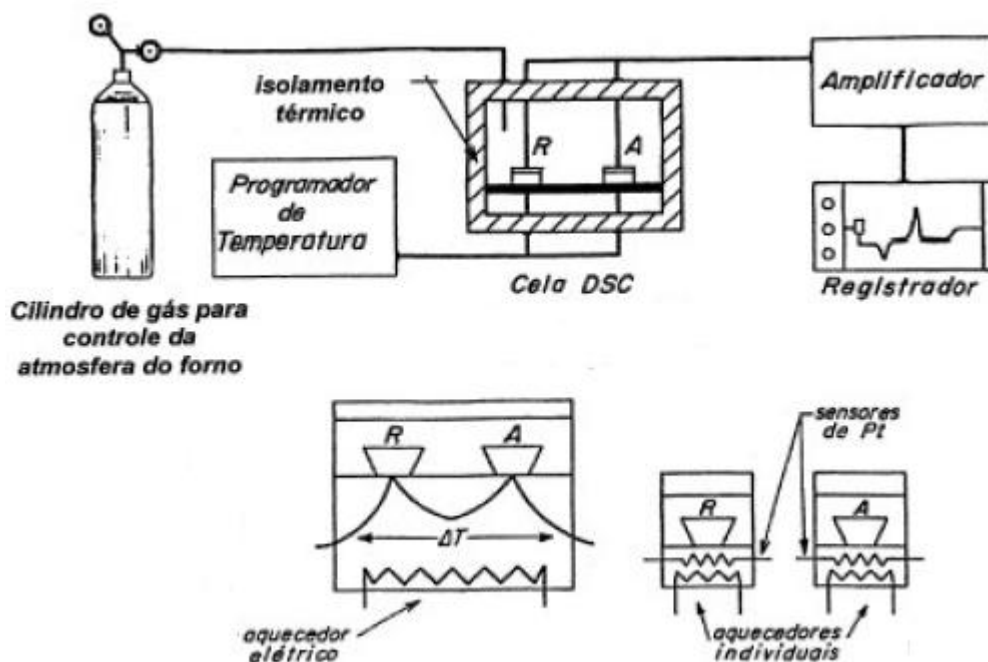


Figura 31 - Representação do equipamento de DSC.  
Fonte: Autor.

O equipamento utilizado foi o DSC Q 20, com taxa de aquecimento de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , numa varredura de  $25^{\circ}\text{C}$  até  $150^{\circ}\text{C}$  em atmosfera controlada de nitrogênio.

## 4.5 Espectrometria infravermelha 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 Infravermelha 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 uma 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  $10000\text{cm}^{-1}$ ). 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  $\text{sp}^3$ , e ligações covalentes C-C.

## 4.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Através do software ANSYS foi feita a simulação computacional do PV a fim de saber quais regiões estão mais sujeitas a esforços durante uma carga de compressão. Foi gerada uma malha automática de bom refinamento na estrutura tridimensional do PV, as cargas horizontais, ocasionadas pelo meio em que se encontra (enterrado sob areia), foram triangularizadas e distribuídas uniformemente em forma de pressão. Devido às exigências do software um suporte foi escolhido, no caso, toda a base não simétrica do PV conforme mostra a Figura 32.

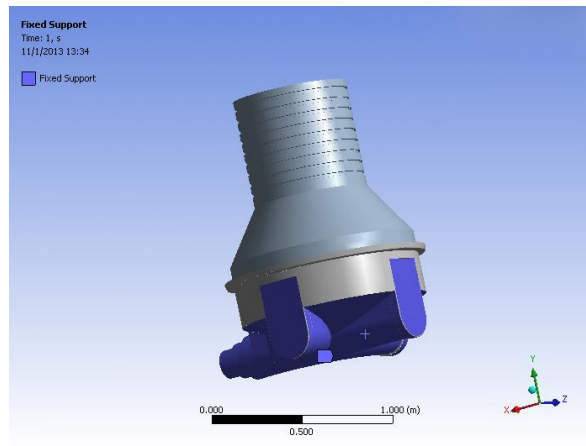


Figura 32 - Seleção da base de sustentação do Poço de Visita.  
Fonte: Autor.

## 4.7 EMISSÃO ACÚSTICA

Foi utilizado o sistema operacional SAMOS multichannel Acoustic Emission system, da Physical Acoustic Corporation, com três 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 30dB, comprimento do hit de 1k (1024 pontos), uma taxa de amostragem de 1MSP/s ( $10^6$  pontos/segundo) e pré-disparo de 256 $\mu$ s.

O módulo de parâmetros 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 33) 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 $\mu$ s até 130ms. Os valores padrões que o equipamento possui são: 200 $\mu$ s para o *PDT*, 800 $\mu$ s para

o *HDT* e 1000µs para o *HLT*. Mas o manual também sugere um valor alternativo para materiais não-metálicos ou compósitos de 20-50µs para o *PDT*, 100-200µs para o *HDT* e 300µs para o *HLT*. O valor adotado neste estudo foi 200µs para o *PDT*, 400µs para o *HDT* e 800µs para o *HLT*.

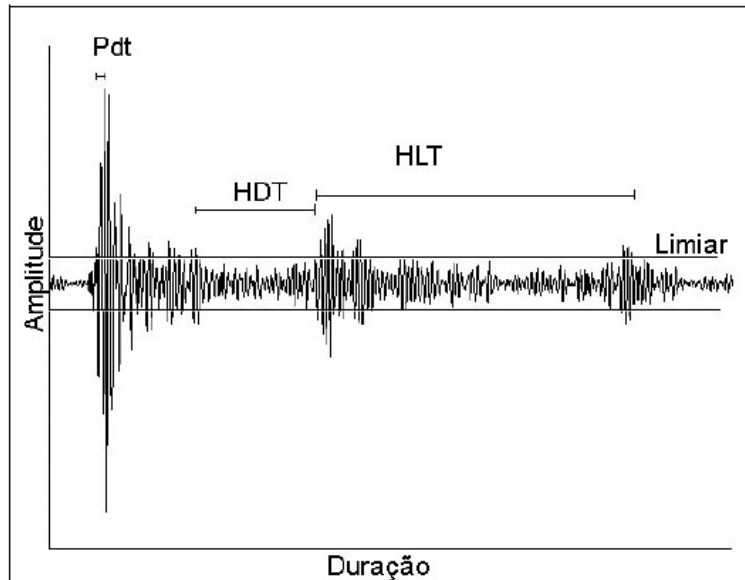


Figura 33 - Parâmetros temporais de aquisição: *PDT*, *HDT* e *HLT*.  
Fonte: Manual Physical Acoustic Corporation, 2005.

## 4.8 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.8.1 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 da 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 ( $C_e$ ) com o módulo de elasticidade ( $E$ ), coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e densidade ( $\rho$ ) do material, como vemos na equação 9 descrita pela teoria das ondas de Lamb.

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

Equação 9



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 34 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 10. Para cada corpo de prova foram feito cinco ensaios, utilizando o valor da média aritmética como resultado.

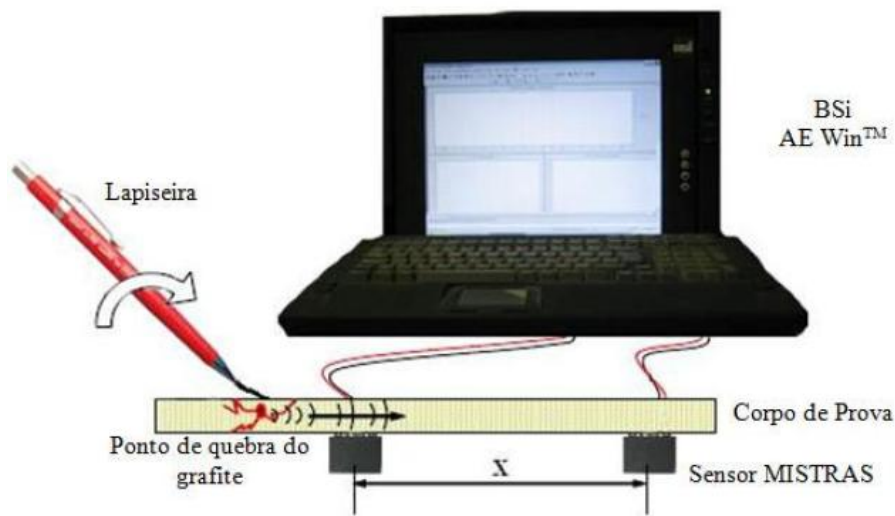


Figura 34 - Ilustração do ensaio para determinação da velocidade de propagação.  
Fonte: Pennafort Jr., 2013.

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

Equação 10

#### 4.8.2 ENSAIO DO POÇO DE VISITA

Nos ensaios de EA normalmente a fonte é o próprio material em teste, mediante a aplicação de um estímulo. Em nosso estudo a fonte será o próprio PV mediante um estímulo. O estímulo será produzido por uma breve aplicação de carga uniaxial de compressão de 350kgf 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. Entretanto, descontinuidades agem como concentradores de tensão, modificando a distribuição de carga no material. Assim regiões com presença de descontinuidades acumulam e liberam uma maior quantidade de energia, portanto estão mais sujeitas a falhar.

A Figura 35 retrata método de ensaio proposto.



**Figura 35 – Método de ensaio do Poço de Visita.**  
**Fonte: Autor.**

Para assegurar a aplicação da força desejada foi feita a averiguação da carga exercida pelo pistão de ar comprimido com uma célula de carga calibrada cedida pelo Laboratório de Metodologia da Universidade Federal do Ceará.



**Figura 36 - Averiguação da carga aplicada pela célula de carga.**  
**Fonte: Autor.**

Para averiguação do PV foi adotada estratégia de varredura zonal com os sensores em linha vertical avançando de 15 em 15cm. A região que apresentar indicação de descontinuidade relevante é averiguada por meio de triangulação, a fim de indicar a localização da fonte de emissão acústica.

Para a definição da localização da fonte em um plano, devemos considerar primeiramente a condição apresentada na Figura 37, onde dois sensores estão posicionados em um plano infinito (Miller, 1987). A posição da fonte será obtida por interações entre as possíveis posições e os tempos de chegada aos sensores, posição esta melhor descrita por uma curva hiperbólica cujo desenvolvimento é apresentado logo abaixo da Figura 37.

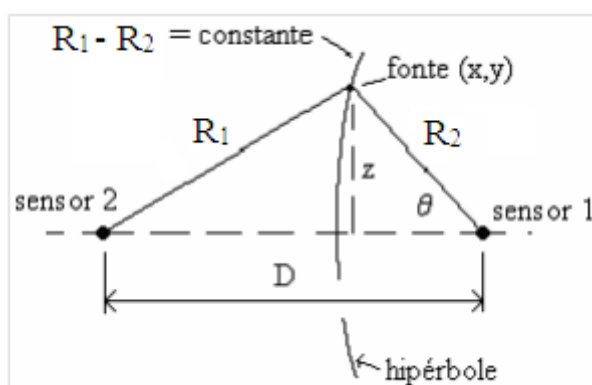
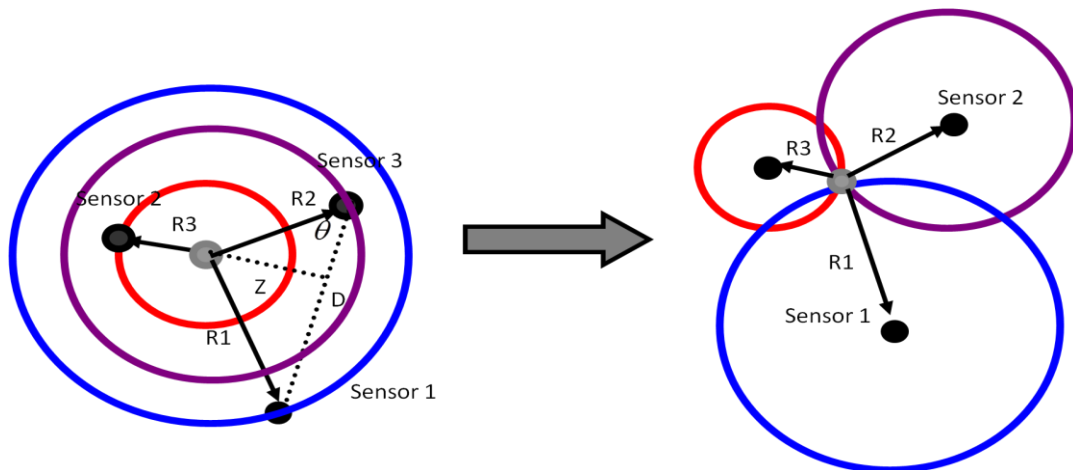


Figura 37 - Localização de fonte de emissão acústica com dois sensores em um plano infinito. Fonte: Miller, 1987.

$$\begin{aligned} \Delta t_{1,2}V &= R_1 - R_2 \\ Z &= R_2 \sin \theta \\ Z^2 &= R_1^2 - (D - R_2)^2 \\ \rightarrow R_2^2 \sin^2 \theta &= R_1^2 - (D - R_2 \cos \theta)^2 \\ R_2^2 &= R_1^2 - D^2 + 2D \cos \theta \\ R_1 &= \Delta t_{1,2}V + R_2 \\ \Rightarrow R_2 &= \frac{1}{2} \frac{D^2 - \Delta t_{1,2}^2 V^2}{\Delta t_{1,2}V + D \cos \theta} \end{aligned} \quad \text{Equação 11}$$

A equação 11 define a hipérbole que passa pela fonte de emissão acústica descrita na Figura 37. Para uma distância entre sensores “D” em um material com velocidade de propagação “V”, sinais com diferença de tempo de detecção “Δt” são localizados sobre a curva descrita pela equação 11. Esta solução de localização não fornece a posição exata da fonte por definir uma órbita hiperbólica a partir de um determinado sensor. A instalação de um

terceiro sensor, com a consequente medição de sua posição e intervalo de tempo de chegada para o sinal oriundo da mesma fonte adiciona mais algumas equações que solucionam a questão da localização da fonte. Na Figura 38 apresenta-se o novo arranjo de sensores para a definição exata da posição da fonte de emissão acústica. Para a solução da localização da fonte utilizamos o mesmo raciocínio descrito para a questão envolvendo dois sensores, basta aplicar ao terceiro sensor. Resolvendo simultaneamente as equações, por meio de interações, o valor de  $R$  é determinado. Pode-se supor que quanto maior for o número de interações, melhor será a precisão da localização da fonte de emissão acústica, porém, o tempo necessário para o processamento do sinal também será maior.



**Figura 38 - Localização da fonte de emissão acústica por triangulação.**  
**Fonte: Autor.**

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 DENSIDADE

Conforme o procedimento anteriormente explanado, obtiveram-se os seguintes resultados:

Tabela 9 - Resultado da densidade indireta.

Amostra	1	2
Volume da proveta	30 ml	
Peso da amostra	1,6993 g	1,9242 g
Peso da proveta	19,4651 g	19,3657g
Peso da Proveta + Álcool:	43,5517 g	43,4306 g
Proveta + Álcool + Amostra:	45,2501 g	45,3539 g
Densidade do líquido:	0,802886667 g/ml	0,802163333 g/ml
Densidade da amostra:	0,803312125 g/cm <sup>3</sup>	0,802538702 g/cm <sup>3</sup>
<b>Densidade média</b>	<b>0,802925413 g/cm<sup>3</sup></b>	

Como se pode observar a densidade do polietileno rotolmodado obteve um valor abaixo do considerado na literatura. Este fato é explicado pela alta porosidade do material associado ao processo de rotolmodagem, resultando em uma menor densidade.

### 5.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO

O resultado do ensaio de tração é apresentado no gráfico da Figura 39 e expresso na Tabela 10.

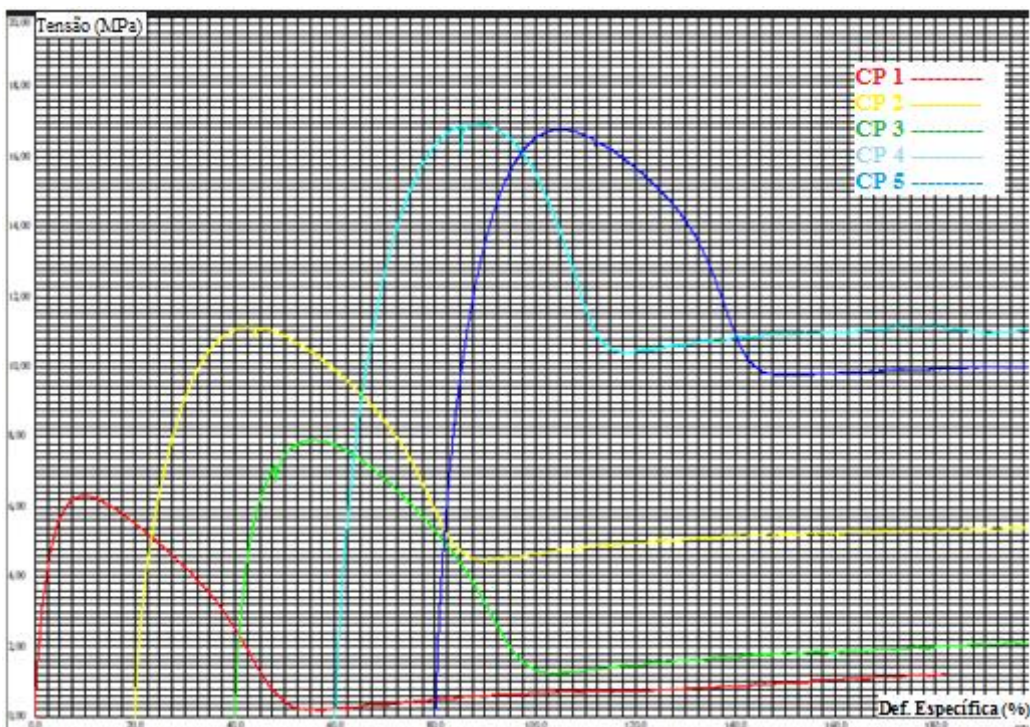


Figura 39 - Resultado ensaio de tração.

Tabela 10 - Resultado do ensaio de tração.

Corpo de prova	Modulo de elasticidade (kgf/mm <sup>2</sup> )	Limite de escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)
1	2,931862	6,3	6,3
2	3,393445	10,7	10,7
3	3,420529	7,9	7,9
4	4,327722	16,95	16,95
5	4,476753	16,8	16,8

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 lógica 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 40 e Figura 41 e as principais informações estão presentes na Tabela 1.

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  $\Delta H_f$  é a entalpia de fusão da amostra e  $\Delta H_f^0$  é a entalpia do polietileno 100% cristalino convencionado com o valor de 290J/g. (Canevarolo Jr., 2006)

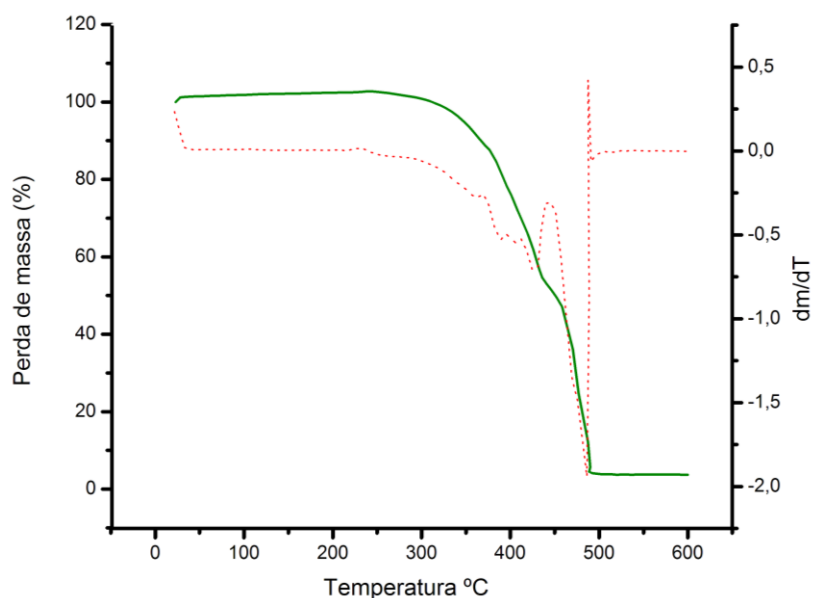


Figura 40 - Resultado da análise termogravimétrica.

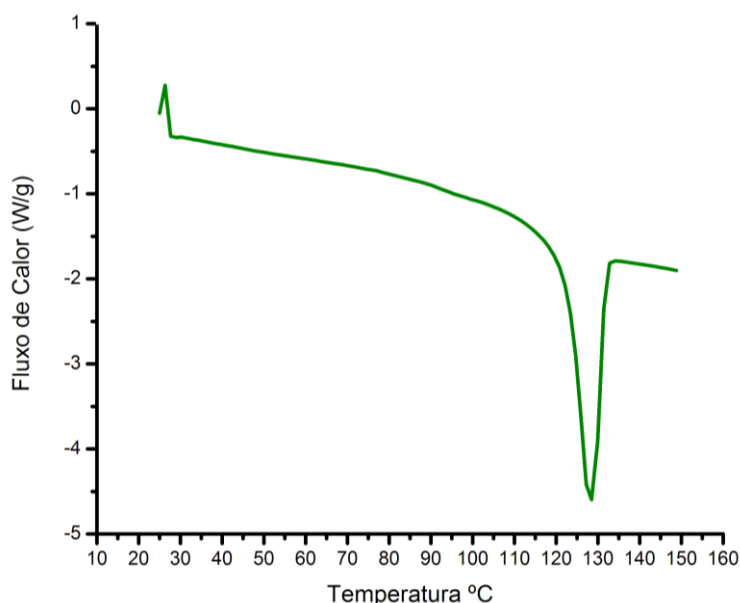


Figura 41 - Resultado da calorimetria diferencial de varredura.

Tabela 11 - Resultado da análise térmica.

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

O resultado da análise termogravimétrica 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 de fusão do material e sua cristalinidade. Pode-se observar o comportamento do material como polietileno de média densidade, apesar de sua baixa cristalinidade, que está atribuída novamente à alta porosidade do material, pois os vazios diminuem o nível de organização molecular do polietileno.

## 5.4 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER

O gráfico de gerado pelo ensaio de FTIR é apresentado a seguir pela Figura 42.

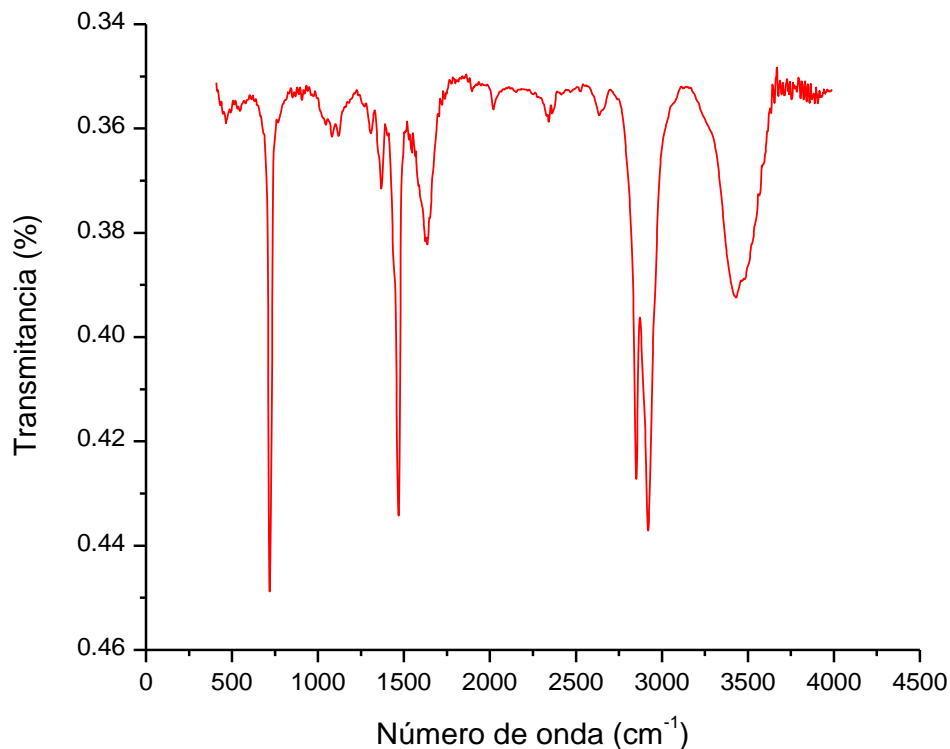


Figura 42 - Resultado da espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier.

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  $\text{cm}^{-1}$ .
- Pêndulo ou “*bending*” por um número de onda entre 1350 e 1450  $\text{cm}^{-1}$ .
- Torção ou “*rocking*”, que tem um número de onda aproximado de 700  $\text{cm}^{-1}$ .

A mesma referência nos indica que a ligação C-C vibra em modo “*stretching*” em um número de onda entre 1000 e 1250  $\text{cm}^{-1}$ . E 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 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O resultado da simulação mostrou que a região mais comprometida em um carregamento compressivo é o tronco inclinado do PV, o resultado está expresso na Figura 43, na qual as regiões em vermelho acumulam maiores tensões.

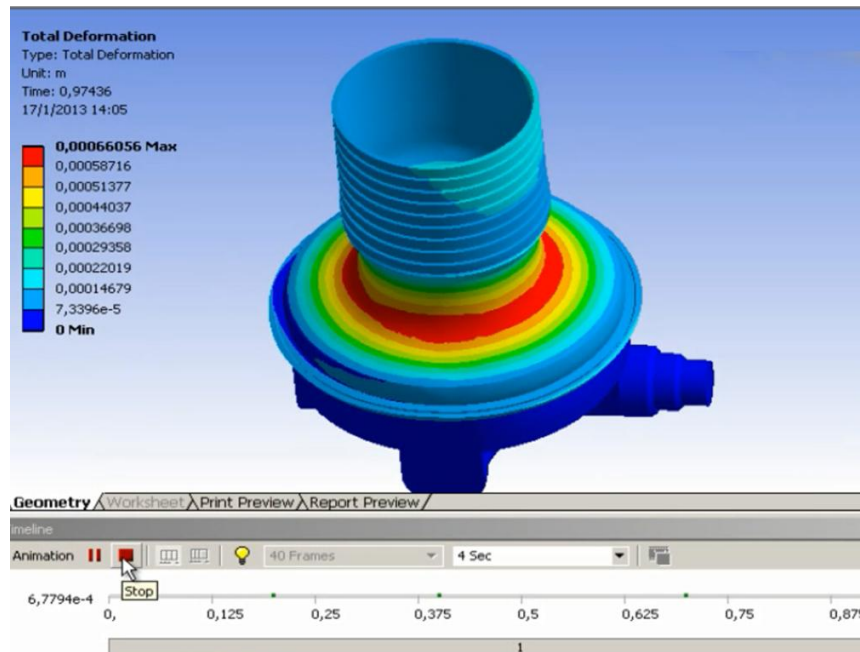


Figura 43 - Indicação das regiões mais comprometidas por simulação computacional.

## 5.6 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. Podemos concluir 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 12 - Resultado da velocidade de propagação. V = velocidade (m/s) e A = atenuação(dB/cm).

	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

Inicialmente foi feita a varredura completa da área cilíndrica ou chaminé do PV 1, com os sensores alinhados verticalmente e com um avanço de 15 centímetros a cada ensaio. (Figura 44) Posteriormente foi feita a varredura da parte cônica, (Figura 45) seguindo mesmo princípio. O resultado é apresentado na Tabela 13, podemos observar que na região cilíndrica ocorreram poucos hits com amplitude superior a 40dB, e a energia máxima atingida foi de 319, entretanto uma região específica foi responsável praticamente por todos os hits de amplitude superior a 40dB, esta é a região onde há a junção do molde e gerou um desnivelamento no PV 1.



Figura 44 - Ensaio de emissão acústica na chaminé do PV na posição 1e na posição 2 (+15cm).

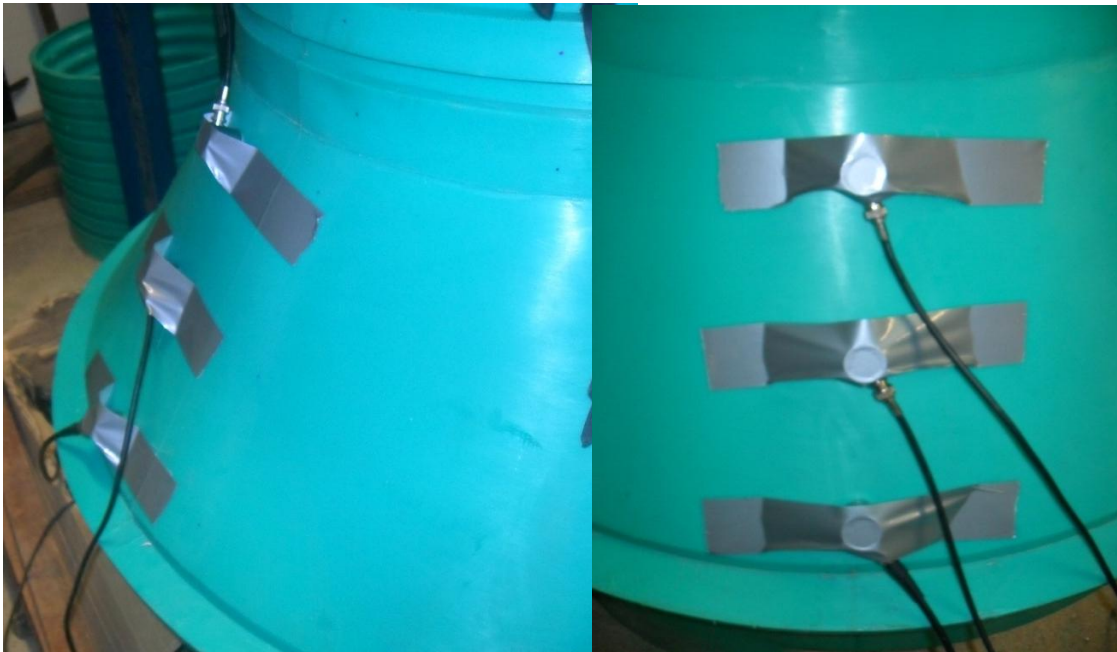


Figura 45 - Ensaio de emissão acústica na parte cônica.

Tabela 13 - Resultado do ensaio de emissão acústica para o PV 1.

REGIÃO	Número total de ensaios	Número de hits por Amplitude				ENERGIA (máximo)
		30 – 35 dB	35 - 40 dB	40 – 45 dB	> 45 dB	
CILINDRO	24	10641	1633	25	0	319
CONE	16	11815	1599	38	11	512

Após término da varredura do PV 1 e análise dos dados gerados por ele, foram adicionados 2 defeitos circulares passantes sendo um na região cilíndrica e um na região cônica, (Figura 46) com dimensões de 18mm e 19mm respectivamente. Na sequência retomaram-se os ensaios de missão acústica seguindo a mesma estratégia. Os resultados são apresentados na Tabela 14.



Figura 46 - Defeitos circulares.

Tabela 14 - Resultado do ensaio de emissão acústica pra o PV 1 com defeito.

REGIÃO	Número total de ensaios	Número de hits por Amplitude				ENERGIA (máximo)
		30 – 35 dB	35 - 40 dB	40 – 45 dB	> 45 dB	
CILINDRO	24	14005	3524	399	59	4064
CONE	16	17334	3724	821	81	8212

O resultado dos ensaios de emissão acústica no PV 1 com a presença do defeito mostra que houve um aumento significativo nos hits de uma maneira geral, assim como da máxima energia detectada, de acordo com o esperado. A diferença entre um ensaio realizado na mesma região sem e com a presença do defeito é mostrada na Figura 47. Na região em volta dos defeitos foram

feitos novos ensaios utilizando agora a triangularização dos sensores para localização da fonte. O método se mostrou eficiente.

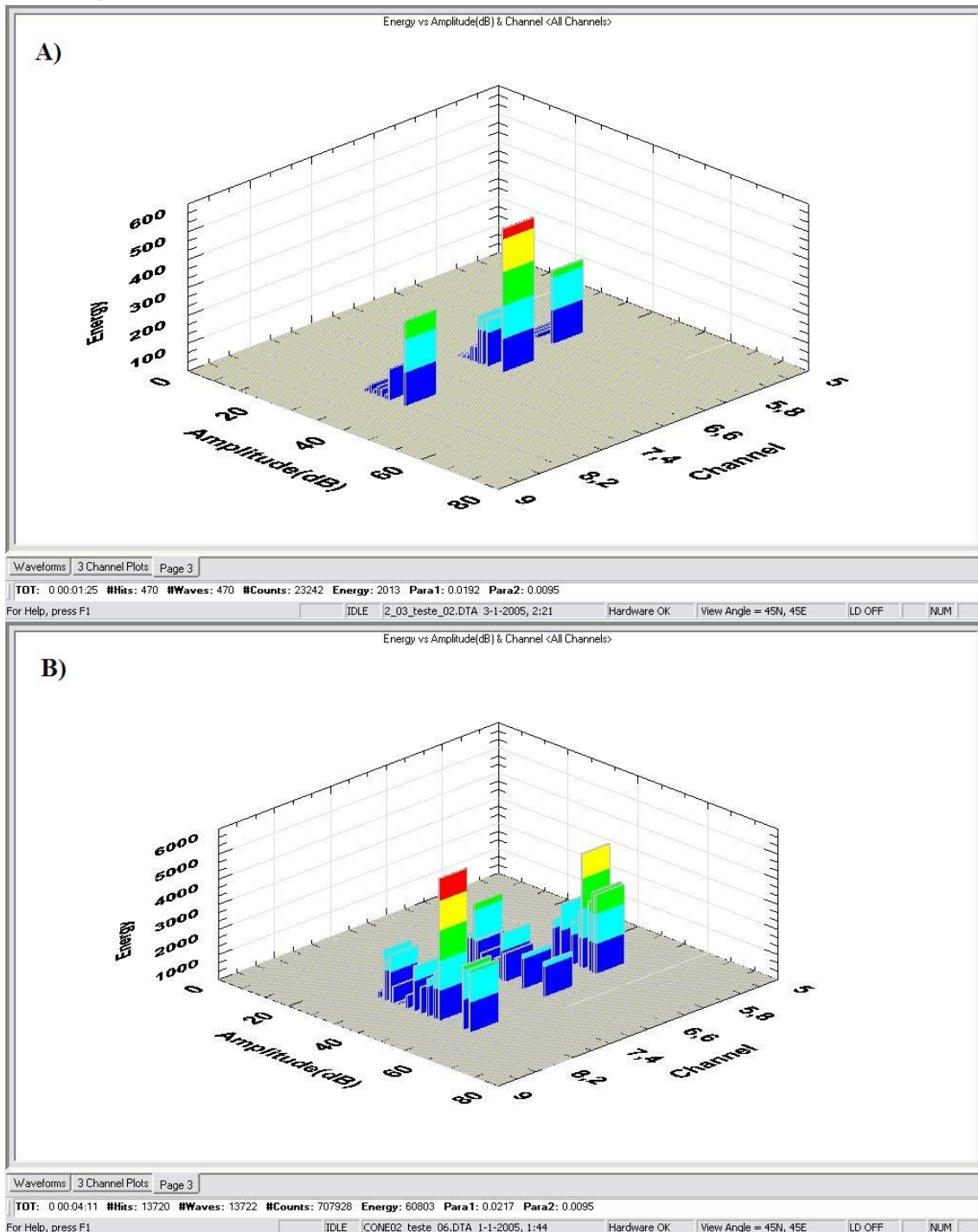


Figura 47 - Gráfico: Energia x Amplitude x Canal, de uma mesma região A) Sem e B) Com defeito.

Dando continuidade foi ensaiado o PV 2. Os resultados estão apresentados na Tabela 15. Na parte cilíndrica não houve nada fora do comum, mas na parte cônica é percebido um número significativo de sinais de alta amplitude e também um alto valor de energia, como se pode observar.

Tabela 15 - Resultado para o ensaio de emissão acústica no PV 2.

REGIÃO	Número total de ensaios	Número de hits por Amplitude				ENERGIA (máximo)
		30 – 35 dB	35 - 40 dB	40 – 45 dB	> 45 dB	
CILINDRO	24	11206	1774	31	0	421
CONE	16	14116	2948	513	46	5283

Para tentar entender a ocorrência desses sinais e/ou localizar sua origem, foi aplicado o método da triangularização para averiguação das regiões mais ativas acusticamente. A maioria das tentativas foi mal sucedida, pois o tempo de chegada dos sinais aos sensores não apresentavam regularidade, mas em uma região examinada o método foi eficaz. O resultado da região bem sucedida é mostra na Figura 48. Nas demais regiões a única indicação que se obteve era de que quanto mais perto do fim do cone e próximo ao anel de sustentação maior era a amplitude e energia dos sinais captados, como mostra a Figura 49. Então se iniciou uma nova etapa que consiste em analisar somente o anel de sustentação com distância uniforme entre os sensores de 15 centímetros.

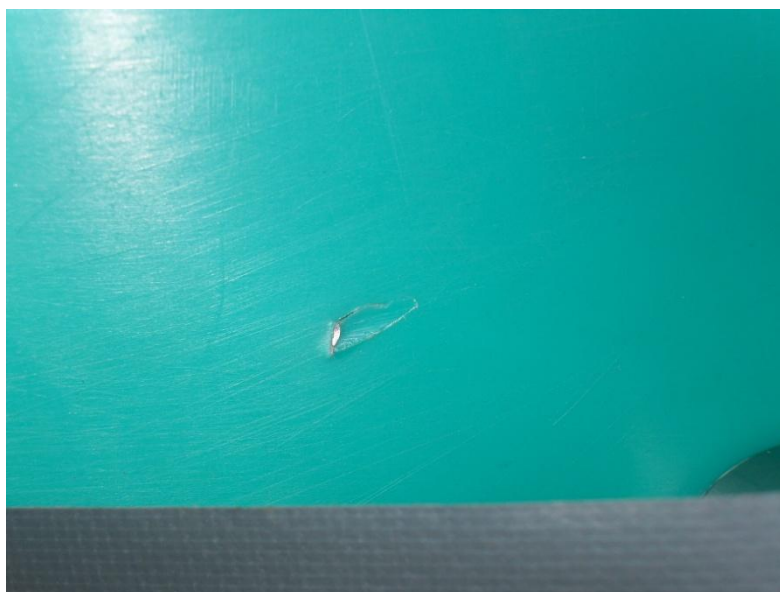


Figura 48 - Inclusão metálica localizada no PV 2.

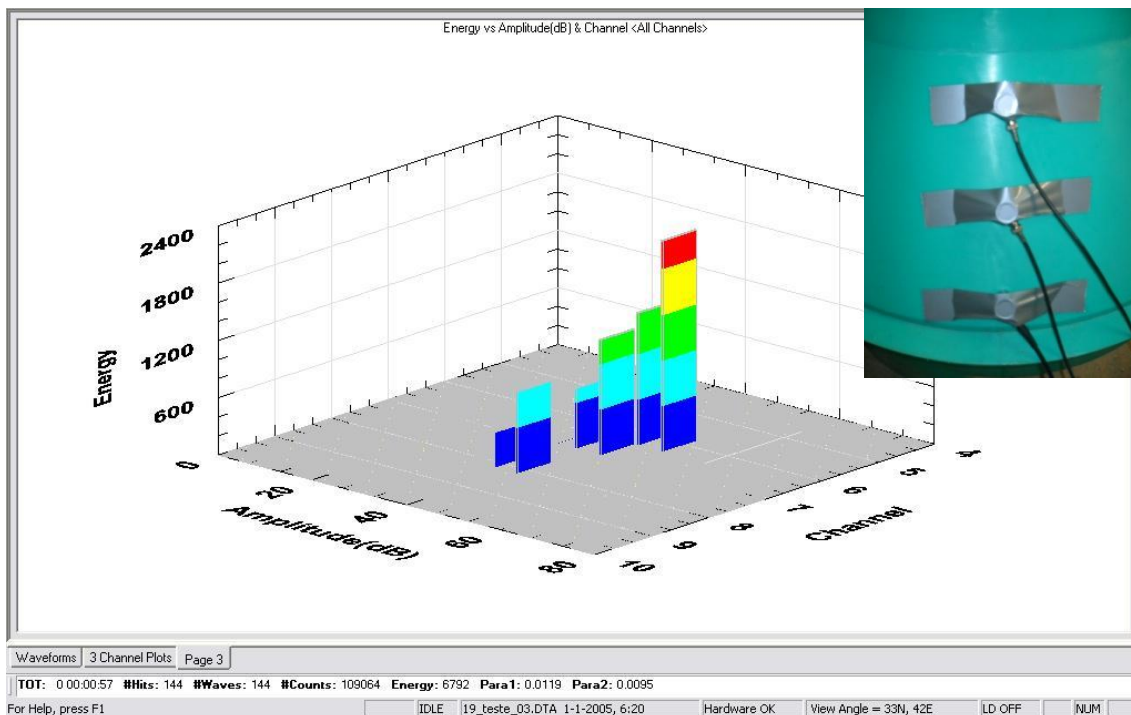


Figura 49 - Sinal gerado na região cônica.

Os resultados dessa nova etapa são apresentados Figura 50 e Tabela 16, mostrando que o anel de sustentação é a região que mais concentra tensões do PV, ou seja, uma região crítica e mais suscetível a falhar por solicitações mecânicas. Após término dos ensaios foi decido averiguar a estrutura interna do PV 2. O resultado foi surpreendente, pois o mesmo apresentou grande variação de profundidade na região interna do anel de sustentação. As regiões internas foram numeradas e medidas. (Tabela 17)

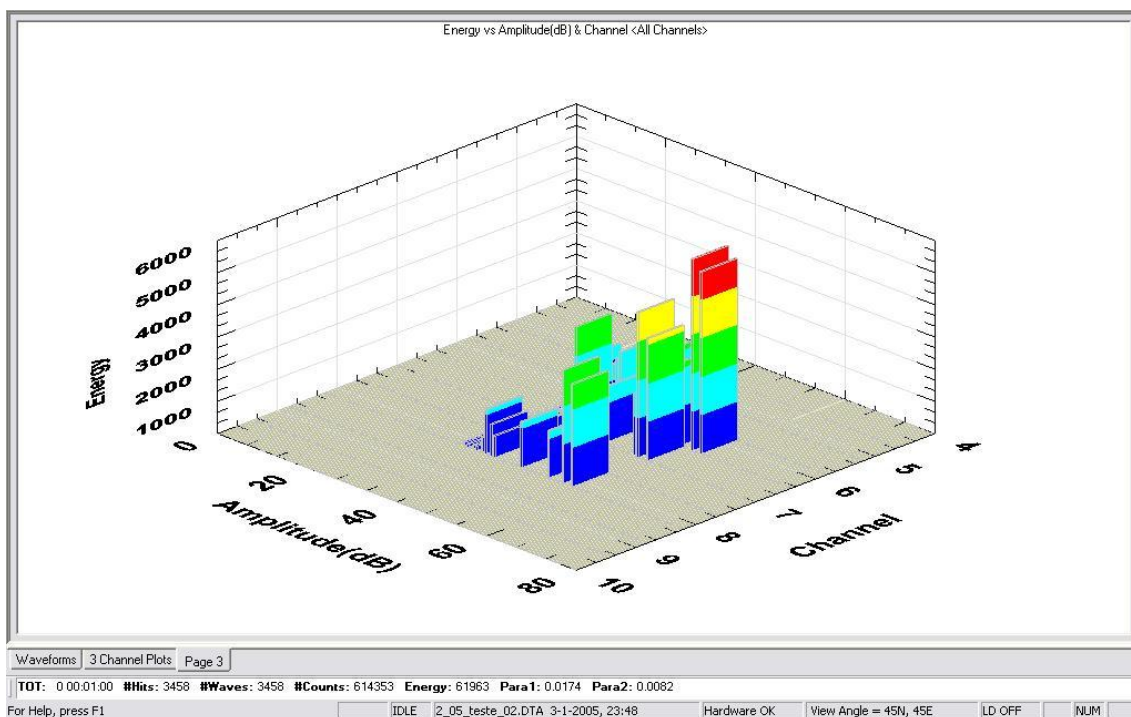


Figura 50 - Resultado do ensaio de emissão acústica realizado no anel de sustentação do PV 2.

Tabela 16 - Resultado do ensaio de emissão acústica feito no anel de sustentação do PV 2.

REGIÃO	Número total de ensaios	Número de hits por Amplitude				ENERGIA (máximo)
		30 – 35 dB	35 - 40 dB	40 – 45 dB	> 45 dB	
Anel	6	3398	1655	253	113	8976

A diferença de profundidade da parte interna do anel de sustentação acaba gerando uma grande diferença de espessura no mesmo, fragilizando e tornando ainda mais crítica essa região. Para evidenciar essa diferença é apresentada as Figuras de 51 a 55.

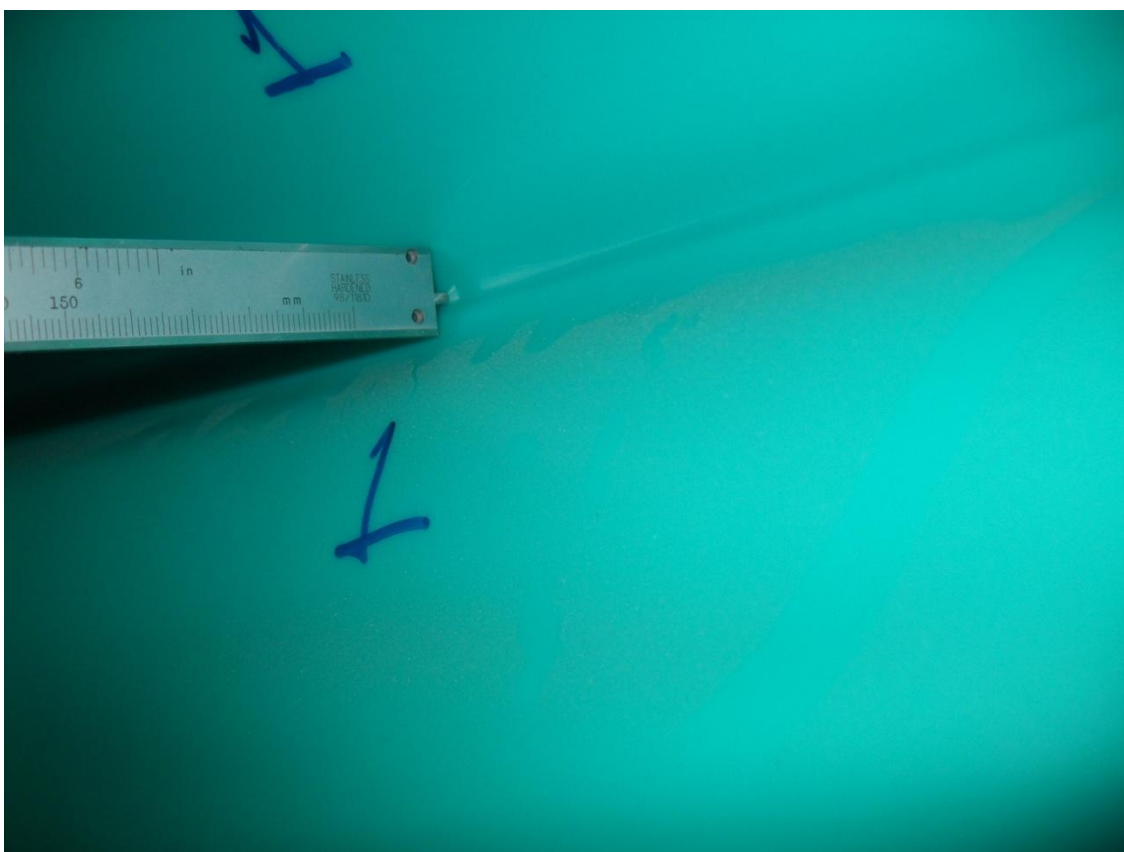


Figura 51 - Região interna 1 do anel de sustentação do PV 2.



Figura 52 - Região interna 2 do anel de sustentação do PV 2.

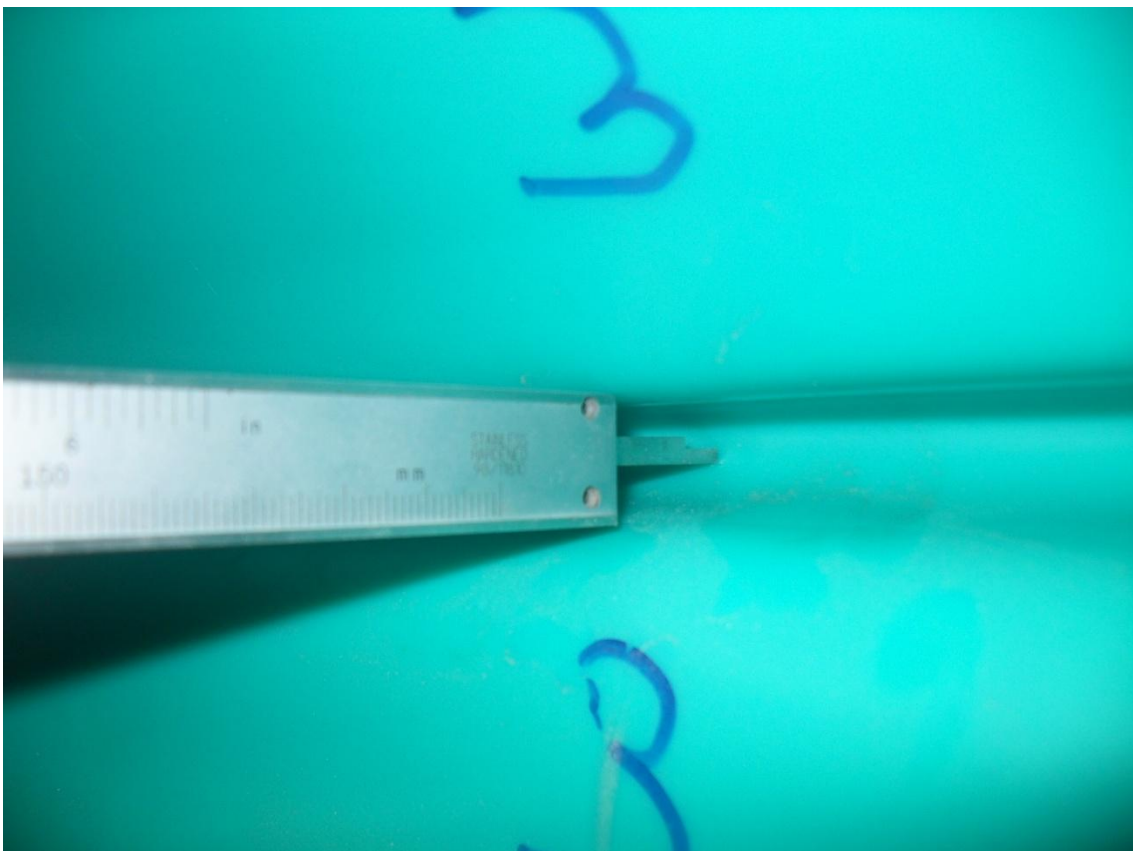


Figura 53 - Região interna 3 do anel de sustentação do PV 2.





Figura 54 - Região interna 4 do anel de sustentação do PV 2.

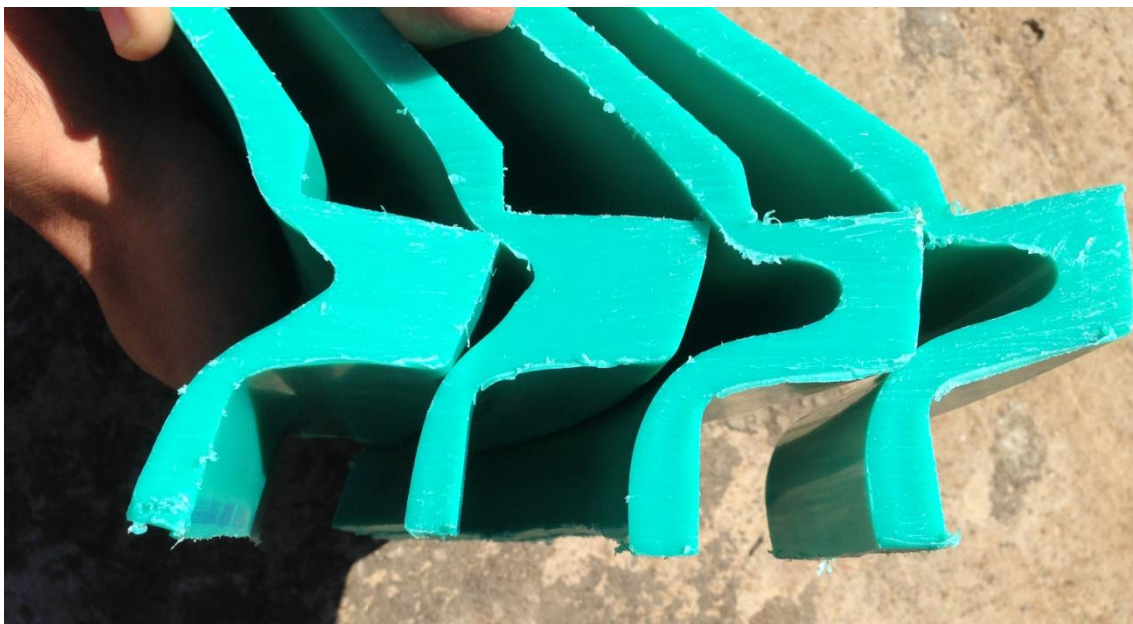


Figura 55 - Comparação entre a profundidade das regiões internas do anel de sustentação do PV 2.

**Tabela 17 - Medição da profundidade das regiões interna do anel de sustentação PV 2.**

REGIÃO INTERNA	1	2	3	4
PROFUNDIDADE (mm)	5,5	18,5	23	11

A medição da profundidade das regiões internas do anel de sustentação do PV 2, estando de acordo com o ensaio de emissão acústica que caracterizou a região, correspondente a região interna 3, como região mais ativa acústicamente.

Dando continuidade ao trabalho foi feita nova simulação computacional levando em conta uma cavidade interna ao anel de sustentação de 15mm. Na sequência foi ensaiado o PV 3 averiguando as 3 regiões. Os resultados de medição das regiões internas do anel de sustentação e de emissão acústica estão na Tabela 18 e Tabela 19.

**Tabela 18 - Medidas das regiões internas do anel de sustentação do PV 3.**

REGIÃO INTERNA	1	2	3	4
PROFUNDIDADE (mm)	4,5	13,5	15	8

**Tabela 19 - Resultado dos ensaios de emissão acústica no PV 3.**

REGIÃO	Número total de ensaios	Número de hits por Amplitude				ENERGIA (máximo)
		30 – 35 dB	35 - 40 dB	40 – 45 dB	> 45 dB	
CILÍNDRIO	24	11422	1672	19	0	322
CONE	16	9791	1650	22	4	451
ANEL	6	2008	1105	131	32	3777

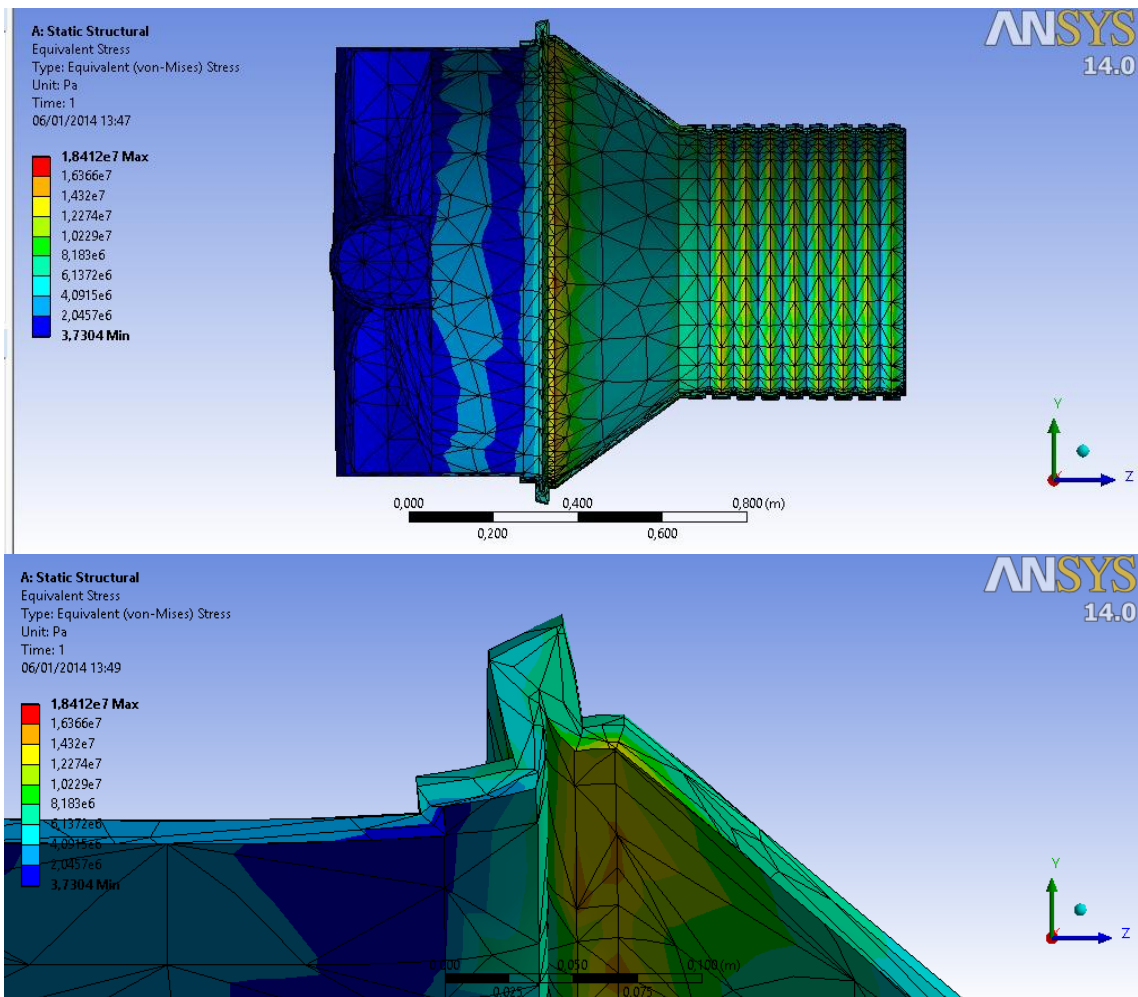


Figura 56 - Simulação levando em conta a profundidade da região interna do anel de sustentação.

A simulação computacional nos mostrou que a região que mais acumula tensão é a parte do e de sustentação. Pode-se observar nos resultados que o PV 3 está de acordo com o padrão de integridade considerado no ensaio do PV 1, apresentando ainda menor número de sinais com amplitude maior que 45dB e menor energia, o que lhe caracteriza como integro estruturalmente. Para fins de comparação é apresentada a Tabela 20.

Tabela 20 - Comparação de resultados.

PV	Região	Número de hits por amplitude				ENERGIA (máximo)
		30 – 35 dB	35 – 40 dB	40 – 45 dB	> 45 dB	
1	CILINDRO CONE	10641	1633	25	0	319
		11815	1599	38	11	512
1*	CILINDRO CONE	14005	3524	399	59	4064
		17334	3724	821	81	8212
2	CILINDRO CONE ANEL	11206	1774	31	0	421
		14116	2948	513	46	5283
		3398	1655	253	113	8976
3	CILINDRO CONE ANEL	11422	1672	19	0	322
		9791	1650	22	4	451
		2008	1105	131	32	3777

## 6. CONCLUSÃO

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

Conclui-se ainda que o método de emissão acústica seja de fato eficaz quanto à avaliação de tensões e concentradores de tensão em um poço de visita de polietileno. E que o PV 3 está pronto para prosseguir na fase de testes quanto à protótipo, podendo inclusive ser implementado para teste real, no que diz respeito a sua integridade estrutural.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- ABNT, N. 1. (2004). *Ensaaios não destrutivos - 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 Ensaaios de Corrosão*. Rio de Janeiro: Petrobrás.
- Callister Jr, W. (1994). *Materials Science and Engineering – An introduction*. New York: Jhon Willey & 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.
- 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](http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/ES08_01.html)
- Ferro, S. (1998). Processo reconquista os transformadores. *Plástico Moderno*.
- J., B. F. (1984). *Textbook of Polyner Science*. USA: Wiley Interscience.
- Jacques, R. C. (2009). *Avaliação de Parâmetros de Emissão Acústica para Monitoramento de Risers Fléxiveis*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 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.
- Miller, R. K. (1987). *Nondestructive Testing Handbook - Volume Five, Acoust emission testing*. Estados Unidos da América: American Society for Nondestructive Testing – ASNT.
- 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.
- 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.

TRM Ltda, T. R. (2007). *Rotomoldagem Prática*. Acesso em 01 de Janeiro de 2014, disponível em [www.trmplasticos.com.br](http://www.trmplasticos.com.br): [www.trmplasticos.com.br](http://www.trmplasticos.com.br)