



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Mestrado em Engenharia Mecânica

Dalton Rocha Amaral

**A RELAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO PARA AÇO
ESTRUTURAL DE BAIXO CARBONO COM SUA RESPOSTA EM EMISSÃO
ACÚSTICA QUANDO SUBMETIDO A ESFORÇOS EXTERNOS**

Belo Horizonte
2015

Dalton Rocha Amaral

**A RELAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO PARA AÇO
ESTRUTURAL DE BAIXO CARBONO COM SUA RESPOSTA EM EMISSÃO
ACÚSTICA QUANDO SUBMETIDO A ESFORÇOS EXTERNOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Jánes Landre Júnior

Belo Horizonte

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

A485r Amaral, Dalton Rocha
A relação do estado de tensão e deformação para aço estrutural de baixo carbono com sua resposta em emissão acústica quando submetido a esforços externos / Dalton Rocha Amaral. Belo Horizonte, 2015.
95 f. : il.

Orientador: Jánes Landre Júnior
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Aço-carbono - Testes. 2. Acústica. 3. Vibração. 4. Deformações e tensões. 5. Análise estrutural (Engenharia). 6. Mecânica de fratura. I. Landre Junior, Jánes. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 620.17

Dalton Rocha Amaral

**A RELAÇÃO DO ESTADO DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO PARA AÇO
ESTRUTURAL DE BAIXO CARBONO COM SUA RESPOSTA EM EMISSÃO
ACÚSTICA QUANDO SUBMETIDO A ESFORÇOS EXTERNOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Prof. Jánes Landre Júnior (Orientador) – PUC Minas

Prof. Pedro Américo – PUC Minas

Prof. Nilton Silva Maia – CEFET MG

Belo Horizonte, 27 de fevereiro de 2015.

*A Deus, a minha família e amigos pelo
incentivo e esmero.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por toda a força, saúde e persistência a nós concedidos para enfrentarmos todos os obstáculos. Sem Ele, nada é possível.

A minha família pelo apoio incondicional para voltar a estudar.

A minha esposa Gláucia pela paciência nos momentos que não pude estar presente e também pelo apoio irrestrito na busca do conhecimento.

A meu filho Victor cuja chegada, dia 09 de março de 2015, serviu de inspiração para que meus esforços tivessem também uma recompensa em forma de amor e afeto.

A todos os professores pelo aprendizado e apoio em todos os momentos necessários.

Especial ao Professor Jánes Landre Júnior pela orientação, incentivo, crédito, persistência e exemplo de profissionalismo que é.

A Vibracon e toda sua equipe que sempre estiveram prontos para me ajudar com a gestão desse projeto.

Especial ao Luís Henrique Maia e Liliane Gade, ambos da empresa Vibracon, que não pouparam esforços para me apoiar e sempre direcionar todo o trabalho para seu foco.

A própria Gerência de Planejamento e Engenharia de Manutenção da Geração da Cemig Geração Transmissão – PO/MG – que atenta sempre para a inovação e o crescimento por meio destes vários projetos de pesquisa e desenvolvimento que estão e estarão sob sua gestão.

Especial ao Jeferson Inácio Lopes que da mesma forma, me apoiou, me aconselhou e sempre melhor direcionou nos momentos difíceis entre trabalho e escola.

Aos nossos colegas e amigos pela troca de informações, experiências, conselhos e companheirismo.

A todos que de forma direta ou indireta ajudaram na realização desta caminhada, no desenvolver deste trabalho rumo a alcançar seus objetivos.

Todo conhecimento se torna ofuscado quando não está aliado a uma boa dose de bom senso. (Dalton R. Amaral, 2014).

As pessoas que dizem não ter mais nada a aprender não atingiram o limite do conhecimento, posto que este provém de fontes inesgotáveis; alcançaram, isto sim, o limite de sua própria competência! (Licínio C. Porto, 2011).

RESUMO

Essa dissertação faz parte de um conjunto de produtos advindos de um projeto de pesquisa, desenvolvimento e inovação – P&D GT 407 – sob o domínio da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e fora concebido por meio da parceria entre as empresas Cemig GT e Vibracon. O projeto trata de um método contínuo de monitoramento preditivo de vasos de pressão onde se busca aplicar uma única técnica para monitorar defeitos em uma fase ainda elementar nestes equipamentos, e conseqüentemente, apontar com a devida antecedência a possibilidade de ocorrência e a localização de falhas futuras no aço estrutural de baixo carbono, objeto do estudo dessa dissertação. A técnica direcionada é a emissão acústica que se torna uma das maiores promessas atuais de técnica de monitoração não destrutiva, demonstra um alto potencial de aplicabilidade e será a tecnologia mais minudenciada em todo o trabalho. Esse trabalho, tem como desígnio desenvolver estudos ligados à área da metalurgia mecânica, mais especificamente do comportamento acústico do material estrutural de baixo carbono quando este é submetido a esforços de tração. Com o apoio de uma placa de aquisição de dados de última geração na coleta dos valores brutos dos sensores de emissão acústica fixados nos corpos de prova, se pode condicionar, executar seu processamento nos diversos modos e ferramentas de análise para convergir futuras conclusões a respeito do comportamento acústico desse material estrutural que é empregado nas mais diversas aplicações no âmbito da mecânica. As implicações oriundas desse documento retratam, portanto, as diversas correlações das curvas de tensão-deformação com os valores globais de emissão acústica e aliado a diversas comparações dos espectros de frequência para cada fase do ensaio de tração: Fase elástica, escoamento, encruamento e ruptura.

Palavras-chave: Emissão acústica. EA. Ensaio de tração. Tensões. Fratura. Aço baixo carbon. Aço estrutural. Comportamento acústico.

ABSTRACT

This work is part of a set of deriving product of a research project, development and innovation - P&D GT 407 - under the rule of the National Electric Energy Agency - ANEEL and was conceived through a partnership between two companies, Cemig GT and Vibracon. The project is a method for predictive continuous monitoring of pressure vessels where the basic idea is to apply a single technique to monitor defects in even elementary stage in these devices, and thus pointing in advance the possibility of occurrence and the location of future structural failures in low carbon steel, the object of study of this dissertation. Acoustic emission is one of the greatest promises of current nondestructive monitoring technique demonstrates a high potential for applicability and will be most detailed technology. With the aid of data acquisition next generation in collecting the raw values of acoustic emission sensors fixed in the plate specimens, condition them, perform their processing in different modes and analysis tools for future conclusions about the acoustic behavior this structural material that is employed in several applications within the mechanics. This work, is intent on developing studies related to the area of mechanical metallurgy, more specifically the acoustic behavior of low carbon structural material when it is subjected to tensile stresses. With the help of the latest generation of data acquisition board to collect the raw values of acoustic emission sensors attached to the test specimens, condition them, perform processing in different ways and analysis tools for future conclusions about the acoustic behavior this structural material that is used in various applications within the mechanics.

The implications resulting from this document reflect, therefore, the different correlations of stress-strain curves to the total values of acoustic emission and combined with several comparisons of frequency spectra for each of the tensile test phase: elastic phase, flow, hardening and rupture.

Keywords: Acoustic emission. AE. Test stress-strain. Fracture. Low carbon steel. Structural steel. Acoustic behavior.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Objetivo geral	18
1.2	Objetivos específicos.....	18
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1	Emissão acústica – EA.....	19
2.1.1	Definições e considerações gerais.....	19
2.1.2	Método de inspeção com a técnica de EA	25
2.1.3	Atenuação de sinais de EA	25
2.1.4	Velocidade de propagação.....	28
2.1.5	Tipos de ondas acústicas nos materiais.....	30
2.1.6	Sensores para detecção de sinais de EA.....	32
2.1.7	Unidade de medida de amplitude.....	36
2.1.8	Características da onda de EA.....	37
2.2	Ensaio de tração.....	44
2.2.1	Implicações	44
2.2.2	Deformação elástica.....	46
2.2.3	Deformação plástica.....	48
2.2.4	Ruptura	48
2.2.5	Gráfico tensão-deformação.....	49
2.3	Tensões atuantes	51
2.3.1	Tensões primárias	51
2.3.2	Tensões Secundárias.....	52
2.3.3	Tensões Localizadas Máximas (Tensões de Pico)	53
2.4	Mecânica da Fratura.....	53
2.4.1	Diagrama de FAD (Failure Analysis Diagram).....	54
2.5	O material – Aço de baixo carbono.....	55
2.5.1	Considerações iniciais'.....	55
2.5.2	Resposta acústica do aço baixo carbono.....	56
3	METODOLOGIA	63
3.1	Fluxograma geral de atividades.....	64
3.2	Resposta da EA nos ensaios de tração monitorados	65
3.3	Cruzamento de dados das curvas de tensão, deformação, EA e tempo com análise dos espectros de frequência.....	68
3.4	Comparação dos maiores valores de amplitude observados nos espectros de frequência.....	68
4	Resultados e discussões técnicas	69
4.1	Dados dos ensaios de tração	70
4.2	Análise do ensaio para velocidade 2 mm/mim	71
4.3	Análise do ensaio para velocidade de 5 mm/mim	75
4.4	Análise do ensaio para velocidade de 50 mm/mim	80

4.5	Análise do ensaio por fase (Inicial, meio e fim)	84
4.5.1	Comparação relativa para a fase elástica e escoamento.....	84
4.5.2	Comparação relativa para a fase de encruamento	85
4.5.3	Comparação relativa para a fase de ruptura	86
4.6	Comparação relativa para todas as fases	87
5	CONCLUSÃO	89
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91

1 INTRODUÇÃO

As técnicas de monitoramento indireto são hoje uma das maiores promessas para a manutenção preditiva. Paradas de produção não programadas para manutenção sempre são onerosas. A maioria das vezes, a falha catastrófica de um equipamento é mais onerosa à linha de produção que uma monitoração constante de um componente crítico.

As vantagens dos programas de manutenção preditiva e preventiva são minimizar reparos e custos com ele, reduzir estoques de peças de reposição, minimizar variações no produto e perda de produção (MIX, 2005).

Hoje existem diversas técnicas de monitoração indireta e não destrutiva com real aplicação industrial. O uso de vibrações mecânicas para monitoramento de rolamentos (CHACON; KAPPATOS; BALACHANDRAN; GAN, 2015), o de emissão acústica em monitoramento de vasos de pressão, o de potência de corte para monitoramento de vida de ferramenta na usinagem, o uso de câmeras termo-sensíveis em transmissores de energia, entre outras são exemplos dessas técnicas.

Aplicar uma única técnica para monitorar falhas em um sistema não é interessante, pois restringe os resultados às limitações da técnica. O princípio de usar diversas técnicas e convergir os resultados é uma tendência global em estudos científicos devido à minimização das limitações na detecção de erros.

A aplicabilidade de vibrações mecânicas, controle de pressão e temperatura são técnicas promissoras no monitoramento de vasos de pressão. Essas técnicas, juntamente com a emissão acústica, convergem para mapear uma série de problemas não contemplada por uma isoladamente.

O uso da emissão acústica, doravante chamada somente pelas iniciais “EA”, é uma das maiores promessas de técnica de monitoração não destrutiva nos dias de hoje. Por suas características, ela demonstra um alto potencial de aplicabilidade em diversos ramos. (GOWID, DIXON, GHANI, 2015)

No caso de detecção de descontinuidades em equipamentos submetidos a carregamentos com pressão interna a experiência acumulada no Brasil permitiu a edição da norma ABNT NBR 13199 para a inspeção de cilindros de armazenamento

de gás e a realização de trabalhos para inspecionar sistemas de tubulação. Pesquisadores estrangeiros têm divulgado trabalhos para detecção e localização em tempo real de fontes de EA em costados de vasos de pressão.

No que tange a construção de vasos de pressão, este procedimento envolve uma série de cuidados especiais e exige o conhecimento de normas e materiais adequados para cada tipo de aplicação, pois as falhas em vasos de pressão podem acarretar consequências calamitosas até mesmo com perda de vidas, sendo considerados os vasos de pressão equipamentos de grande periculosidade. Tais equipamentos podem apresentar defeitos em suas estruturas, sendo elas originadas durante o processo de fabricação ou devido ao uso do equipamento. A possibilidade de ocorrerem falhas em equipamentos com tais características ou responsabilidades faz das trincas o tipo de descontinuidade mais preocupante. E leves defeitos ou trincas incipientes em equipamentos pressurizados podem evoluir de tal forma a gerar falhas catastróficas.

A técnica de EA por estar se tornando uma das principais técnicas para a detecção de falha prescinde de uma investigação mais detalhada, não apenas da técnica em si, mas principalmente no conhecimento das variáveis que são coletadas por esta técnica quando emitidas pelos materiais envolvidos.

1.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento dinâmico acústico de um aço estrutural de baixo carbono quando submetido a esforços externos de tração.

1.2 Objetivos específicos

- Estudar a técnica de EA como ferramenta de manutenção preditiva;
- Verificar a resposta de EA durante o ensaio de tração;
- Cruzar dados da curva tensão-deformação a EA
- Verificar os pontos de maior valor eficaz (global) e avaliar as frequências

envolvidas em EA;

- Comparar a resposta de EA em um aço baixo carbono para diferentes condições de operação do ensaio de tração.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Emissão acústica – EA

2.1.1 Definições e considerações gerais

EA foi definida como um fenômeno onde ondas elásticas transientes são geradas por rápida liberação de energia mecânica a partir de fontes localizadas em um material ensaiado (ABNT, 2004). Fontes de EA incluem os mecanismos de deformação e fratura, tais como: crescimento de trincas, movimento de discordâncias, maclação, deslocamento de contornos de grão, fratura e de coesão de inclusões (MILLER, 2006). Vazamentos oriundos de recipientes pressurizados tais como vasos de pressão e tanques de armazenamento também geram sinais detectados e classificados como EA. (PASA, 2012)

Desta forma, a EA se caracteriza por uma onda vibracional de alta frequência produzida na rede cristalina do material devido a rearranjos na sua estrutura interna (MAIA, 2009). A maioria dos materiais quando excitado de alguma forma produz ondas de EA e a sua captação só depende da sensibilidade do sistema de aquisição (BARANOV et al. 2007).

Quando ocorre uma deformação no material (modificado por corte, atrito, trincas, entre outras) ocorre um desarranjo da estrutura do material que tende a rearranjá-los, esses rearranjos geram ondas vibracionais que deslocam a velocidade do som, daí o nome de EA. Estes sinais são captados por meio de um sensor piezoelétrico que transformam sinais mecânicos em sinais elétricos.

Segundo Li (2002), EA é uma onda de som ou, mais propriamente, uma onda de tensão que viaja por meio do material como resultado de alguma repentina

liberação de tensões de energia.

Geralmente o monitoramento de um equipamento qualquer gera sinais discretos, que a olho nu, não se consegue visualizar muita coisa. A aparente continuidade do processo é resultado de uma série de eventos unitários isolados. Um evento unitário em um sólido conduz a sua deformação que por ser muito pequena é incapaz de ser registrada. Contudo, um grande número de eventos unitários forma uma sequência de eventos que pode causar um fenômeno macroscópico que muda significativamente o estado de energia do sólido. Quando alguma energia é liberada, parte é emitida como onda elástica. O aparecimento dessas ondas é a EA.

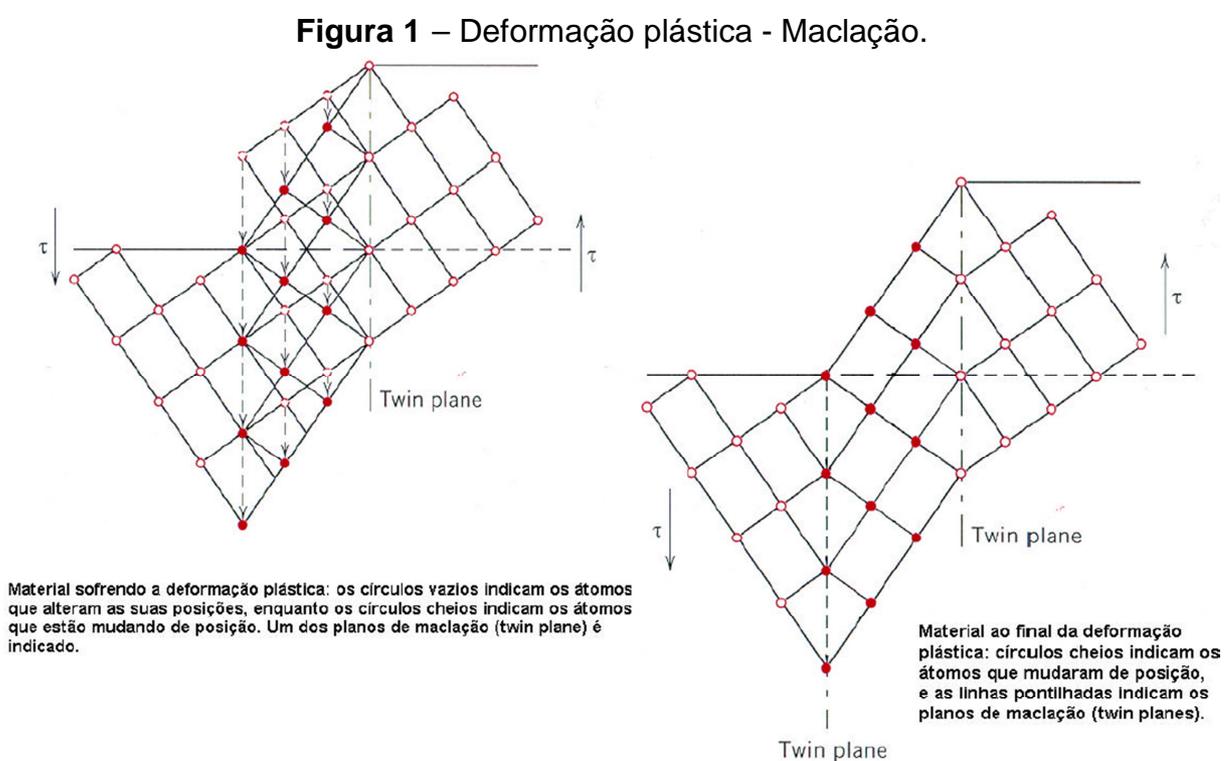
Os primeiros estudos de EA começaram com Obert e Duvall em 1930 e 1940 nos Estados Unidos tentando prever erupções vulcânicas com detecção de efeitos micro sísmicos na faixa do sub-audível. Esse trabalho usou cristais piezelétricos como sensores com um ganho de 80-100 dB, como agora é comum, só que limitando a frequência na faixa de 150 a 10.000 Hz (DUKES; CULPAN, 1984).

Kaiser (1950) publicou o primeiro trabalho sobre EA em metais. Em seu trabalho ele usou carregamentos em diversos metais monitorando os sinais de EA. Ele assumiu que a EA foi proveniente de tensão induzida relativa ao movimento de contorno de grão. Embora tal movimento possa vir a dar origem a um sinal de EA, estudos posteriores em monocristais provaram que estes eram fontes de vastas energias que dão origem ao sinal de EA (DUKES; CULPAN, 1984).

A grande contribuição de Kaiser (1950) em seu estudo foi o fato dele ter observado que os sinais de EA devido a um carregamento eram irreversíveis. Para que houvesse mais geração de EA o corpo deveria ser carregado com uma carga maior que a primeira leitura, fato que hoje é conhecido como efeito Kaiser.

Após o trabalho de Kaiser, Schofield (1961) estudou diversas ligas policristalinas e também monocristais com o intuito de conhecer as fontes de EA. Ele foi quem diferenciou os sinais contínuos e transientes ou de picos na EA. Os sinais contínuos eram associados com a dinâmica de deslocamentos, embora o termo contínuo possa ser um equívoco e possa estar associado a um grande número de eventos discretos em um curto período de tempo. Schofield associou os sinais transientes ou de pico com falhas de empilhamento dos planos e com a maclação. Acontece que além desses a nucleação e a propagação de trincas também estão associadas a este tipo de sinal.

Na metalurgia, o primeiro fenômeno estudado foi o “grito” devido à formação de maclação em uma fina chapa de latão devido à deformação plástica. A macla é um tipo de defeito cristalino que pode ocorrer durante a deformação plástica. A maclação ocorre em um plano cristalográfico determinado segundo uma direção cristalográfica específica. Tal conjunto plano/direção depende do tipo de estrutura cristalina. Deformação por maclação é um mecanismo importante na deformação plástica principalmente a baixas temperaturas e em altas velocidades de deformação. O esquema da Figura 1 destaca:



Fonte: USP, 2005

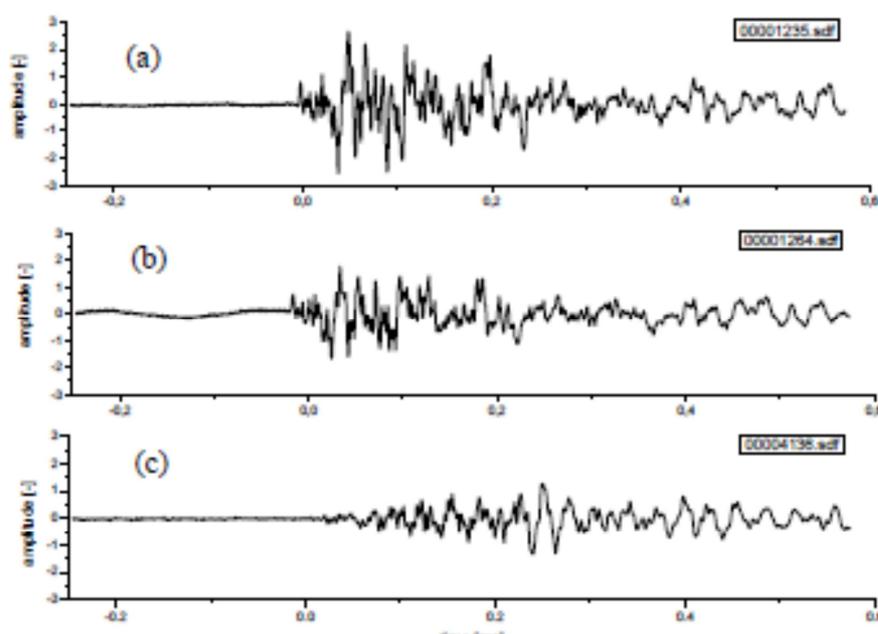
Iniciação e crescimento de trincas, abertura e fechamento delas, coalescência de vazios (união de vazios que se achavam separados), maclação, movimentos de discordâncias, mudanças de fase, todas são fontes de EA em aços (LÉDECZI et al., 2009). Transformações de martensita também são acompanhadas de um ruído característico (GROSSE, 2008).

Muitas das fontes de EA são relativas ao dano (MAILLET, MORSCHER, 2015). A detecção e o monitoramento dessas fontes são comumente usados para

prever falhas (MILLER, 2006).

Os sensores usados para testar integridade em vasos de pressão metálicos usam uma faixa de frequência de 100.000 a 300.000 Hz. Essa é a faixa de frequência excitada pela maioria dos sistemas sujeitos a falhas por trincas. A Figura 2 demonstra sinais de EA de uma aquisição feita em uma estrutura submetida a um carregamento estático. Nela se vê a alteração do sinal provavelmente devido a movimento de deslocações e coalescência de vazios (GROSSE, 2008).

Figura 2 – Sinais de EA em uma barra de aço AISI 1020 submetida a um carregamento estático.



Fonte: GROSSE, 2008 (foco comprometido na imagem original)

A associação da técnica de EA com outras se mostram interessantes na potencialização da sensibilidade desse método. Maia (2009) associou EA e vibrações na detecção de desgaste de ferramenta no fresamento e encontrou resultados interessantes.

A grande vantagem da técnica de monitoração por EA está na faixa de frequências produzida pela excitação que é acima de 10.000 Hz, que foge de diversos ruídos oriundos de interferências e a maleabilidade da técnica que pode ser aplicada em diversas áreas e equipamentos.

A aplicação da técnica em máquinas de corte rotativas apresenta bons

resultados no monitoramento de vida de ferramenta. Maia (2009) desenvolveu todo o estudo comparando resultados vibracionais e de EA na qualidade de superfície e vida de ferramenta do fresamento conseguindo resultados satisfatórios em ambas as técnicas.

Testes de EA podem substituir os testes hidrostáticos e o exame visual interno em vasos de pressão, em casos previstos na NR13 (2014). O uso da técnica em monitoramento de vasos de pressão já é uma realidade e demonstra uma alta eficiência da técnica em visualizar aparecimento de trincas e suas propagações.

Mas a técnica exige cuidado, principalmente em vasos de pressão, onde o fluxo de gases e vapores condensados podem dar um “falso positivo” às falhas que podem não ter ocorrido.

Apesar disso, a técnica é cara e devido à complexidade e a quantidade dos defeitos, poucos são os estudos sobre ela no Brasil e até mesmo mundo, fato que motivou este estudo.

Hoje, os equipamentos que monitoram os vasos de pressão através de EA são dedicados e caros, uma vez que embarcam toda a tecnologia para fornecer o “diagnóstico” local. Para isso o operador deve ser altamente treinado para avaliar esses dados e dar seu veredicto. Isso nem sempre é necessário e geram duas despesas precipitadas, uma com o operador e outra com o equipamento, que muitas vezes é pesado.

A Figura 3 apresenta um vaso de pressão com falha catastrófica após um teste hidrostático sem acompanhamento de qualquer ferramenta de avaliação de integridade estrutural (SOARES, 2003). Nesta mesma figura, “letra b)”, se nota que apesar do material ser dúctil, a fratura imposta tem característica frágil evidenciando a ocorrência de micro trincas no material solicitado.

Figura 3 – Resultado de teste hidrostático sem acompanhamento de ferramenta de avaliação de integridade estrutural.



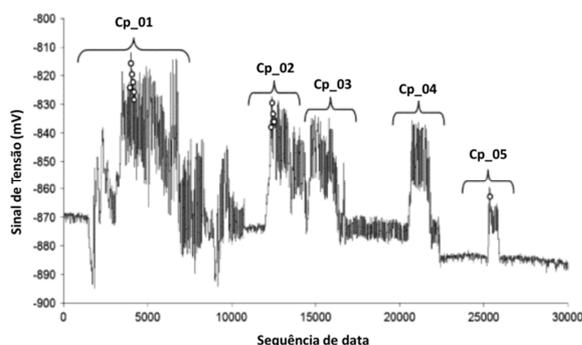
a) Vaso de pressão com falha catastrófica.

b) Detalhe da fratura evidenciando uma fratura frágil.

Fonte: SOARES, 2003

Lédeczi et al. (2009) criou uma técnica usando um sistema wireless para monitorar os sinais de EA em pontes ferroviárias. Usando alguns strain-gages para acionar o sistema de aquisição eles conseguiram minimizar custos do equipamento e energia, além do pessoal envolvido. Ainda segundo Lédeczi et al. (2009), os sinais oriundos da captação indicam a excitação gerada pelas composições ferroviárias enumerados de 1 a 5 (Figura 4), denotando os ciclos excitados. Os gráficos denotam que a composição representada por “Cp_01” apresentam maior carregamento, o que é explicado pelo fato da carga da composição e o número de vagões, sendo que as composições “Cp_02” e “Cp_03” passaram pela ponte sequencialmente sendo considerada por eles como uma única excitação.

Figura 4 – Excitações geradas na ponte pelas composições.



Fonte: LÉDECZI et al., 2009

2.1.2 Método de inspeção com a técnica de EA

O ensaio de EA é um método passivo que monitora dinamicamente a redistribuição dos campos de tensão em componentes submetidos a esforços. Os carregamentos mais comuns na indústria de petróleo incluem pressão estática (hidráulica e pneumática) e tensões térmicas.

Uma das características mais importantes da aplicação industrial do ensaio de EA é o comportamento apresentado pelos metais por emitirem ondas de EA somente acima do máximo carregamento aplicado previamente. Como foi dito, este comportamento recebeu o nome de “efeito Kaiser” em homenagem ao Doutor Joseph Kaiser, pesquisador responsável pela identificação deste comportamento.

O efeito Kaiser, embora tido como um fenômeno irreversível apresenta reversibilidade para materiais que possuem capacidade de recozimento em temperatura ambiente. (MILLER, 2006)

A presença do efeito Kaiser, em materiais metálicos, não permite a repetição dos ensaios após a sua execução uma vez que novas emissões acústicas só ocorrem quando a máxima carga prévia aplicada tiver sido excedida. Esta característica de irreversibilidade no curto espaço de tempo é uma das principais desvantagens do método de inspeção com a técnica de EA, pois outros métodos de ensaios não destrutivos permitem a repetição contínua dos ensaios com a obtenção dos mesmos resultados. (MILLER, 2006)

A presença do efeito Kaiser em materiais metálicos foi utilizada para o desenvolvimento de uma estratégia de inspeção de componentes estruturais e vasos de pressão para a detecção de danos. A estratégia consistia em fazer testes repetidos durante a campanha de serviço do componente. No teste consecutivo, para componentes sem a presença de dano estrutural não seriam gerados sinais de EA; a existência e a detecção de sinais de EA corresponderiam a danos oriundos da operação do componente. Esta estratégia de teste ficou conhecida como “Corolário Dunegan”. (MILLER, 2006)

2.1.3 Atenuação de sinais de EA

A energia acústica que se propaga a partir da fonte vai diminuindo em amplitude como função da distância da fonte. Este fenômeno é conhecido como atenuação do sinal; conhecendo as características da atenuação da estrutura em questão e detectando os sinais (ruído) do vazamento em diversas localizações, se pode localizar sua origem. Esta é uma prática comum para localização de vazamento por meio de EA em tubulações. Desta forma, a atenuação é a perda da energia do sinal e conseqüente diminuição da amplitude da onda, com o aumento da distância de propagação, ou seja, a distância da fonte. A atenuação é importante porque controla a detecção de fontes distantes, pela determinação da correta distância entre sensores que permite de forma segura a detecção de um sinal de uma fonte de EA. (BLITZ,1996)

A atenuação geométrica pode ser entendida por meio da propagação de uma onda de EA em um material que propaga a onda sem induzir perdas devido a fenômenos como absorção, espalhamento entre outras. Como explicado anteriormente, a onda de EA 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. (BLITZ, 1996)

A atenuação por dispersão é um dos resultados da interação da onda sonora com materiais sólidos que são policristalinos e/ou onde seu comprimento de onda é próximo de alguma descontinuidade do material, ou seja, alguns defeitos como, por exemplo, tamanho de grão, inclusões, segundas fases entre outras. Quando uma onda sonora encontra um obstáculo de tamanho (D) muito próximo ou menor do que o seu comprimento de onda (λ), a frente de onda que se movia em determinada direção pode ser dispersa em um maior número de direções. BLITZ (1996) cita que quando $\lambda \geq D/10$, ocorre um caso especial onde a dispersão ocorre em todas as direções, chamado de Dispersão de Rayleigh. Essa dispersão é muito importante para o caso de técnicas como o ultra-som, onde a diminuição da frequência da onda (e conseqüentemente aumento do comprimento de onda) por meio da seleção correta do transdutor pode reduzir consideravelmente a atenuação do feixe sônico. (YAN, LIU, CHEN, CHENG, YANG, 2015).

BLITZ (1996) menciona também, três casos de atenuação onde existem perdas energéticas para o material. O primeiro caso é a absorção em metais policristalinos devido à fricção entre contornos de grão, fazendo com que a energia

sonora seja convertida em calor. Essa atenuação aumenta em proporção direta com a frequência. O segundo caso é quando ocorre a presença de defeitos como discordâncias ou vacâncias de átomos, onde o material captura a energia sonora para eliminar os defeitos. O terceiro caso ocorre em materiais ferromagnéticos e em algumas substâncias ferrimagnéticas. A energia sonora que passa por esses materiais pode ser parcialmente convertida em energia magnética durante o meio ciclo positivo e de volta para a energia sonora durante o meio ciclo negativo.

Em componentes industriais não existem sólidos perfeitos sem acessórios, tais como: bocais, conexões, penetradores e outras discontinuidades de forma (geométricas). Sinais de EA 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 EA 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.

A amplitude do sinal de EA é um parâmetro que determina a detectibilidade do evento. Eventos com amplitude inferior a 35 dB são considerados pequenos, enquanto que amplitudes superiores a 75 dB podem ser considerados muito grandes. Na Tabela 1 estão indicadas algumas possíveis origens para a ocorrência de eventos com baixas amplitudes e eventos com elevadas amplitudes de sinal:

Tabela 1 – Fatores que podem influenciar a amplitude do sinal

Amplitudes Baixas	Amplitudes Elevadas
Resistência mecânica baixa	Resistência mecânica elevada
Ductilidade ruim	Boa ductilidade
Isotropia	Anisotropia
Homogeneidade	Heterogeneidade

Continua

Continuação

Amplitudes Baixas	Amplitudes Elevadas
Espessura reduzida	Espessura elevada
Rotura por corte	Rotura por clivagem
Elevada temperatura	Baixa temperatura
Material sem defeitos	Material com defeitos
Deformação plástica	Propagação de fissuras

Fonte: MAGALHÃES, 1999

2.1.4 Velocidade de propagação

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

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

Equação 1 – Ondas Senoidais

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

onde:

y, deslocamento (amplitude);

x, posição;

t, tempo;

λ , comprimento de onda; e,

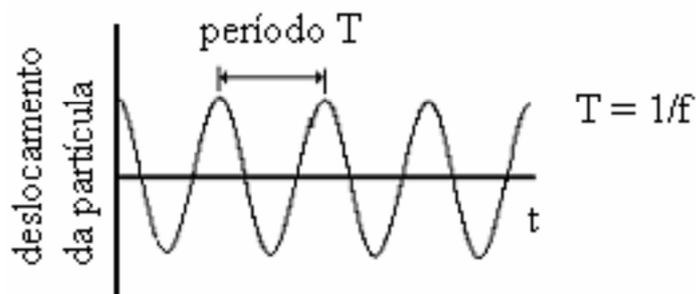
f, frequência.

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

Por uma senóide pode-se estimar o movimento de uma partícula no material em função do tempo ou ainda obter a informação instantânea do meio onde a onda

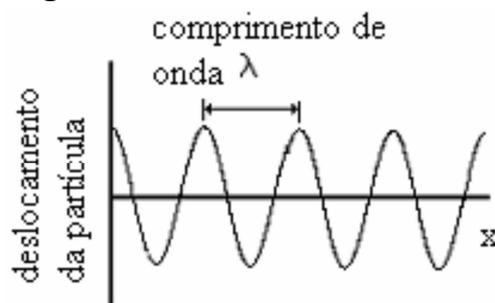
acústica está propagando. Por meio de um “quadro congelado” do material se percebe qual é o movimento instantâneo (deslocamento) em diferentes posições. Na Figura 5 e Figura 6 são apresentadas as características de uma onda senoidal.

Figura 5 – Movimento de uma partícula no material em função do tempo.



Fonte: MAGALHÃES, 1999

Figura 6 – Movimento instantâneo.



Fonte: MAGALHÃES, 1999

Na Figura 5 e Figura 6 anteriormente apresentadas, ambos os gráficos são senoidais e estão relacionados entre si pela Equação 2, onde g representa uma função, e pela Equação 3, apresentadas a seguir:

Equação 2

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

Equação 3

$$c = f \cdot \lambda$$

onde:

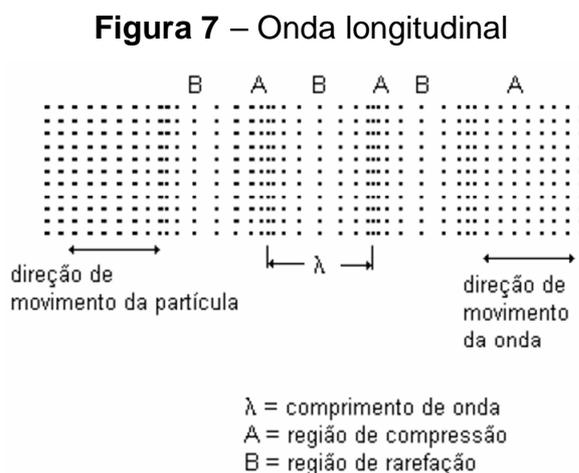
y , deslocamento (amplitude);

f, frequência;
 x, posição;
 c, velocidade de propagação da onda;
 t, tempo; e,
 λ , comprimento de onda.

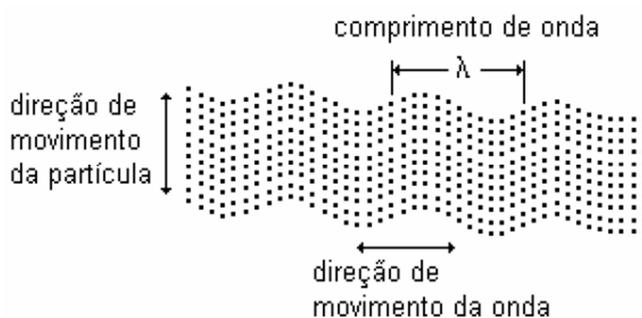
O movimento da onda resulta da ação de forças elásticas internas ao meio para posicionar as partículas na posição inicial e na condição de repouso. Em função disto se pode afirmar que no movimento da partícula há diferentes forças atuando que gerarão diferentes velocidades de propagação. (MAGALHÃES, 1999)

2.1.5 Tipos de ondas acústicas nos materiais

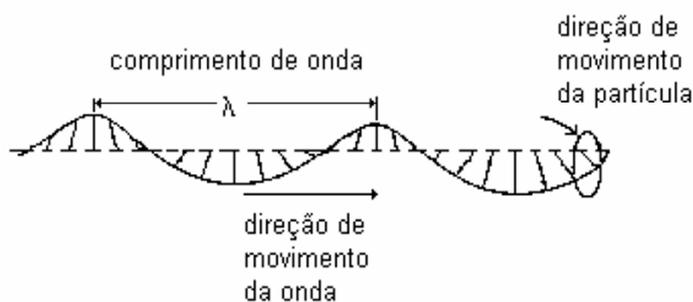
A Figura 7, Figura 8 e Figura 9 destacam os modos de vibração das ondas longitudinal, transversal e superficial, respectivamente:



Fonte: MAGALHÃES, 1999

Figura 8 – Onda transversal

Fonte: MAGALHÃES, 1999

Figura 9 – Onda superficial

Fonte: MAGALHÃES, 1999

A Tabela 2 destaca a relação entre a velocidade de propagação das ondas.

Tabela 2 – Velocidade relativa em EA

Movimento da partícula	Direção de propagação	Tipo de onda	Velocidade relativa
	→	Longitudinal	Rápida $V_L = 1$
	→	Transversal	Lenta $V_S \approx 0,6 V_L$
	→	Superficial ou Rayleigh	Mais lenta $V_R \approx 0,5 V_L$
	→	Ondas guiadas de Lamb ou chapa Simétricas ou assimétricas	Fase e grupos de velocidade variam

Fonte: MAGALHÃES, 1999

A Tabela 3 apresenta as propriedades acústicas de diversos materiais.

Tabela 3 – 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: MAGALHÃES, 1999

2.1.6 Sensores para detecção de sinais de EA

Os sensores utilizados industrialmente para a detecção de sinais de EA são do tipo piezoelétricos, e são os mais utilizados em função do custo e facilidade de fabricação. O fenômeno da piezoelectricidade permite a geração de cargas elétricas como resultado de deformação mecânica e o efeito reverso. A frequência de ressonância de um sensor é identificada pela frequência onde ocorre a maior resposta em amplitude. (MASMOUDI, MAHI, TURKI, GUERJOUA, 2014)

Sensores de uso geral são projetados com materiais especiais (aço e cerâmica) e têm uma sensibilidade muito elevada com resposta de frequência plana ao longo do intervalo de 100-450 kHz. Indicados para aplicações gerais que requerem elevada largura de banda para a análise dos sinais de EA para a discriminação de ruído e de identificação de fonte de frequência.

Os sensores mais utilizados no ensaio de EA em materiais metálicos e cerâmicos são ressonantes em uma faixa que pode variar de 30 a 300 kHz e apresentam uma extensa faixa útil (range) de 15 a 1.000 kHz. A Tabela 4 apresenta as especificações básicas de sensores de uso geral. São adequados para monitoramento de integridade estrutural de grandes estruturas, como tanques de armazenamento, dutos, vasos de pressão, etc. a resposta plana destes sensores ajuda a eliminar o forte aumento e queda na sensibilidade com frequência comumente vista em sensores ressonantes além de serem facilmente montados usando adesivos epóxis. (MAGALHÃES, 1999)

Tabela 4 – Tabela de especificação de sensores de EA de uso geral.

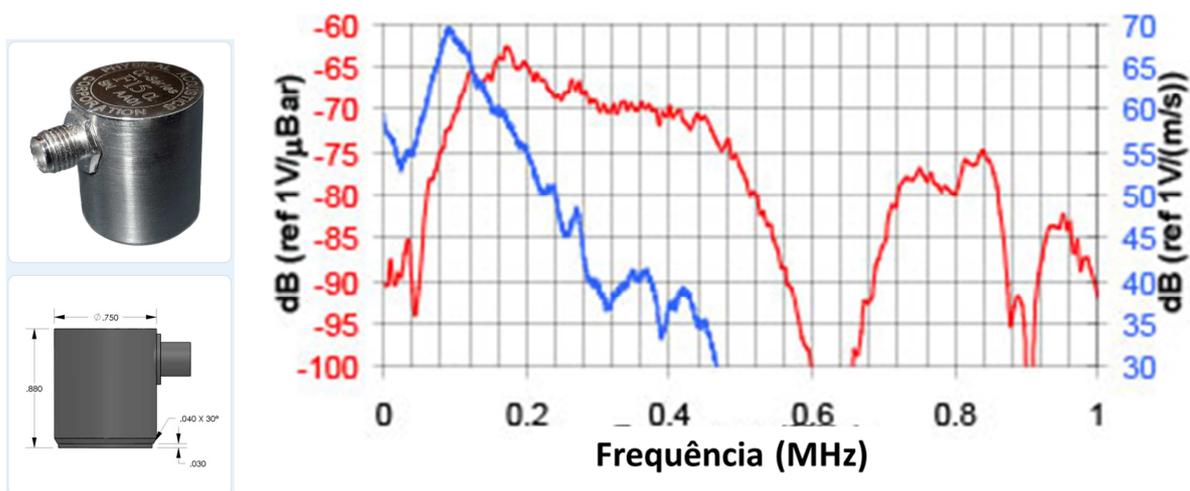
Sensores de uso geral - PASA										
Modelo	Dimensões ø x H (mm [Inch])	Peso (gm)	Temperatura de operação (°C)	Limite Choque (g)	Material	Material Face	Tipo de conector	Sensibilidade dB ref. 1V/(m/s) [1V/ μ bar]	Frequência operação - Range (kHz)	Frequência Resonante (kHz)
A3	16x23 [4x.9]	31	-65 to 177	500	Stainless Steel (304)	Stainless Steel (304)	Microdot 10-32	83 [-71]	15-55	30 [35]
D9241A	24x20 [94x.79]	56	-45 to 125	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	Dual BNC	82 [-70]	20-60	30
F15a	19x22.4 [75x.88]	34	-65 to 177	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	SMA	70 [-62]	100-450	75 [150]
F30a	19x21.6 [75x.85]	34	-65 to 177	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	SMA	58 [-63]	150-750	300 [300]
F50a	19x21.6 [75x.85]	34	-65 to 177	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	SMA	65 [-65]	200-800	100
R3a	19x22 [75x.88]	41	-65 to 175	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	SMA	80 [-63]	25-70	29
R6 or R6a	19x22 [75x.88]	38	-65 to 175	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	SMA	75 [-64]	35-100	55 [90]
R6D	19x22 [75x.84]	34	-65 to 177	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	Dual BNC	75 [-64]	35-100	55 [90]
R6S	19x22 [75x.84]	28	-65 to 177	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	BNC	75 [-64]	35-100	55 [90]
R15 or R15a	19x22 [75x.88]	34	-65 to 175	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	SMA	69 [-63]	50-400	75 [150]
R15D	18x17 [7x.65]	25	-65 to 177	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	Dual BNC	58 [-62]	50-400	75 [150]
R15S	18x17 [7x.65]	-8	-65 to 177	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	BNC	69 [-63]	50-400	75 [150]
R30 or R30a	19x22 [75x.88]	29	-65 to 177	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	SMA	58 [-62]	150-400	300 [330]
R30D	18x17 [7x.65]	20	-65 to 177	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	Dual BNC	58 [-62]	150-400	300 [330]
R30S	18x17 [7x.65]	-8	-65 to 177	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	BNC	58 [-62]	150-400	300 [330]
R50 or R50a	19x22 [75x.88]	32	-65 to 175	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	SMA	62 [-62]	100-700	100 [500]
R50D	18x17 [7x.65]	-8	-65 to 177	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	Dual BNC	62 [-62]	100-700	100 [500]
R50S	18x17 [7x.65]	-8	-65 to 177	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	BNC	62 [-62]	100-700	100 [500]
R80 or R80a	19x21 [75x.85]	32	-65 to 175	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	SMA	58 [-62]	200-1000	200 [800]
R80D	18x17 [7x.65]	23	-65 to 177	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	Dual BNC	58 [-62]	200-1000	200 [800]
R80S	18x17 [7x.65]	-8	-65 to 177	500	Stainless Steel (304)	Ceramic	BNC	58 [-62]	200-1000	200 [800]

Fonte PASA - Physical Acoustics South America, 2014

No exemplo da Figura 10 e Figura 11 um exemplo típico da curva de calibração de um sensor de EA de uso geral (F15a – Sensor PASA em destaque na tabela anterior). As frequências de ressonância estão assinaladas dentro do intervalo de 75 a 150 kHz dependendo da norma (diferenciada pelas cores). A banda em frequência é a descrição da faixa percentual da frequência de ressonância para uma resposta de até – 3 dB. Sensores são identificados como banda estreita ou

banda larga, para bandas de frequência de até 50% e acima de 50%, respectivamente.

Figura 10 – Curva de calibração típica de sensor de EA de uso geral – F15a (foto).



Curva de calibração baseada na norma ASTM E1106

Curva de calibração baseada na norma ASTM E976

Fonte: PASA - Physical Acoustics South America, 2014

Figura 11 – Especificações de operação do sensor F15a

Dinâmicas	
Sensibilidade, Ref V/(m/s)	70 dB
Sensibilidade, Ref V/µbar	-62 dB
Faixa de frequência	100-450 kHz
Frequência ressonante, Ref V/(m/s)	75 kHz
Frequência ressonante, Ref V/µbar	150 kHz
Direcionalidade	± 1,5 dB
Ambientais	
Faixa de temperatura	-65 to 177°C
Limite de impacto	500 g
Físicas	
Dimensões	Ø 19 x 22,4 mm (Ø 0,75" x 0,88")
Peso	34 g
Construção do corpo	Robusta em aço inoxidável
Material face	Liga cerâmica
Conector	SMA
Local de saída do conector	Lateral

Fonte: PASA, 2014

A resposta do sensor é determinada, inicialmente, pela forma e dimensão do cristal piezoelétrico e pelas constantes elásticas e piezoelétricas; em seguida pela forma com que o cristal é amortecido e montado dentro da caixa do sensor e, finalmente, pelo acoplamento e montagem do sensor na estrutura em teste e pelas propriedades acústicas da estrutura em teste.

Acelerômetros comuns são transdutores adequados para excitações estruturais em som ou vibração. Um acelerômetro típico comercialmente disponível inclui pelo menos um elemento piezoelétrico e uma massa sísmica. É normalmente ajustado para uma frequência de ressonância de 1 a 100 kHz, de modo que as ondas vibracionais ou acústicas de entrada excitem a massa sísmica. As vibrações são convertidas por um ou mais elementos piezoelétricos em sinais elétricos, os quais são, então, avaliados. (UNESP, 2012)

O transdutor de EA convencional, entretanto, é substancialmente formado por um elemento piezoelétrico. Destina a ser acoplado a uma peça da estrutura por meio de um meio de acoplamento. Um transdutor típico EA não tem uma massa sísmica. As ondas acústicas de frequência adequada são convertidas em sinais elétricos diretamente no elemento piezoelétrico. A fim de permitir que as ondas acústicas produzidas na estrutura possam atingir “fielmente” o transdutor de EA convencional, é necessária a utilização de um meio denso (viscoso) para promover certo “acoplamento físico”, tal como um gel, silicone ou uma graxa especial.

Tem-se, entretanto, que nenhum dos chamados “meios viscosos de acoplamento” convencionais são apropriados para temperaturas muito elevadas, ou seja, o trabalho com tais sensores por longo tempo em uma estrutura cuja temperatura é alta se torna tecnicamente inviável. Portanto, para esse tipo de trabalho, os transdutores hoje conhecidos devem ser instalados logo antes de cada inspeção de EA e prontamente removidos. (SIEMENS, 1989)

2.1.7 Unidade de medida de amplitude

Para descrever a extensa faixa de amplitudes dos sinais de EA, medida primariamente em volts, uniformemente, se utiliza a escala especial de decibéis para EA (dB_{AE}), descrita na Tabela 5:

Tabela 5 – Escala de dB_{AE}

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: Documento técnico do projeto de P&D GT-407

A escala de decibel em EA é um caso particular da equação geral para decibel (dB) que é descrita na Equação 4.

Equação 4

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

onde:

V, tensão elétrica medida no sinal de EA;

V^{ref}, 1 microVolt na saída sensor.

2.1.8 Características da onda de EA

Um sinal ideal de EA pode ser descrito conforme a Equação 5. Um sinal gerado segundo essa equação é apresentado na Figura 12.

Equação 5

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

onde,

V, sinal na saída do sensor, em Volts;

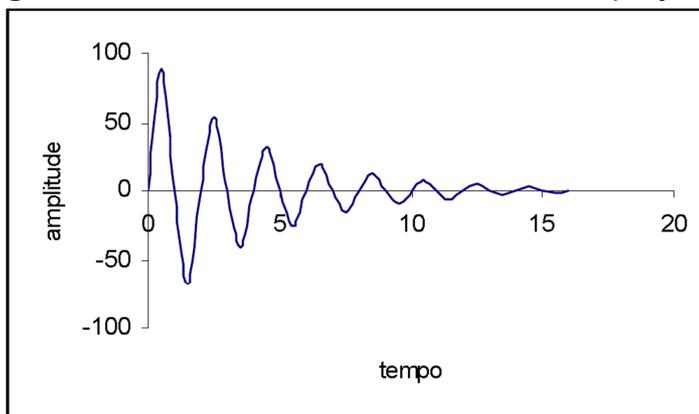
V₀, tensão elétrica inicial do sinal, em Volts;

B, constante de decaimento (maior que zero);

t, tempo; e,

ω , frequência angular.

Figura 12 – Sinal ideal de EA conforme a Equação 5.



Fonte: Documento técnico do projeto de P&D GT-407

Para o estudo de sinais de EA são convencionadas algumas características da onda. Estas características estão normalizadas internacionalmente. As definições prescritas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (ABNT, 2004) para estas características estão descritas na Tabela 6.

Tabela 6 – Definições das características do sinal de EA

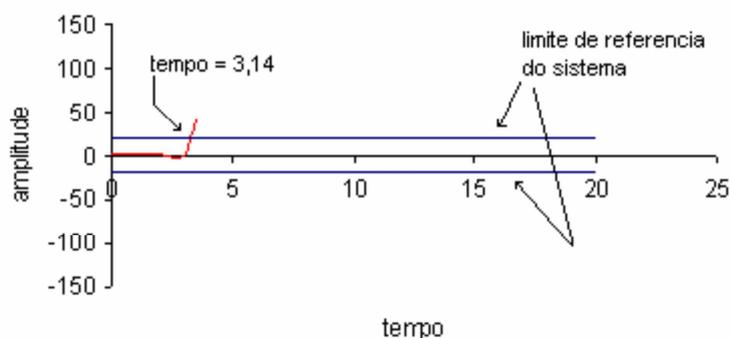
De acordo com a NBR – 15181 - Ensaios não destrutivos - EA - Terminologia.

Característica	Definição
Amplitude de sinal de emissão acústica	O valor máximo de voltagem obtido pelo sinal de emissão acústica.
Contagem de emissão acústica (n)	É o número de vezes que o sinal de emissão acústica ultrapassa o limite de referência durante o ensaio.
Limite de referência do sistema	É o limite de referência do sistema eletrônico acima do qual os sinais serão detectados.
MARSE (energia)	É a medida da área retificada do sinal de emissão acústica.

Fonte: NBR - 15181

Para a identificação das características do sinal de EA será utilizado o sinal descrito da Figura 13 a Figura 19. As informações citadas no texto estão assinaladas nas figuras por setas. Quando a tensão (amplitude) de um sinal ultrapassa a tensão do limite de referência do sistema inicia-se o processo de detecção de um sinal de EA (Figura 13). Nestas figuras é utilizada uma escala de tempo meramente informativa, não representando em hipótese alguma os tempos comumente encontrados em ensaios de EA.

Figura 13 – Determinação do início de um sinal (tempo de chegada) de EA.
Tempo de chegada = 3,14.

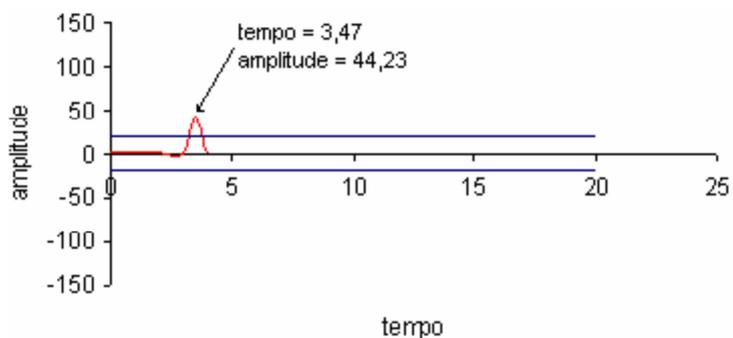


Fonte: SOARES, 2003

O sinal atinge um valor máximo e decai até cruzar novamente o limite de referência do sistema (Figura 14). O valor máximo de amplitude é registrado como a amplitude do sinal e, em função de ter ocorrido um cruzamento ascendente e um cruzamento descendente do limite de referência do sistema, se tem a primeira contagem do sinal de EA.

Figura 14 – Determinação da máxima amplitude e do número de contagens de um sinal de EA.

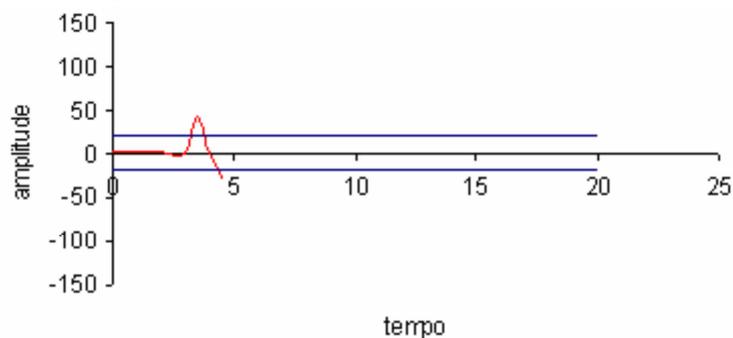
Amplitude = 44,23 dB, Contagens = 1.



Fonte: MARTINS, 2013

O sinal oscila até a parte negativa da onda e cruza mais uma vez o limite de referência do sistema (Figura 15), para facilitar a comparação dos sinais e o processamento dos dados, a instrumentação de EA trabalha com o módulo dos valores de tensão (Figura 16).

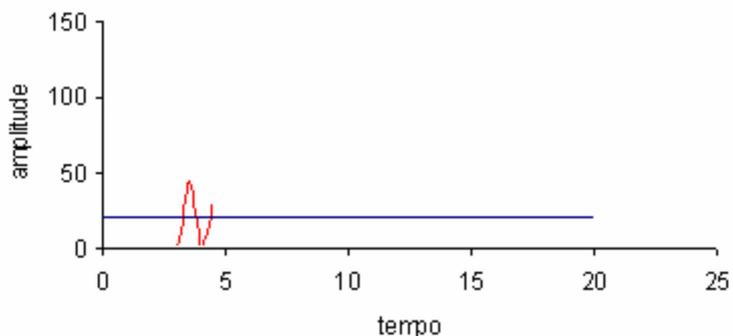
Figura 15 – Detecção de um sinal de EA.



Fonte: SOARES, 2003

Figura 16 – Detecção de um sinal de EA.

Representação em módulo do sinal apresentado na Figura 14

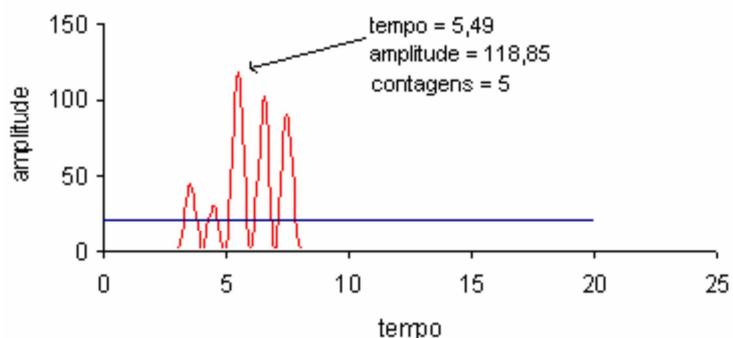


Fonte: SOARES, 2003

A oscilação do sinal continua, apresentando valores de amplitude abaixo e acima do primeiro pico após a detecção do sinal (Figura 16). Quando um novo valor de máxima amplitude é encontrado (118,85 dB no instante de tempo 5,49 na Figura 17) é calculado o tempo necessário para o sinal atingir o valor máximo de amplitude. Este tempo é denominado tempo de subida e no exemplo em questão corresponde a diferença entre 5,49 e 3,12, ou seja, 2,35. O sinal da Figura 17 apresentou cinco cruzamentos ascendentes e cinco cruzamento descendentes, caracterizando 5 contagens.

Figura 17 – Detecção de um sinal de EA.

Tempo de chegada (Figura 13) = 3,14, amplitude = 118,85 dB, contagens = 5, tempo de subida = 2,35.

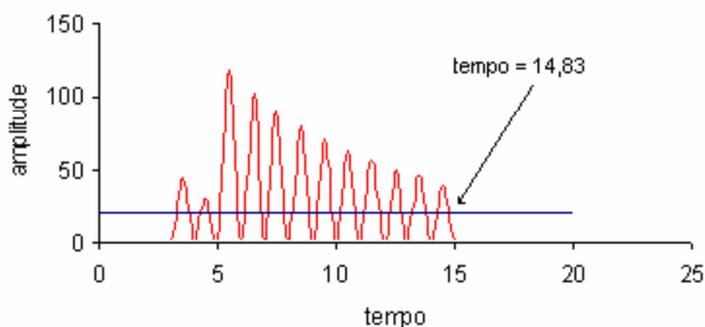


Fonte: SOARES, 2003

Quando o sinal de EA não mais cortar o limite de referência do sistema, indica o final do sinal de detecção acústica (Figura 18). Em função de não ter sido medida amplitude superior ao valor anteriormente medido (118,85 dB), o valor anteriormente medido é registrado como a máxima amplitude deste sinal. O tempo de subida é medido simultaneamente com a máxima amplitude, sendo assim, o valor anteriormente medido é registrado. As contagens são novamente medidas e é encontrado um valor de 12 para este sinal. A diferença de tempo entre o tempo de chegada (3,14 da Figura 13) e o instante do término da detecção do sinal é denominada duração e apresenta o valor de 11,69 para este sinal ($14,83 - 3,14 = 11,69$). O processo de detecção e medição do sinal de EA poderia prosseguir indefinidamente sempre que um novo sinal fosse detectado, ou seja, cortasse o limite de referência do sistema, porém, isto não ocorre em função de parâmetros para identificação de sinais de EA.

Figura 18 – Término da detecção de um sinal de EA.

Tempo de chegada (Figura 13) = 3,14, amplitude (Figura 17) = 118,85 dB, contagens = 12, tempo de subida (Figura 17) = 2,35, duração do sinal = 11,69.



Fonte: SOARES, 2003

Para a correta identificação do sinal de EA são estabelecidos três tempos máximos para a instrumentação coletar e processar o sinal. O primeiro parâmetro está relacionado ao tempo necessário para o sinal atingir o seu maior valor de amplitude, geralmente este parâmetro é identificado como “tempo de definição do pico”. O segundo parâmetro estipula a máxima duração possível para um sinal de EA, sendo identificado como “tempo de duração do sinal”. O terceiro parâmetro está relacionado com o tempo necessário para a instrumentação de EA coletar, medir as

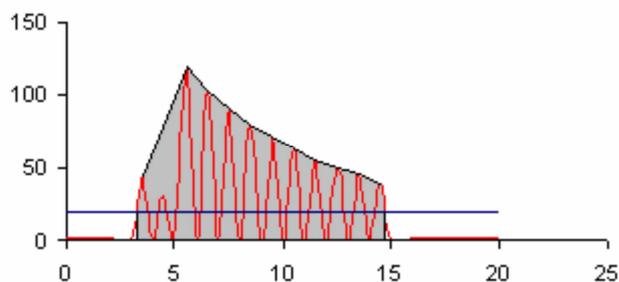
características e armazenar o sinal de EA, sendo identificado como “tempo morto do sistema”. Os nomes dados aos três parâmetros de tempo variam entre os fabricantes de equipamentos de EA. Os valores destes parâmetros são determinados laboratorialmente para cada classe de material ensaiado, geralmente o “tempo de duração do sinal” é o dobro do “tempo de definição do pico” e o “tempo morto do sistema” é o menor valor que não ocasiona a saturação da capacidade de processamento da instrumentação de EA. O sinal de EA apresentado na Figura 18 e também na Figura 19 apresenta as características descritas na Tabela 7. (P&D GT-407, 2010)

Tabela 7 – Características do sinal de EA apresentado na Figura 18.

Característica	Valor
Tempo de subida	$5,49 - 3,14 = 2,35$ s
Amplitude	118,85 dB
Duração	$14,83 - 3,14 = 11,69$ s
Contagens	12 picos
Energia	719 (ver Figura 19)

Fonte: Documento técnico do projeto de P&D GT-407

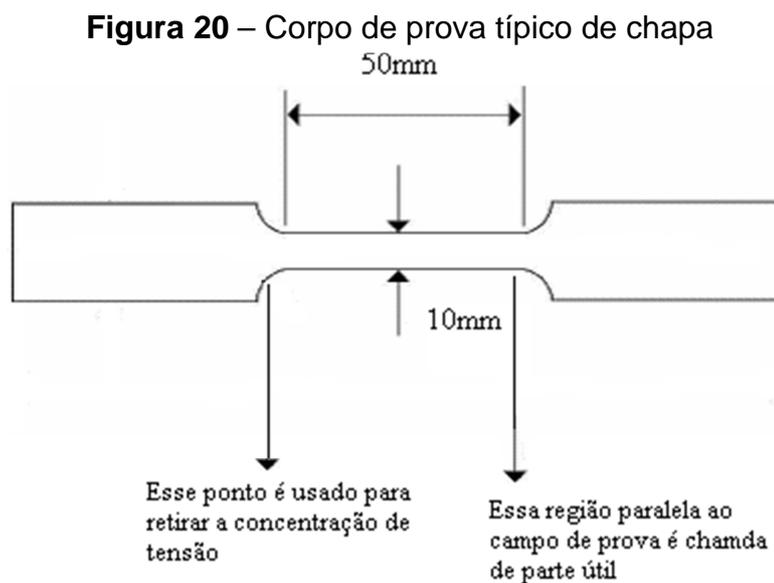
Figura 19 – Energia do sinal acústico apresentado na Figura 18



Fonte: Documento técnico do projeto de P&D GT-407

2.2 Ensaio de tração

Em um ensaio de tração, um corpo de prova típico ou provete (Figura 20) é submetido a um esforço que tende a alongá-lo ou esticá-lo até à ruptura. Geralmente, o ensaio é realizado num corpo de prova de formas e dimensões padronizadas, para que os resultados obtidos possam ser comparados ou, se necessário, reproduzidos. Este é fixado numa máquina de ensaios que aplica esforços crescentes na sua direção axial, sendo medidas as deformações correspondentes. Os esforços ou cargas são mensurados na própria máquina, e, normalmente, o ensaio ocorre até a ruptura do material – Ensaio destrutivo. (SMITH, 2010).



Fonte: CALLISTER, 2007

2.2.1 Implicações

Com esse tipo de ensaio, se pode afirmar que praticamente as deformações promovidas no material são uniformemente distribuídas em toda a sua extensão, pelo menos até ser atingida uma carga máxima próxima do final do ensaio e, como é possível fazer com que a carga cresça numa velocidade razoavelmente lenta

durante todo o teste, o ensaio de tração permite medir satisfatoriamente a resistência do material. A uniformidade da deformação permite ainda obter medições para a variação dessa deformação em função da tensão aplicada. Essa variação, extremamente útil para o engenheiro, é determinada pelo traçado da curva tensão-deformação a qual pode ser obtida diretamente pela máquina ou por pontos. A uniformidade termina no momento em que é atingida a carga máxima suportada pelo material, quando começa a aparecer o fenômeno da estrição ou da diminuição da secção do corpo de prova, no caso de materiais com certa ductilidade. A ruptura sempre se dá na região mais estreita do material, a menos que um defeito interno no material, fora dessa região, promova a ruptura do mesmo, o que raramente acontece. (SMITH, 2010)

A precisão de um ensaio de tração depende, evidentemente, da exatidão dos aparelhos de medida que se dispõe. Com pequenas deformações, se consegue uma maior resolução na avaliação da tensão ao invés de detectar grandes variações de deformação, causando maior imprecisão da avaliação da tensão. Mesmo no início do ensaio, se esse não for bem conduzido, grandes erros podem ser cometidos, como por exemplo, se o corpo de prova não estiver bem alinhado, os esforços assimétricos que aparecerão levarão a falsas leituras das deformações para uma mesma carga aplicada. Deve-se, portanto, centrar bem o corpo-de-prova na máquina para que a carga seja efetivamente aplicada na direção do seu eixo longitudinal. (SMITH, 2010)

Estudos ainda em 1990 sobre ensaio de tração em aço de baixo carbono com monitoramento de EA em diferentes taxas de carregamento indicam que a taxa de contagem por unidade de volume é diretamente proporcional à taxa de carregamento, com a constante de proporcionalidade geralmente dependente da tensão aplicada. Usando este conhecimento na deformação em torno da ponta da estrição, se infere sobre as características de EA e os parâmetros de mecânica da fratura. Em níveis de baixa intensidade de estresse, há um bastante coerência entre o modelo teórico e os dados experimentais. (M. KOTOUL, Z. BÍLEK, 1990)

Em um ensaio de tração, se obtém o gráfico tensão-deformação, na qual é possível analisar o comportamento do material ao longo do ensaio. Do início do ensaio, até a ruptura, os materiais geralmente passam pelas seguintes três etapas: Deformação elástica, deformação plástica e ruptura. Etapas estas que são resumidas nos tópicos que se seguem.

2.2.2 Deformação elástica

Para a maioria dos metais que são solicitados em tração e com níveis de tensão relativamente baixos, a tensão e a deformação são proporcionais de acordo com a relação abaixo. Sendo,

$$\sigma = E.\varepsilon$$

onde:

σ = Tensão em Pascal

ε = Deformação específica, (adimensional)

E = Módulo de elasticidade ou Módulo de Young

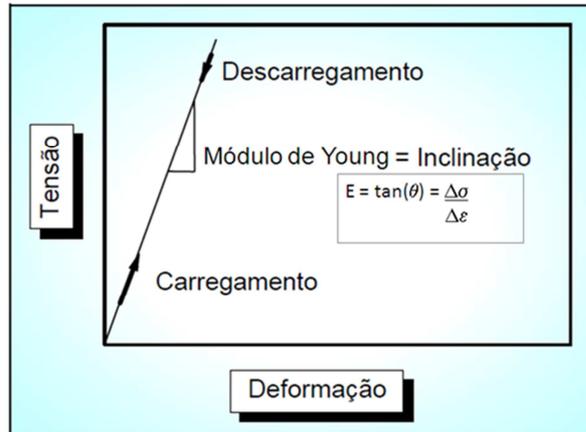
Esta anterior é a conhecida lei de Hooke uniaxial e a constante de proporcionalidade “E” é o módulo de elasticidade, ou módulo de Young.

As deformações elásticas não são permanentes, ou seja, quando a carga é removida, o corpo retorna ao seu formato original. No entanto, a curva tensão-deformação não é sempre linear, como por exemplo, no ferro fundido cinzento, concreto e polímeros.

Até este ponto, se assume que a deformação elástica é independente do tempo, ou seja, quando uma carga é aplicada, a deformação elástica permanece constante durante o período em que a carga é mantida constante. Também é assumido que após a remoção da carga, a deformação é totalmente recuperada, ou seja, a deformação imediatamente retorna para o valor zero.

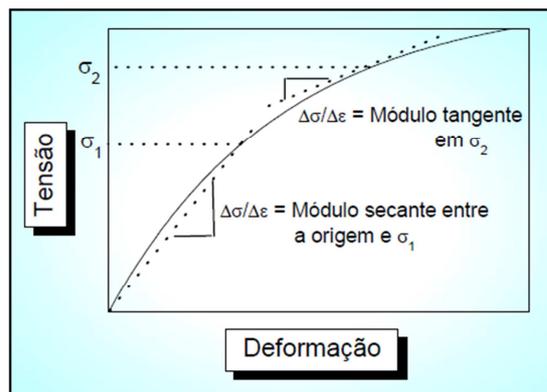
2.2.2.1 Cálculo do módulo de Young

Na região onde a Lei de Hooke é válida (regime elástico linear) o módulo de Young pode ser obtido pelo coeficiente angular do gráfico tensão-deformação (Figura 21).

Figura 21 – Método do coeficiente angular

Fonte: CALLISTER, 2007

Para materiais cuja porção inicial elástica da curva tensão-deformação não é linear (por exemplo, ferro fundido cinzento e concreto), não é possível determinar o módulo de Young pelo coeficiente angular. Nestes casos, tanto o módulo tangente quanto o módulo secante são normalmente usados (Figura 22). Módulo tangente é tomado como sendo a inclinação da curva tensão-deformação em um nível de tensão específico, enquanto que o módulo secante representa a inclinação de uma secante traçada a partir da origem até um dado ponto da curva.

Figura 22 – Módulo tangente e módulo secante

Fonte: CALLISTER, 2007

2.2.3 Deformação plástica

Acima de uma certa tensão, os materiais começam a se deformar plasticamente, ou seja, ocorrem deformações permanentes. O ponto no qual estas deformações permanentes começam a se tornar significativas é chamado de limite de escoamento ou patamar de escoamento ou ainda tensão de cedência.

Para metais que possuem transição gradual do regime elástico para o plástico, as deformações plásticas se iniciam no ponto no qual a curva tensão-deformação deixa de ser linear, sendo este ponto chamado de limite de proporcionalidade (ou tensão limite-elasticidade). No entanto, é difícil determinar este ponto precisamente. Como consequência, é criada uma convenção na qual é construída uma linha reta paralela à porção elástica, passando pela deformação de 0,2% da deformação total. A tensão correspondente à intersecção desta linha com a curva tensão-deformação é o limite de escoamento (ou tensão de cedência).

A magnitude do limite de escoamento é a medida da resistência de um material à deformação plástica e pode variar muito, como por exemplo, entre 35 MPa para uma liga de alumínio de baixa resistência até 1400 MPa para um aço de alta resistência.

Durante a deformação plástica, a tensão necessária para continuar a deformar um metal aumenta até um ponto máximo, chamado de limite de resistência à tração, no qual a tensão é o máximo na curva tensão-deformação de engenharia. Isto corresponde à maior tensão que o material pode resistir; se esta tensão for aplicada e mantida, o resultado será a ruptura. Toda a deformação até este ponto é uniforme na seção.

Estudo recente com a utilização de correlação de imagens 3D onde podem ser adquiridas curvas verdadeiras de tensão-deformação apresenta que em determinado instante de tempo do processo da expansão plástica, a região que teoricamente já entrou nesta zona ainda se mostra em um estado deformado constante, ou seja, ainda com características de elástica. (ZHU, BAI, ZHANG, LEI, HE, 2015)

2.2.4 Ruptura

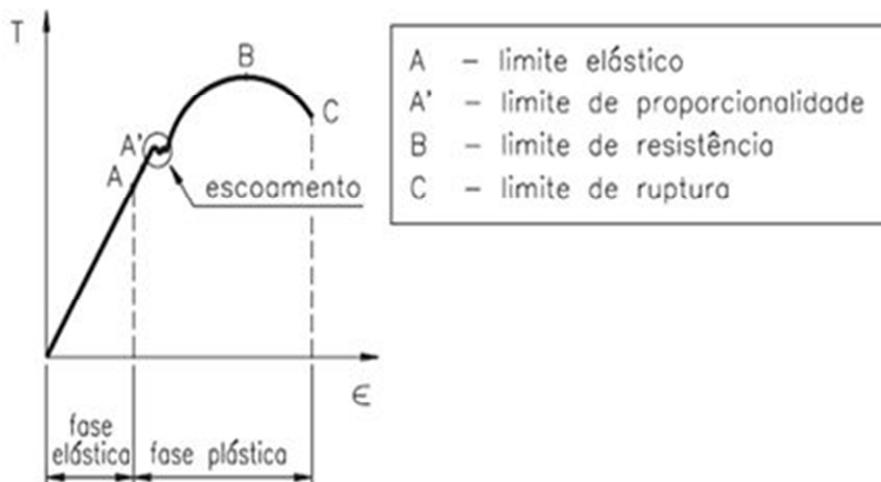
No entanto, após o ponto de limite de resistência, começa a se formar no material uma estrição (estrangulamento de seção), na qual toda a deformação subsequente está confinada e, é nesta região que ocorrerá ruptura. A tensão que corresponde à ruptura é chamada de limite de ruptura.

Comparativamente, em ensaio semelhante ao que fora utilizado nos ensaios práticos desse trabalho, um estudo em corpos de prova planos que foram submetidos a ensaio de tração com monitoramento de EA indicam resultados que tais sinais de EA têm forte relação com as características da carga-deflexão, principalmente próximo à ruptura. (SANJAY KUMAR SINGH, K. SRINIVASAN, D. CHAKRABORTY, 2003).

2.2.5 Gráfico tensão-deformação

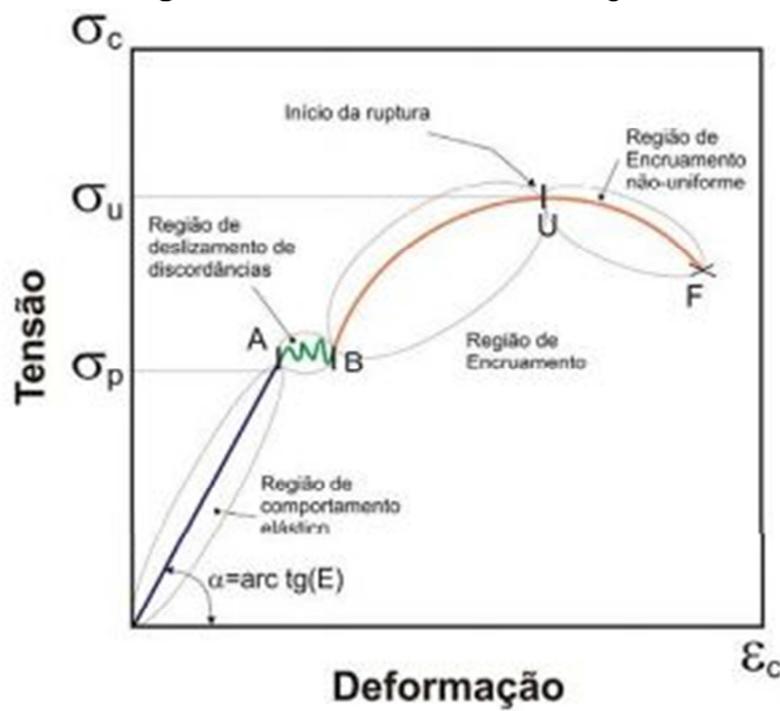
Com as informações obtidas na relação da tensão e da deformação nas três etapas anteriormente descritas, é possível obter o gráfico tensão-deformação, que varia conforme o material analisado (Figura 23 e Figura 24). Por exemplo, os materiais frágeis, como cerâmicas, concreto e aço de alto teor de carbono, não apresentam um limite de escoamento. Já os materiais dúcteis, como o alumínio ou o aço de baixo carbono, sendo esse último o objeto desse estudo, apresentam o limite de escoamento bem definido.

Figura 23 – Curva típica de gráfico tensão-deformação para materiais dúcteis



Fonte: SMITH, 2010

Figura 24 – Detalhamento das regiões



Fonte: SMITH, 2010

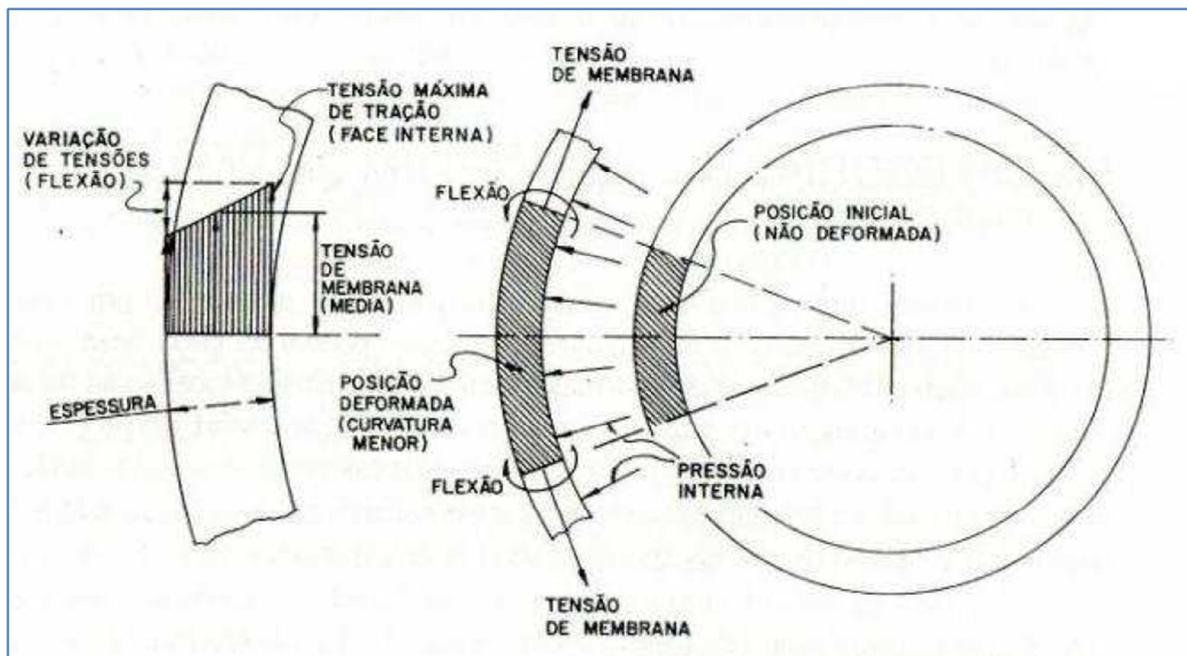
2.3 Tensões atuantes

Esse tópico foi direcionado para que fiquem elucidadas as tensões atuantes em vasos de pressão. Há de se reiterar que para os ensaios específicos desenvolvidos para essa dissertação foram verificadas somente as tensões de tração que, neste tópico, correspondem aos esforços tangentes às tensões de flexão gerada nas paredes externas do equipamento como é apresentado a seguir.

2.3.1 Tensões primárias

Tensões decorrentes de diversas cargas (pressão interna ou externa, peso, dentre outros) e necessárias para satisfazer o equilíbrio estático em relação aos diversos carregamentos atuantes, podendo ser normais (tração ou compressão) ou de cisalhamento. As tensões primárias normais podem ainda ser de membrana ou de flexão onde a membrana é supostamente constante ao longo da espessura do vaso, o contrário da de flexão que varia linearmente. A tensão de membrana devido à pressão interna é em geral de tração pelo fato de que o elemento da parede do vaso tende a aumentar de dimensão. A tensão de flexão é nula no centroide da parede, máxima de tração na superfície interna e máxima de compressão na superfície externa. Sendo assim, a tensão resultante na superfície interna é a tensão de membrana mais a tensão de flexão, como pode ser visto na indicação esquemática da Figura 25. (TELLES, 2007)

Figura 25 – Tensões de membrana e de flexão em um cilindro submetido à pressão interna.



Fonte: TELLES, 2007

2.3.2 Tensões Secundárias

Tensões que resultam de restrições geométricas no próprio vaso ou em estruturas solidárias a ele, não sendo, portanto, resultado de carregamentos atuantes sobre o material (cargas externas). Surgem em regiões de transição de formato ou de espessura, assim como em toda parte do vaso que não estiver livre para sofrer deformação ou dilatação. Sua característica básica é o fato de serem autolimitantes, ou seja, pequenas deformações plásticas locais reduzem estas tensões, de tal modo que o valor máximo que podem atingir é o limite de elasticidade do material. Caso haja um carregamento mais elevado, haverá maior deformação e a tensão secundária máxima permanecerá com o mesmo valor. Por isso, as tensões secundárias são incapazes de causar colapso plástico do equipamento (TELLES, 2007).

As normas de projeto fazem uma série de exigências quanto a detalhes construtivos dos vasos de pressão no sentido de atenuar transições de forma e de espessura, com o objetivo de minimizar o valor destas tensões. Descontinuidades planares localizadas em regiões de tensões secundárias estão sujeitas a um nível de tensões diferenciado podendo, inclusive, evoluir durante a pressurização

(DONATO, 2008).

2.3.3 Tensões Localizadas Máximas (Tensões de Pico)

Representam valores máximos das tensões atuantes em regiões limitadas do equipamento devido à concentração de tensões causada por descontinuidades geométricas, tais como defeitos de soldagem e regiões de transição de formato. Usualmente não são nocivas, embora possam alcançar valores elevados por atuarem em regiões pequenas do equipamento. Devem-se evitar valores muito elevados, pois podem dar origem a trincas por fadiga ou por corrosão sob tensão, assim como propagar uma trinca frágil no vaso de pressão. (TELLES, 2007)

2.4 Mecânica da Fratura

Os projetos convencionais são baseados na resistência dos materiais e consideram o carregamento aplicado e a resistência mecânica para determinar se um material está adequado para a aplicação requisitada. A resistência dos materiais considera o corpo avaliado como um meio contínuo e isento de defeitos, ignorando a presença de heterogeneidades que podem causar a concentração de tensões e levar à fratura com carregamentos inferiores à sua resistência mecânica. Por isso, a mecânica da fratura é também uma abordagem adequada para o estudo de engenharias reais, que contém em sua estrutura diversas descontinuidades. (ANDERSON, 1995)

A utilização de técnicas de EA aliada a ultrassom vem se mostrando de grande valia na avaliação de defeitos insipientes em diversos materiais. (MUKHOPADHYAY, et. al, 2014)

Em analogia à abordagem tradicional da resistência dos materiais, é correto dizer que a tenacidade é a variável que substitui a resistência como propriedade mais importante do material, sendo ela uma medida da resistência à propagação de trincas. O carregamento é definido de diversas formas, consideradas forças

geradoras para a fratura, e a variável adicional, não presente na abordagem tradicional, é o tamanho do defeito (ANDERSON, 1995).

Por definição, a mecânica da fratura é a ciência que estuda as estruturas que contém descontinuidades do tipo trincas, fornecendo conceitos e equações para determinar se um defeito pode ou não levar a estrutura à falha catastrófica, e em quais condições de carregamento a falha ocorreria (STROHAECKER, 1999). São essencialmente duas aplicações da mecânica da fratura em situações práticas:

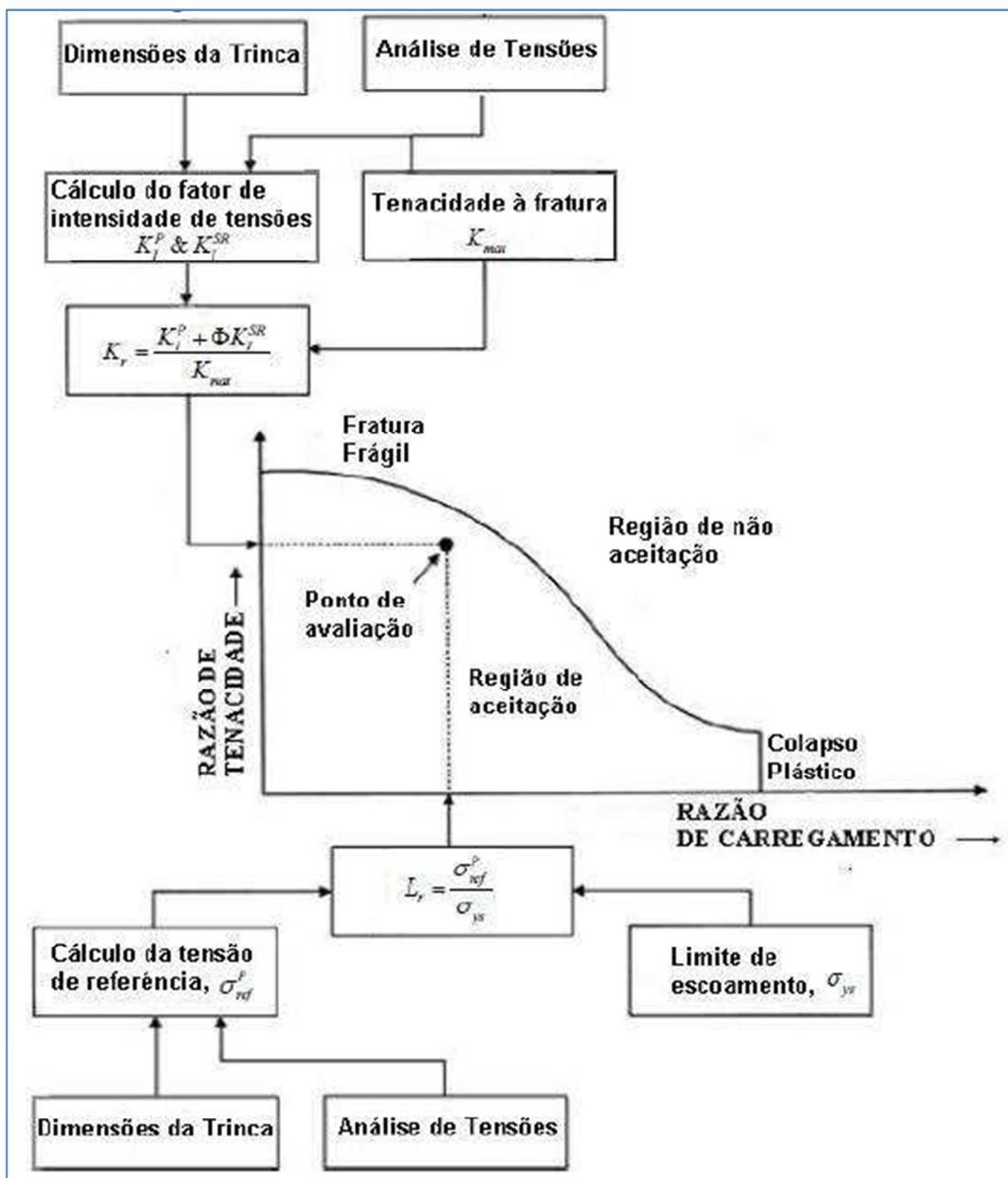
- Avaliação da importância e significado de defeitos;
- Comparação da tenacidade de diferentes materiais.

A avaliação do significado e importância de defeitos pode estar relacionada com decidir se um defeito detectado durante a fabricação ou em serviço necessita ou não de reparação, e ainda com o estabelecimento de critérios quantificados de aceitação de defeitos em estruturas. Descontinuidades inofensivas em determinadas situações poderão ser fatais em outros contextos, e a mecânica da fratura contribui para a definição do nível de aceitação dessas distorções, em cada caso.

2.4.1 Diagrama de FAD (*Failure Analysis Diagram*)

Downling e Towley (1999) introduziram o conceito do diagrama de análise de falha FAD (do inglês *Failure Analysis Diagram*) que descreve a interação entre a fratura frágil e o colapso plástico (Figura 26).

Figura 26 – Exemplo de um diagrama FAD



Fonte: TELLES, 2007

2.5 O material – Aço de baixo carbono

2.5.1 Considerações iniciais'

O ferro gusa, primeira etapa de fabricação de todo aço, é o mesmo para todos os produtos. Na fase seguinte, quando os elementos de liga são adicionados ou suprimidos no ferro gusa, é que são determinadas as grandes famílias de aço, dos mais rígidos aos mais estampáveis. O Carbono é o principal elemento endurecedor em relação ao ferro. Outros elementos, como o manganês, o silício e o fósforo, participam igualmente do ajuste do nível de resistência do aço. A quantidade de carbono define sua classificação: o baixo carbono possui no máximo 0,30% do elemento; o médio carbono apresenta de 0,30 a 0,60% e o alto carbono possui de 0,60 a 1,00%. (AKBARI, et. Al, 2010)

O carbono e outros elementos químicos agem com o agente de resistência, prevenindo o deslocamento de átomos de ferro na estrutura cristalina. Há grande diferença entre o aço e o ferro puro. Uma peça de ferro fundido é extremamente frágil enquanto nos aços, as propriedades mecânicas podem ser adequadas para o uso correto alterando seus elementos de liga, dentre estes, o principal que é o carbono. A composição da liga que confere ao aço o seu nível de resistência mecânica, usabilidade, soldabilidade, têmpera, dentre outros. (AKBARI, et. Al, 2010)

O aço pode ser classificado da seguinte maneira:

- Quantidade de carbono
- Quanto à sua aplicação
- Composição química
- Quanto à constituição microestrutural

2.5.2 Resposta acústica do aço baixo carbono

O aço ao carbono SAE 1020, cujas propriedades podem ser bem semelhantes a do ASTM-A36, é o aço normalmente utilizado na confecção de vasos de pressão. É um material de boa conformabilidade, usabilidade e soldabilidade para aplicações gerais. O seu limite de resistência no estado normalizado está na média de 48,5 kgf/mm² ou 476 MPa. Este aço, justamente por apresentar boa soldabilidade, é muito empregado para fabricação de peças em geral, inclusive vasos de pressão.

Uma avaliação sobre a existência de artigos técnicos que trata do assunto referente ao comportamento acústico deste tipo de ensaio e com esse material cuja estrutura contém baixo teor de carbono permite direcionar que existem relativamente escassos trabalhos ligados ao tema. Um documento que relata de maneira semelhante ao que foi proposto na dissertação foi descrito em 2010 por Akbari et al. Sob o título traduzido de “*A aplicação da técnica de EA para deformação plástica em aço de baixo carbono*”. A síntese desse documento pode ser acompanhada no tópico seguinte e pode ser utilizado para efeito comparativo.

Segundo o trabalho de Akbari et al. (2010) intitulado “A aplicação da técnica de EA para deformação plástica em aço de baixo carbono” na qual é utilizada a EA como uma técnica de ultra-som, o início da deformação plástica tem sido investigada em amostras com e sem entalhes, de aço AISI 1010. As atividades EA (número de pulsos e energia do sinal) e curva tensão-deformação foram medidas durante os testes. Os resultados mostram que a atividade de EA aumenta na proximidade do ponto de encruamento e atinge a máxima no início da deformação plástica. Atividade EA diminui significativamente com mais esforço. A principal fonte de EA em todas as fases de deformação é associada com os movimentos de deslocamentos.

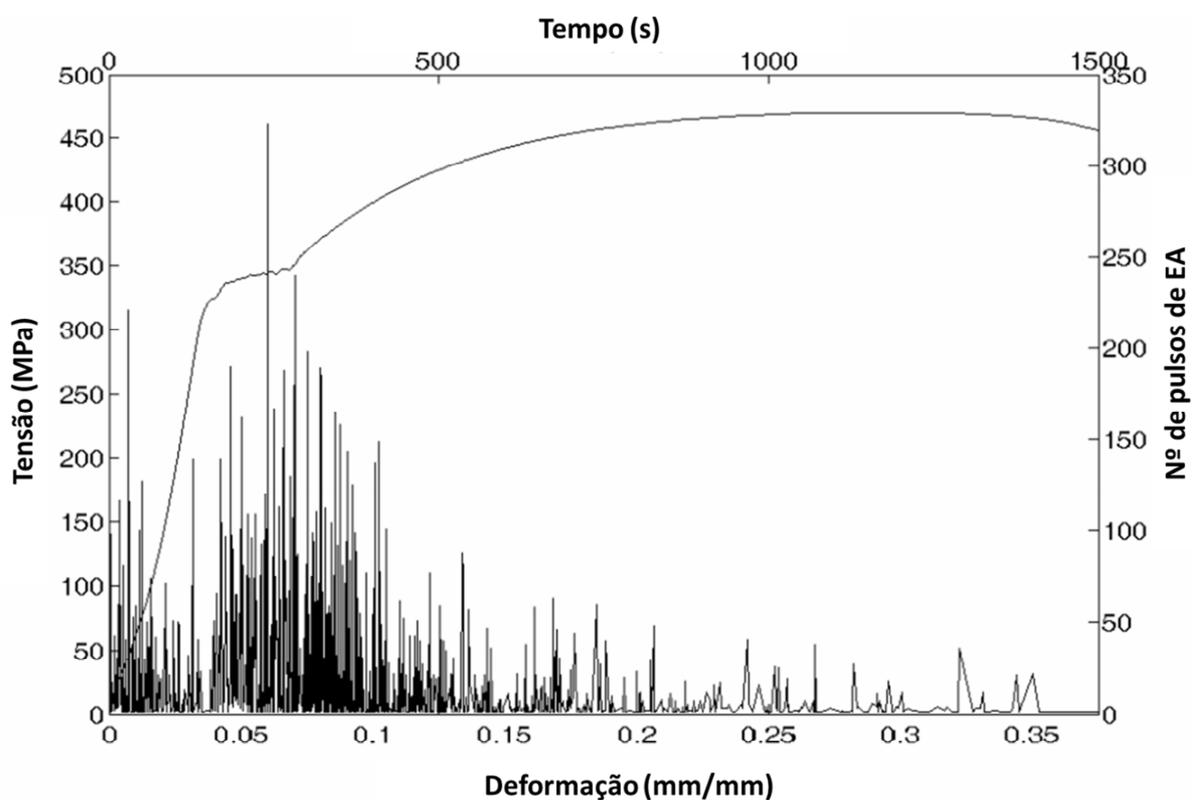
Ainda segundo Akbari et al. (2010), a deformação plástica da estrutura provoca a deformação permanente e, conseqüentemente, falha. Nos últimos anos a técnica da EA foi amplamente utilizada para a detecção do processo de deformação plástica dos materiais. Esse fenômeno influencia a EA gerada a partir do material submetido a carga de tração. Investigação sobre alumínio e berílio indica que a maior EA do corpo de prova sem falhas (liso) está perto do limite de elasticidade e para corpos de prova com entalhes (falhas) está localizado no ponto de maior fator de intensidade de tensão. O inquérito sobre o aço carbono manganês indica que a atividade de EA é proporcional à dimensão da zona plástica e a principal fonte de EA está no limite elástico-plástico. Os resultados de aço de baixo carbono indicaram que há grande fonte de EA no encruamento e está associada a deslocamentos nas fronteiras de grão.

O objetivo do trabalho, portanto, é investigar os sinais de EA durante a deformação de tração de AISI 1010 aço de baixo carbono. Sinais de EA foram gravados durante a deformação de amostras entalhadas e lisas e estes foram comparados com estado de tensão na curva tensão-deformação. Além disso, foram analisadas as frequências de sinais. (AKBARI, 2010)

No caso de aço de baixo carbono durante o processo de deformação de carga estática, pode ser dividido em três fases. A primeira fase é a fase de micro escoamentos ou elástica. Esta fase dura desde o início da carga até que a ocorrência das primeiras linhas de deslocamentos. A segunda fase é a fase de escoamento e terceira fase é a fase de encruamento. (AKBARI, 2010)

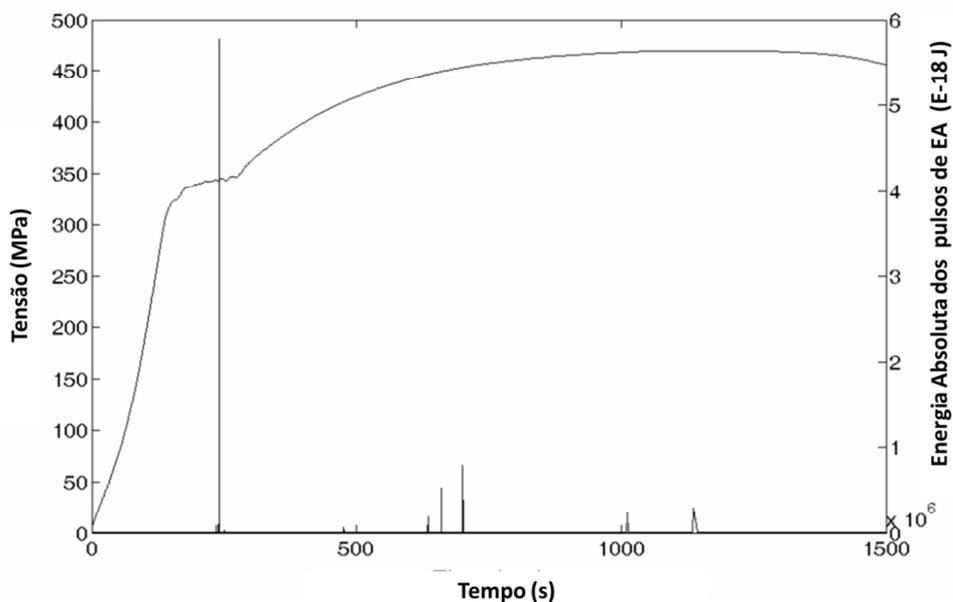
No processo de deformação plástica, o movimento de deslocação é a principal fonte de ondas de tensão. As Figura 27 e Figura 28 apresentam atividades de EA nas fases e também as primeiras deslocações que podem ser notadas.

Figura 27 – Variação de tensão e pulsos de EA com deformação e tempo



Fonte: AKBARI et al. (2010)

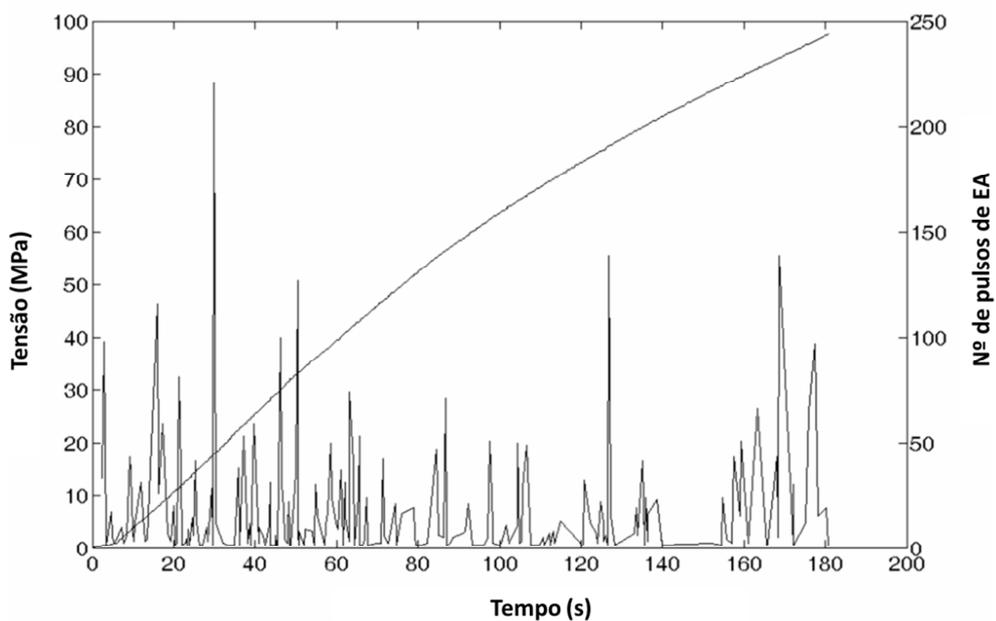
Figura 28 – Energia absoluta de EA com tensão pelo tempo



Fonte: AKBARI et al. (2010)

A Figura 29 a seguir apresenta a atividade de EA para a seção elástica da curva de tensão-deformação para corpo de prova sem entalhe.

Figura 29 – Variação da tensão e pulsos de EA com deformação do corpo de prova entalhado



Fonte: AKBARI et al. (2010)

Alguns autores acreditam que a principal fonte de EA na primeira fase de deformação é o contorno de grão. Os contornos de grão são importantes fontes de deslocamentos. Outros acreditam que a atividade EA está associada com encruamento local em torno de inclusões.

Na fase seguinte (fase de encruamento), foi observada intensiva atividade de EA. Interação de átomos de carbono e átomos de nitrogênio, intertravamento de deslocamentos e criação de intensa concentração de tensão, geração de novas deslocamentos, eventos que são principais fontes de EA.

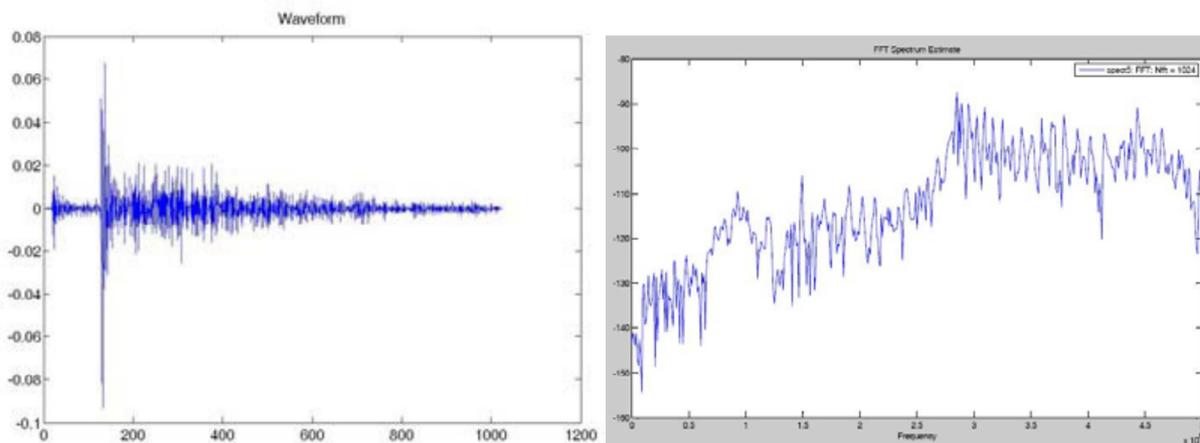
Na fase de encruamento “puro”, foram também observadas atividades EA. Na fase anterior, toda a banda de deslizamento intergranular foi esticada ao longo da direção da tensão. Assim, nesta fase, não há ondas acústicas que correspondem à deformação desta banda e nesse deslizamento ocorreram interações de nitrogênio-carbono. Assim, a diminuição das contagens EA nesta fase está relacionada com o redução das atividades de deslocamentos.

Por conseguinte, o início da deformação plástica para corpos de prova sem entalhe usando EA pode ser proposta em dois aspectos: Em primeiro lugar, o início da deformação plástica usando EA na fase de micro encruamentos devido a microtensão e em segundo lugar, o aparecimento de maciça deformação plástica no encruamento puro.

Para corpos de prova entalhados a influência deste detalhe no comportamento mecânico e acústico do material, em sua maioria, se dá entre encruamento e encruamento não uniforme. Além disso, no corpo de prova entalhado o valor de pulsos cumulativos para EA no final do ensaio é de 19541 e na amostra sem entalhe este valor é de 22373. Uma comparação entre estes dois valores indica que a atividade EA é menor os corpos de prova com entalhe devido ao menor volume do material deformado.

No que tange a análise de frequências dos sinais, a Figura 30 apresenta a forma de onda do sinal que ocorre na fase de deformação no encruamento para o corpo de prova sem entalhe e apresenta o espectro de frequência do sinal, respectivamente. A frequência de pico no espectro pode ser atribuída ao fenômeno físico predominante, em outras palavras, a frequência do fenômeno predominante corresponde à frequência de pico no espectro. Os picos em frequências de interesse destes sinais veem sendo, portanto, objeto de estudado durante os ensaios (Figura 31 e Figura 32). (AKBARI, 2009)

Figura 30 – Forma de onda e espectro de frequência na fase final de encruamento



Fonte: AKBARI et al. (2010) (foco comprometido na imagem original)

A Figura 31 demonstra que as frequências são dispersadas no início do teste, enquanto que no segundo ensaio de 150 (quando começa o encruamento), o mais frequências variam entre 280-310 KHz. Densidade maior de frequências de perto o rendimento correspondem a eventos mais elevados de material. Assim, estas frequências de pico estão associadas com deformação plástica em corpo de prova sem entalhe, evidentemente.

A Figura 32 também indica a frequência de pico para o corpo de prova entalhado. Nessa figura, as frequências são espalhadas durante o ensaio.

Uma comparação da Figura 31 com a Figura 32 ilustra que as frequências acústicas para o ensaio de deformação plástica se concentram na faixa de 270-300 kHz.

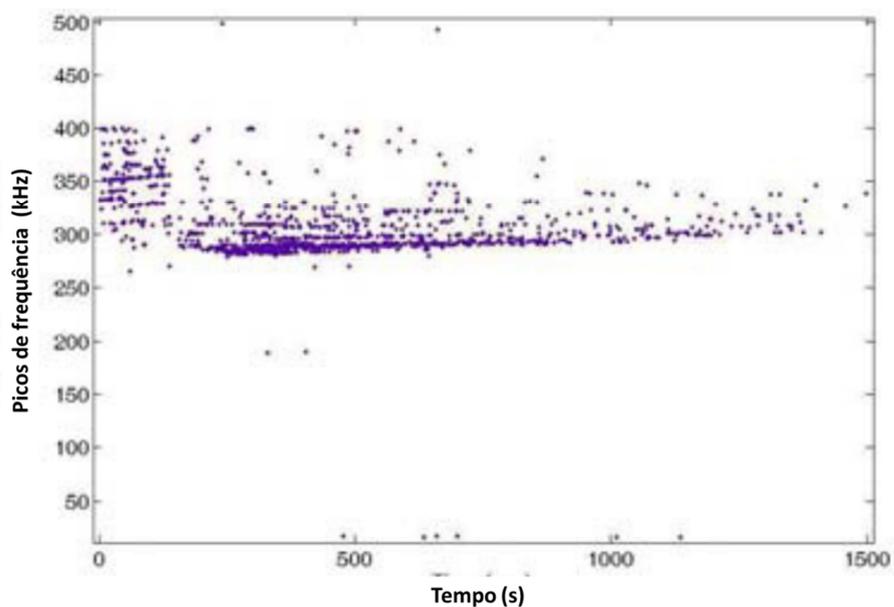
Os dados da EA durante os testes de tração de amostras lisas e entalhadas de AISI 1010 (aço de baixo carbono) foram analisadas e verificou-se que a principal fonte de EA em todas as fases de deformação está ligada com a as atividades de deslocações.

O início da deformação plástica pode ser divergido por EA em duas fases. A primeira com destaque para a EA gerada a partir de atividade de deslocamento nos contornos de grão, caracterizado por micro deslocações pela deformação plástica e o segundo destaque para a grande deformação plástica no encruamento puro e não uniforme devido ao movimento intenso de bandas de deslizamento ou união de planos de deslocações.

Os picos de sinais de frequência de EA foram então analisados e verificou-se

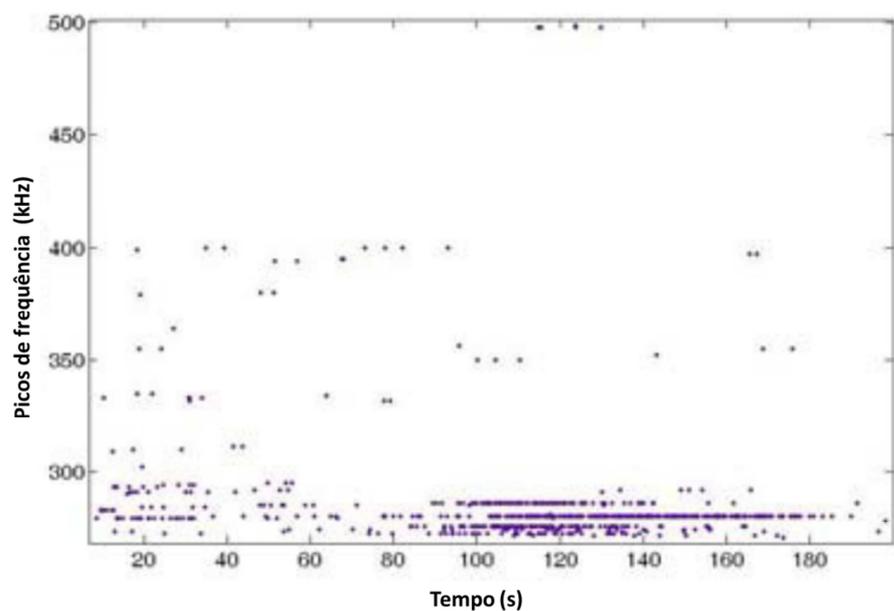
que as frequências acústicas para o aço de baixo carbono para um ensaio clássico de tração se concentram na faixa 270-300 kHz.

Figura 31 – Picos de frequência do ensaio com corpo de prova sem entalhe



Fonte: AKBARI et al. (2010) (foco comprometido na imagem original)

Figura 32 – Picos de frequência do ensaio com corpo de prova entalhado



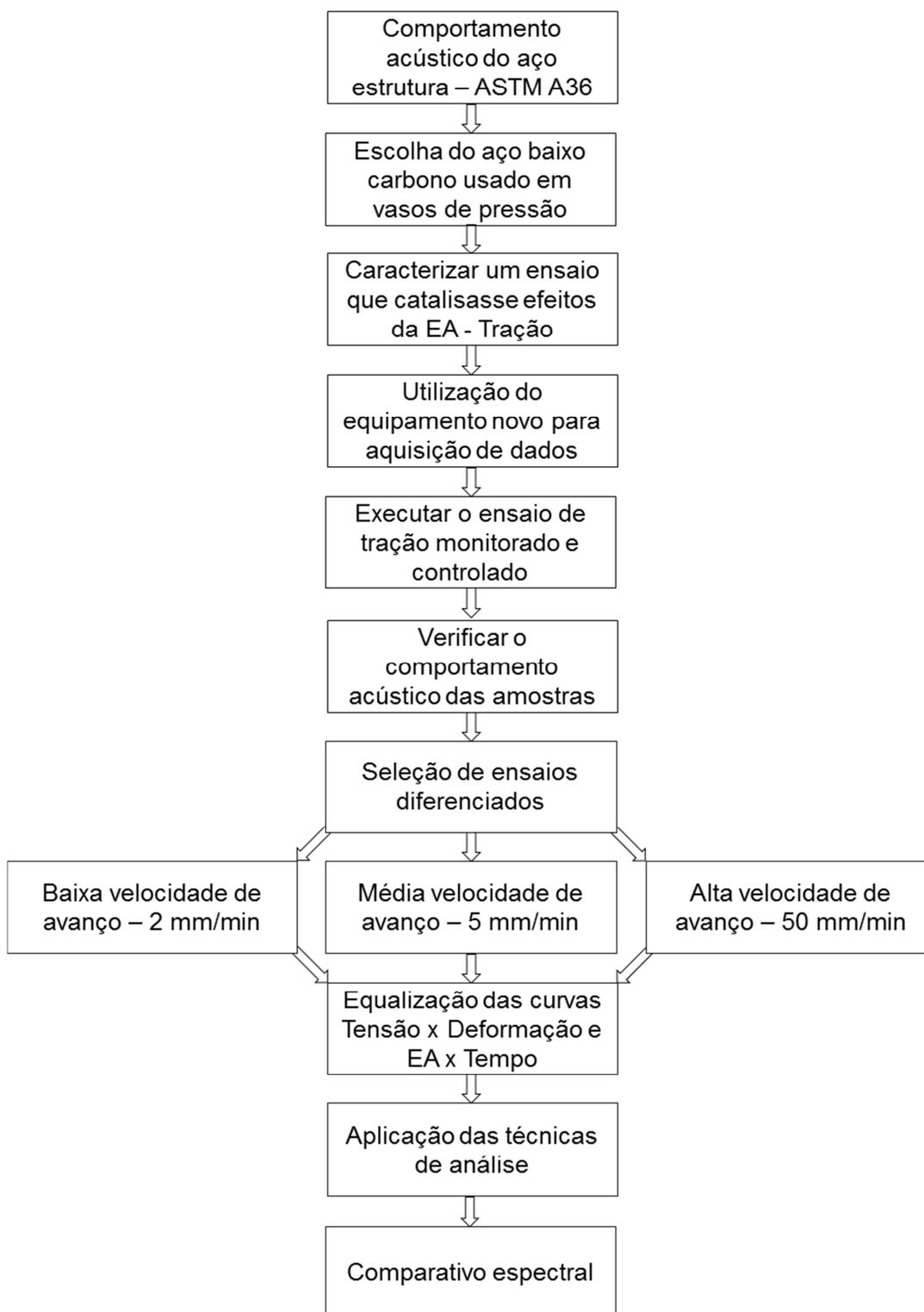
Fonte: AKBARI et al. (2010) (foco comprometido na imagem original)

3 METODOLOGIA

Na análise feita na revisão bibliográfica dessa dissertação é notória a importância da técnica de EA, sua aplicabilidade e o futuro promissor no que tange a manutenção preditiva. A essência do desenvolvimento desse trabalho foi a criação de uma ferramenta preditiva inovadora que trata dados de EA advindos de vasos de pressão. Toda a aquisição de dados, análise dos dados crus para a escolha das melhores curvas que caracterizassem o comportamento da EA, bem como o estudo dos espectros foi concebido dentro de parâmetros que estruturam atualmente as melhores práticas das técnicas preditivas existentes.

Para que fosse possível estudar o comportamento dinâmico acústico de um aço estrutural de baixo carbono, quando submetido a esforços externos, foram elaborados procedimentos que permitiram avaliar a influência não apenas do material, como também da dinâmica de imposição dos esforços, cuja principal característica é a velocidade de imposição das cargas, em que a utilização do ensaio de tração permitiu um maior controle dos experimentos, visto que a variável velocidade de carregamento que é a responsável pelo fator dinâmico do estudo, pode ser controlada. Desta forma, empregou-se a técnica da avaliação dos sinais de EA advindos dos corpos de prova onde todos os dados foram registrados em programas específicos de estudo de tensão-deformação e EA. Os tópicos a seguir apresentam, portanto, a sequência das atividades que foram desenvolvidas.

3.1 Fluxograma geral de atividades



Fonte: AUTOR, 2014

3.2 Caracterização do aço – ASTM A36

O objetivo basal dos ensaios de tração experimentais executados ao longo do trabalho foi coletar dados do comportamento acústicos das amostras. Por meio da variação de parâmetros de processo onde se procurava catalisar os efeitos da deterioração do material estrutural, fez-se, portanto, ensaios de tração que podemos classificar como “não padronizados”

Estes ensaios, por não terem seguidos as normas específicas dos ensaios de tração convencionais, de certa forma, mostraram valores um tanto quanto distintos nos gráficos de tensão e deformação com relação ao padrão gráfico que normalmente se obtém para o material em questão. Para efeito de caracterização do aço utilizado no trabalho, divulga-se a seguir o certificado de qualidade das amostras adquiridas. A saber:

									
CERTIFICADO DE QUALIDADE								Nº 033195	
Cliente: SMC - Sociedade Mineira de Cultura Endereço: Av. Dom José Gaspar 500 - Coração Eucarístico - Belo Horizonte / MG Nota Fiscal: 002 745									
								Nº do pedido: 156.912	
Material	Dimensões (mm)			Nº Peça		Corrida	Peso (Kg)		
1-ASTM A36	QD 101 60 x 1000 mm			01		12347611	30		
ANÁLISE QUÍMICA									
Item	Carbono	Cobre	Vanádio	Manganes	Fósforo	Silício	Enxofre	Cromo	Molibdênio
1	0,27	0,21	0	1,02	0,032	0,28	0,010	0	0
PROPRIEDADES MECÂNICAS / ULTRA-SOM									
Tratamento Térmico	NORMALIZADO								
Observação – As informações constantes neste certificado conferem com o original que encontra-se em nosso arquivo.									
 AÇOS GERAES LTDA.									
Rua Monsenhor Horta 75 - Vila São Paulo - CEP 32210-320 - Contage/MG Telefax (31) 3385-8235									

3.3 Resposta da EA nos ensaios de tração monitorados

Foram confeccionados vários corpos de prova padrão com o material de baixo carbono (ASTM A36). Por meio de um equipamento específico para esse fim (máquina de tração), tais elementos padrão foram então submetidos a ensaios monitorados de tração. Pelo equipamento de tração, foram monitoradas a tensão e a deformação por meio do processo detalhado no tópico 2.2. No que tange o monitoramento da EA, essa grandeza foi colhida também por meio de todo o aparato disponível, ou seja, o equipamento desenvolvido pelo projeto de pesquisa e, para efeito comparativo, o equipamento de aquisição de dados acústicos da PASA, ambos interligados a sensores de EA os quais foram fixados sempre na porção útil dos corpos de prova como demonstrado na Figura 33.

Cada elemento de prova foi ensaiado na máquina de tração e, por meio de recurso próprio desse equipamento, pode-se variar a velocidade de avanço e controlar essa variável em cada elemento, impondo velocidades que, para efeito de direcionamento do trabalho, foram consideradas baixa, média e alta. O resultado, portanto, se deu pela análise das variáveis lidas de tensão, deformação, EA e tempo, sob a imposição destas três classes de velocidade de avanço.

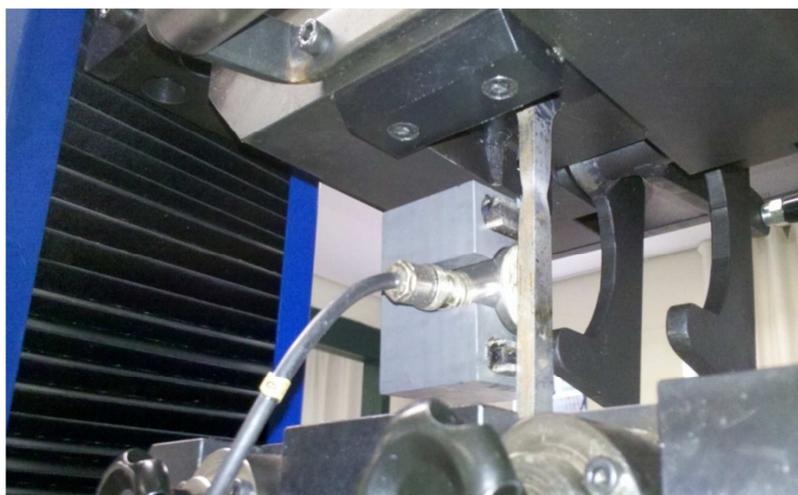
No fim do processo, obteve-se sucesso na obtenção de 6(seis) ensaios conforme apresenta a Figura 34 e destes, devido a conveniência técnica na escolha das melhores curvas apenas 3 (três) foram escolhidos para se aprofundar na análise de suas respectivas curvas de tensão pela deformação. Os dados foram fornecidos pelo equipamento de tração e a sequência de execução destes ensaios com os respectivos comentários dos diversos ensaios de tração estão relacionados no item 4.1. Vale ressaltar que o equipamento de tração possui recurso de manter a velocidade de avanço constante, ou seja, a importante correlação com o tempo fica, portanto, plausível e aceitável.

Da mesma forma, os concernentes sinais de EA no decorrer do tempo foram também adquiridos por meio do equipamento de EA e gerou-se, portanto, outro gráfico de EA pelo tempo. A opção de estudo para este segundo conjunto de dados, até mesmo pela natureza destes pulsos de EA que pode atingir resoluções na casa de nano-segundos, foram feitos pelo ajuste do valor eficaz ou RMS (*Root Mean Square*). Adotou-se um intervalo conveniente de tempo e se classificou os eventos

de EA ao longo do ensaio de forma que se fosse possível agrupar um conjunto de ocorrências de EA no decorrer do ensaio.

O produto destes ensaios foi, portanto, 2 (dois) gráficos que poder-se-ão ser correlacionados de tal forma que os eventos de EA são alocados em cada fase do gráfico de tensão x deformação, sinalizando quando este ocorreu e se esse evento se deu na zona elástica ou na região plástica (patamar de escoamento, zona de encruamento puro, encruamento não uniforme ou ainda na ruptura)

Figura 33 – Corpo de prova posicionado na máquina de tração com um dos sensores de EA fixado.



Fonte: AUTOR, 2014

Figura 34 – Corpos de prova ensaiados



Fonte: AUTOR, 2014

3.4 Cruzamento de dados das curvas de tensão, deformação, EA e tempo com análise dos espectros de frequência.

De posse dos dados da resposta acústica nos ensaios de tração, todas as curvas geradas foram, deste modo, correlacionadas de tal forma a se observar, em apenas 1 (um) gráfico, a curva da tensão pela deformação juntamente com a curva do sinal de EA pelo tempo. Como fora evidenciado, essa correspondência foi viável pelo fato de que a velocidade de avanço é contínua no tempo (linear), ou seja, foi possível estabelecer relação da deformação com o tempo. O ajuste de sincronia entre estas 2 (duas) grandezas foi feito, portanto, pelo último evento de EA que é caracterizado justamente pela ruptura do corpo de prova. Feito isso, todos os eventos de EA anteriores a este (ruptura) estarão alinhados com seu respectivo momento do estado de tensão ou da própria deformação.

3.5 Comparação dos maiores valores de amplitude observados nos espectros de frequência.

Com os dados dos gráficos correlacionados e sincronizados foram observados os principais eventos de EA em cada fase dos ensaios de tração. Estrategicamente, foram escolhidos os intervalos de pontos ou de tempo para que os espectros de frequência pudessem ser feitos a partir destes gráficos correlacionados.

Devido a grande quantidade de dados advindos destes espectros e até mesmo a limitação do recurso escolhido para a análise dos dados, houve a necessidade de se apontar somente os 5000 (cinco mil) pontos de maior amplitude e estes foram relacionados para as três curvas de interesse escolhidas, ou seja, uma para baixa, uma para média e outra para alta velocidade de avanço. A partir daí, uma série de análises, comparações e observações foram feitas em cada um dos espectros de frequência. Estudo este que pode ser avaliado em detalhes no item 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES TÉCNICAS

Nesta parte são apresentados os diversos gráficos de interesse no que tange sua tensão e deformação, de forma a correlacionar o comportamento acústico das amostras escolhidas. Para que se tenha um perfeito alinhamento das grandezas de tensão x deformação com os sinais de EA no tempo, as curvas foram posicionadas no eixo do tempo quando do rompimento do corpo de prova, ou seja, o último evento temporal de EA deve estar alinhado com o último evento de tensão.

As figuras a seguir apresentam sequencialmente o gráfico de tensão x deformação aliado ao gráfico de amplitude de EA x tempo e, logo após, outro gráfico comparativo das frequências observadas em cada fase do processo do ensaio de tração que, por sua vez, foi subgrupado em seu início, seu meio e seu fim. Tal divisão será elucidada a seguir. Reitera-se que, para efeito comparativo, a escala para todos os gráficos a escala de amplitude de EA foi sempre a mesma.

Para diferenciar o processo da EA nos diversos ensaios de tração realizados fez-se a variação da velocidade de estiramento dos corpos de prova que se deu de maneira lenta, média e rápida em razões de 2 mm/min (milímetros por minuto), 5 mm/min e 50 mm/min, respectivamente. Para todos os gráficos são destacados alguns períodos temporais que pertencem a etapas próprias do ensaio de tração que, por sua vez, concernem a 5 (cinco) fases específicas do experimento que são:

- Fase elástica: Região de comportamento elástico que, no gráfico, é compreendida do tempo 0 (zero) até o início do escoamento e apresenta comportamento basicamente linear.
- Fase do escoamento: Região de deslizamentos de discordâncias que também é denominada patamar de escoamento e é caracterizada por apresentar comportamento não linear vai desde o fim da fase elástica até o começo do encruamento.
- Fase de encruamento puro: Região que é caracterizada por aumento progressivo dos valores de tensão e segue até o ponto de maior valor de tensão atingido no ensaio, graficamente chamado de ponto de inflexão da curva.
- Fase de encruamento não-uniforme: Região que se inicia no ponto de maior tensão e segue até a ruptura, propriamente dita.

- Fase de ruptura: Região indicada no gráfico como a queda brusca da tensão caracterizando a quebra do corpo de prova.

Isso posto, tem-se que cada momento temporal destacado se enquadra em alguma destas fases. Os eventos de EA estão distribuídos de maneira particular e peculiar nos gráficos conseguidos, logo, houve a necessidade de se alocar estes sinais temporais em basicamente três etapas. A saber:

- Início do ensaio: Engloba de maneira temporal qualquer sinal acústico proeminente para a fase elástica e fase de escoamento.
- Meio do ensaio: Abrange temporalmente as ocorrências acústicas de destaque nas fases de encruamento puro e encruamento não uniforme.
- Fim do ensaio: Abarca praticamente os eventos acústicos relevantes para os sinais da ruptura propriamente dita.

4.1 Dados dos ensaios de tração

Ensaio 01) Experimento executado na velocidade de avanço: 1 mm/mim e atingiu 28,8 mm para a ruptura, entretanto, aparentemente o sensor ou o cabo deste apresentou problema. Os dados de EA ficaram, portanto, comprometidos.

Ensaio 02) Experimento bem sucedido na velocidade de avanço: 2 mm/mim e atingiu 30,5 mm para a ruptura.

Ensaio 03) Experimento bem sucedido na velocidade de avanço: 5 mm/mim e atingiu 29 mm para a ruptura.

Ensaio 04) Experimento bem sucedido na velocidade de avanço: 10 mm/mim e atingiu 31,5 mm para a ruptura.

Ensaio 05) Experimento bem sucedido na velocidade de avanço: 30 mm/mim e atingiu 27,2 mm para a ruptura

Ensaio 06) Experimento bem sucedido na velocidade de avanço: 50 mm/mim e atingiu 27,5 mm para a ruptura.

Por uma questão de conveniência técnica, dos ensaios acima descritos optou-se por aprofundar os estudos somente dos ensaios relacionados como 02, 03 e 06,

equivalentes às velocidades de avanço de 2, 5 e 50 mm/min, respectivamente.

4.2 Análise do ensaio para velocidade 2 mm/mim

A Figura 35 apresenta 2 (dois) gráficos agrupados em um único. Destaque para os 5 (cinco) momentos temporais que, conforme elucidado, pertencem a etapas próprias do ensaio de tração. O primeiro agrupamento de tempo é alocado para a fase de “início do ensaio”, outros 3 (três) próximos pertencem ao “meio do ensaio” e por fim, o último intervalo que se enquadra na fase de “fim do ensaio”. A saber:

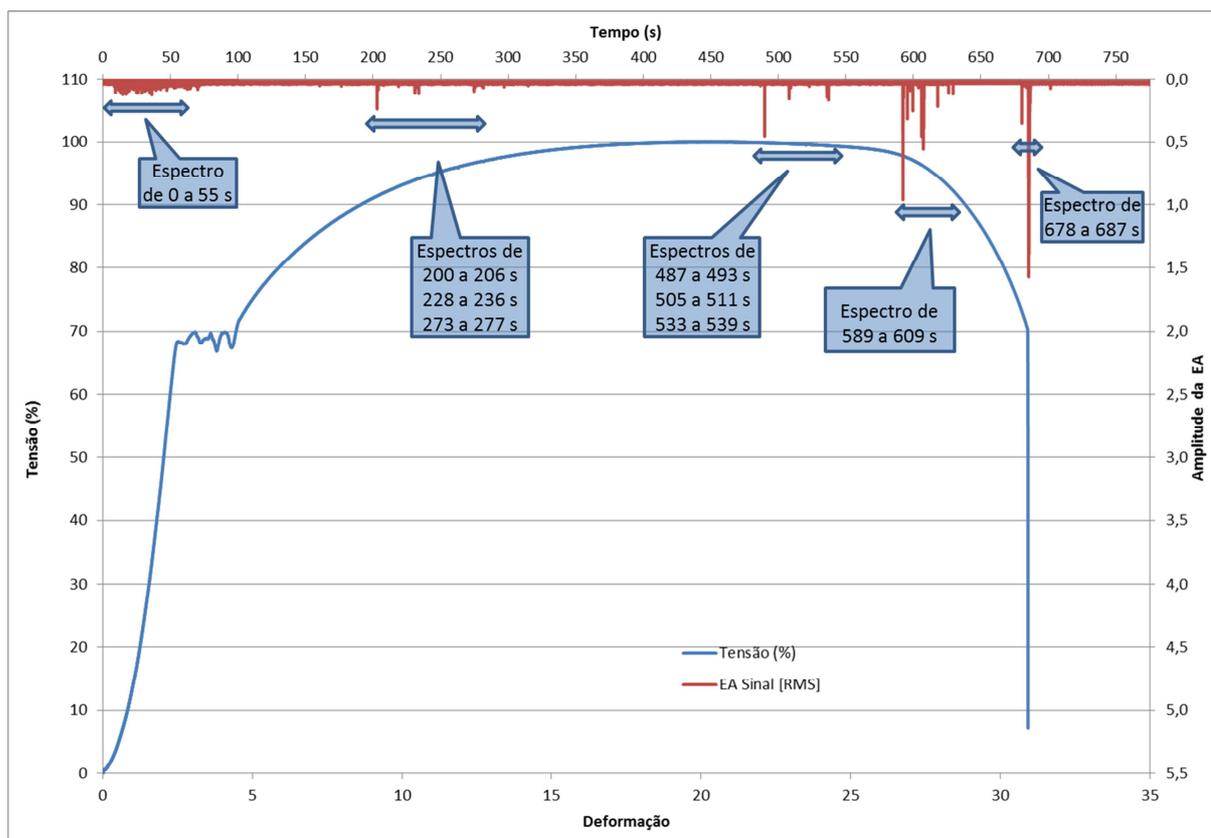
- De 0 a 100 segundos → Início do ensaio → Fase Elástica e escoamento
- De 190 a 300, de 480 a 532 e de 583 a 627 segundos → Meio do ensaio → Fase de encruamento e encruamento não uniforme.
- De 670 a 684 segundos → Fim do ensaio → Fase de ruptura

A curva sobressaída na cor vermelha indica o valor global (RMS), ou seja, as amplitudes eficazes da grandeza de EA em cada instante obtida por meio de tratamento matemático dos dados “crus” originais provindos da curva de sinais de “EA x tempo”.

A curva destacada na cor azul aponta para o valor da tensão aplicado no corpo de prova e, conseqüentemente, está correlacionada com os valores de sua deformação.

Ambas as curvas foram ajustadas e sincronizadas partindo-se dos sinais da ruptura, ou seja, o último evento de destaque de EA está coincidente com a última ocorrência de tensão.

Figura 35 – Gráfico duplo da Tensão x Deformação com Amplitude EA x Tempo
Velocidade de 2 mm/min



Fonte: AUTOR, 2014

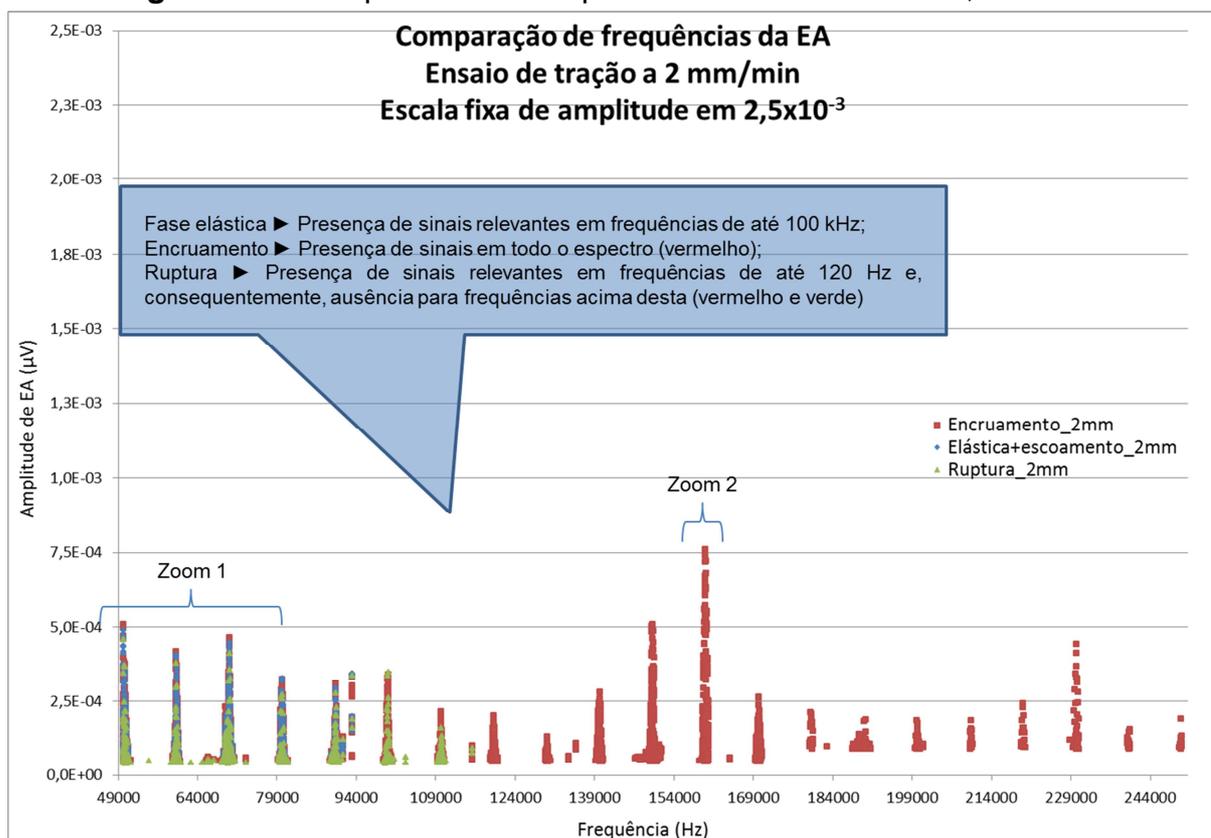
A Figura 36 adjunta indica os maiores pontos verificados para o espectro de frequência estratificados da curva de tendência (EA x tempo) apresentada anteriormente. O meio pelo qual se consegue extrair tais dados de frequência se resume pelo artifício matemático chamado de transformada rápida de Fourier (ou ainda *FFT – Fast Fourier Transformed*) que decompõe uma curva no domínio do tempo, transformando-a em outra no domínio da frequência.

Para efeito de foco ou centralização de área de interesse do ponto de vista técnico-analítico, o gráfico de espectro a seguir foi “seccionado” e expõe apenas as frequências consideradas altas e/ou altíssimas, ou seja, de 50 kHz a 250 kHz.

Na fase inicial (elástica + escoamento) há manifestação de sinais relevantes apenas na faixa espectral de até 100 kHz cujas amplitudes se mantêm relativamente baixas. Para a fase de encruamento, há uma distribuição geral ao longo de todo o espectro e ocorrem picos pouco mais acentuados na faixa de ± 160 kHz. Já na fase de ruptura os sinais relevantes são bem semelhantes aos sinais iniciais e, como

diferencial, avançam para a faixa ± 115 kHz. Nessa fase os sinais estão também ausentes na faixa de altíssima frequência.

Figura 36 – Comparativo de frequências – Velocidade de 2,0 mm/min

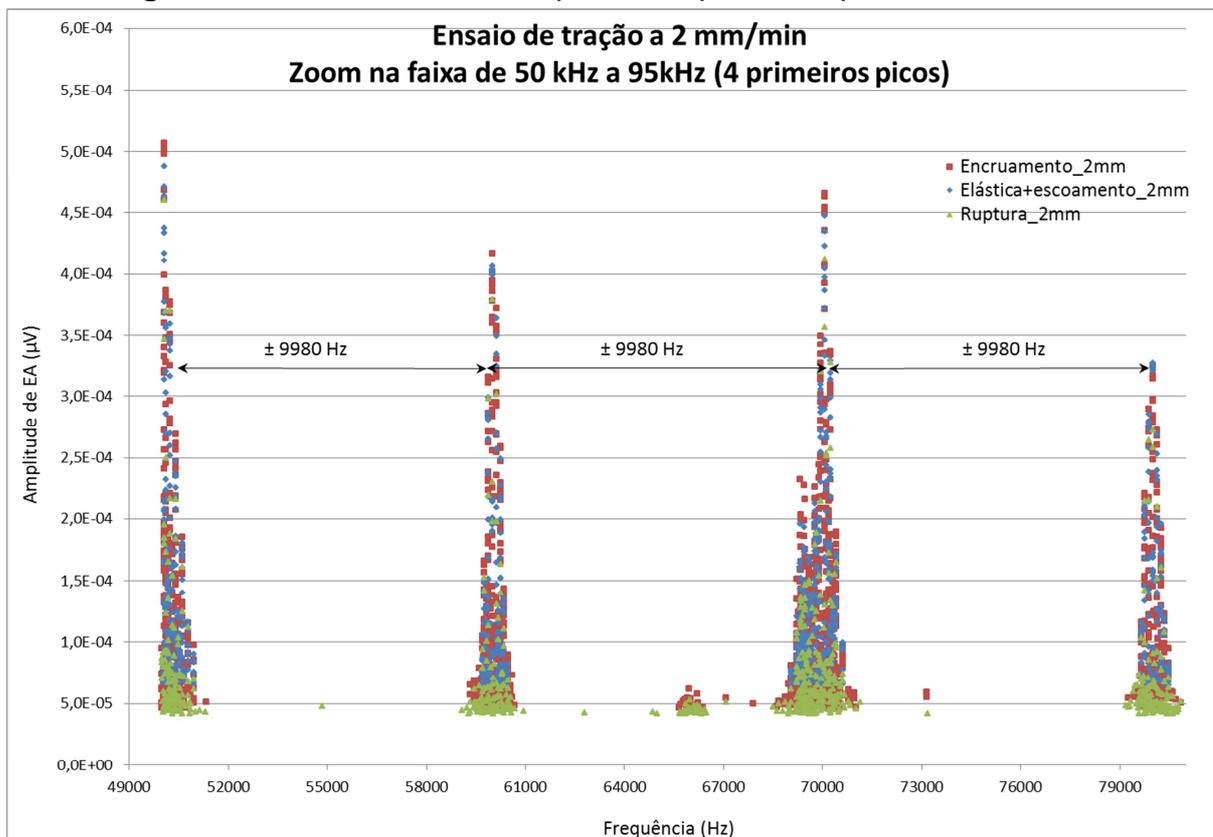


Fonte: AUTOR, 2014

A Figura 37 e Figura 38 próximas fazem o detalhamento indicado na Figura 36 como “Zoom 1” e “Zoom 2”, ou seja, regiões do gráfico para as quais o autor classifica como enfáticas. E desta forma será feito também para os itens posteriores que são 4.3 e 4.4.

Na Figura 37 destaque para a homogeneidade dos sinais nas três fases do ensaio (início, meio e fim). Para a faixa de frequência indicada, há sinais bem distribuídos ao longo do espectro, ou seja, a energia acústica pode ser observada de forma igualitária em todas as fases do ensaio. Há também uma certa equidistância média entre picos da ordem de 9980 Hz.

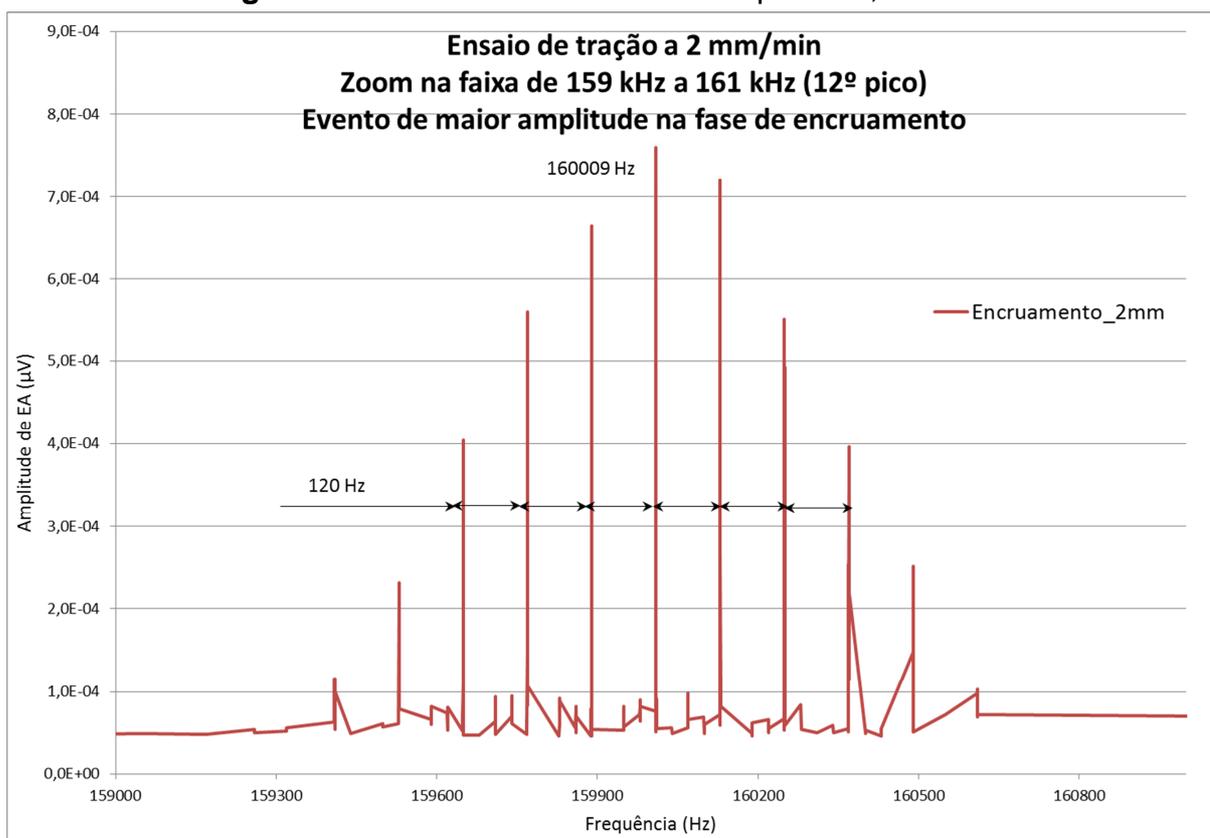
Figura 37 – Zoom 1 – Detalhe para os 4 primeiros picos – 2,0 mm/min



Fonte: AUTOR, 2014

A Figura 38 detalha o ponto de maior valor de pico que ocorreu precisamente na frequência da 160009 Hz. Nota-se que a partir dessa frequência, aparecem bandas laterais igualmente distribuídas com intervalos médios de frequência da ordem de 120 Hz. Desta forma, podemos estabelecer que há a formação de uma área energética em ± 160 kHz com bandas laterais em 120 Hz.

Figura 38 – Zoom 2 – Detalhe do 12º pico – 2,0 mm/min



Fonte: AUTOR, 2014

4.3 Análise do ensaio para velocidade de 5 mm/mim

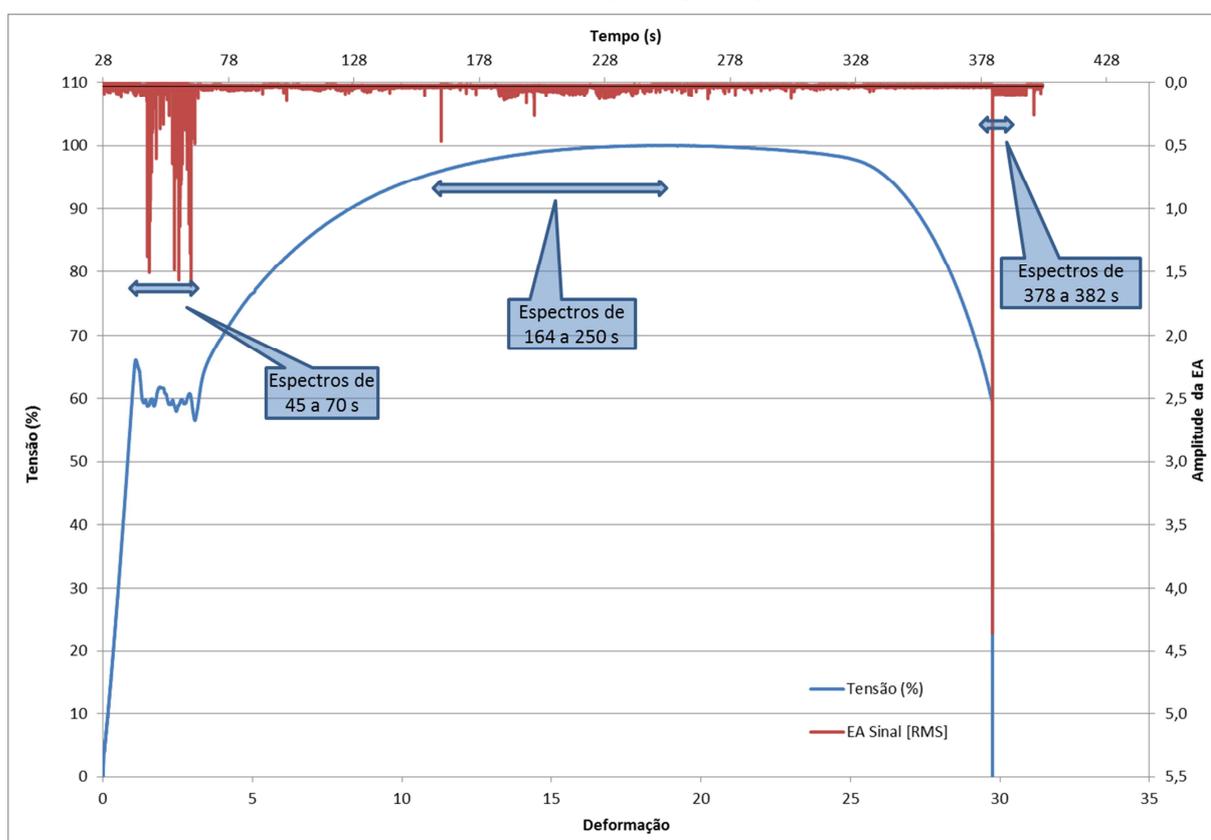
A Figura 39 apresenta também 2 (dois) gráficos agrupados em um único. Destaque para os 3 (três) momentos temporais que são enquadrados a etapas próprias do ensaio de tração. Os agrupamentos de tempo são alocados para esse ensaio como sendo 1 em cada fase, ou seja, fase de início, meio e fim do ensaio. A saber:

- De 47 a 70 segundos → Início do ensaio → Fase Elástica + Escoamento
- De 164 a 250 segundos → Meio do ensaio → Fase de encruamento e encruamento não uniforme

- De 378 a 382 segundos → Fim do ensaio → Fase de ruptura

As diferentes cores das curvas indicam cada grandeza que pode ser elucidada através da legenda no próprio gráfico. Ambas as curvas foram também adequadas e sincronizadas partindo-se dos sinais da ruptura, ou seja, o último evento de destaque de EA está coincidente com a última ocorrência de tensão.

Figura 39 – Gráfico duplo da Tensão x Deformação com Amplitude de EA x Tempo
Velocidade de 5 mm/min



Fonte: AUTOR, 2014

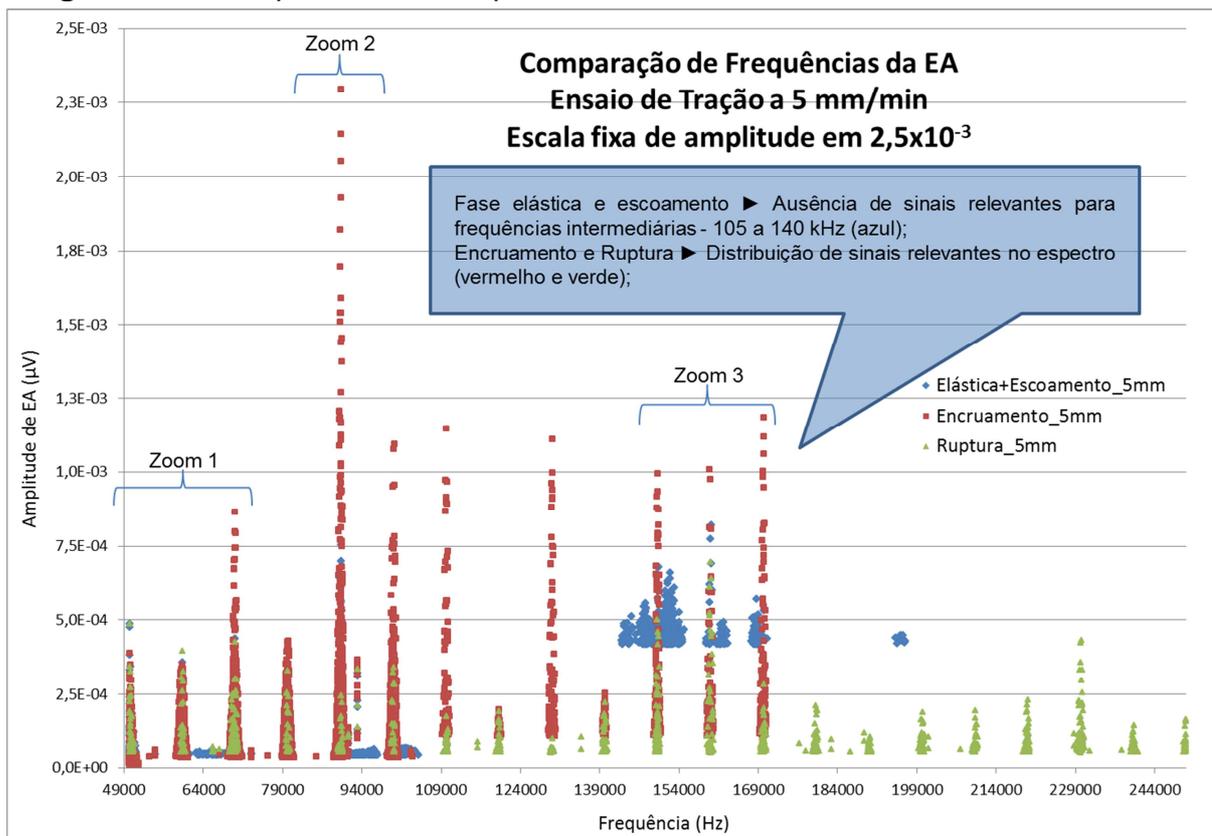
A Figura 40 indica os 5000 (cinco mil) maiores valores de maiores amplitudes verificados para o espectro de frequência estratificados da curva de tendência (EA x tempo). Dados extraídos pelo mesmo artifício matemático chamado de transformada rápida de Fourier (FFT).

O gráfico foi também “seccionado” e expõe apenas as frequências consideradas altas e/ou altíssimas, ou seja, de 50 kHz a 250 kHz.

Na fase inicial (elástica + escoamento) há manifestação de sinais relevantes

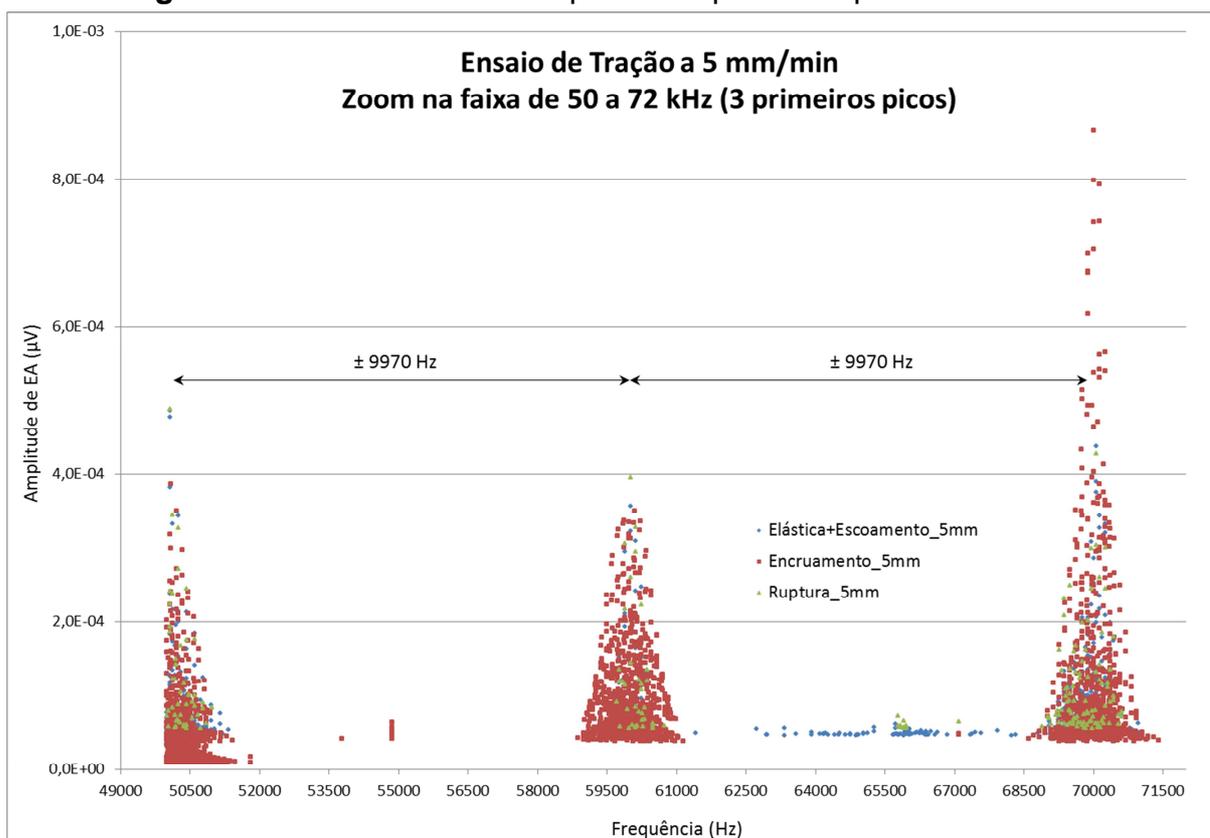
apenas na faixa espectral de 50 a 100 kHz e de 145 a 170 kHz. Para as fases de encruamento e ruptura, há uma distribuição geral ao longo de todo o espectro. As amplitudes se mostram em patamares medianos e ocorrem picos mais acentuados na faixa de ± 90 kHz.

Figura 40 – Comparativo de frequências observadas – Velocidade de 5,0 mm/min



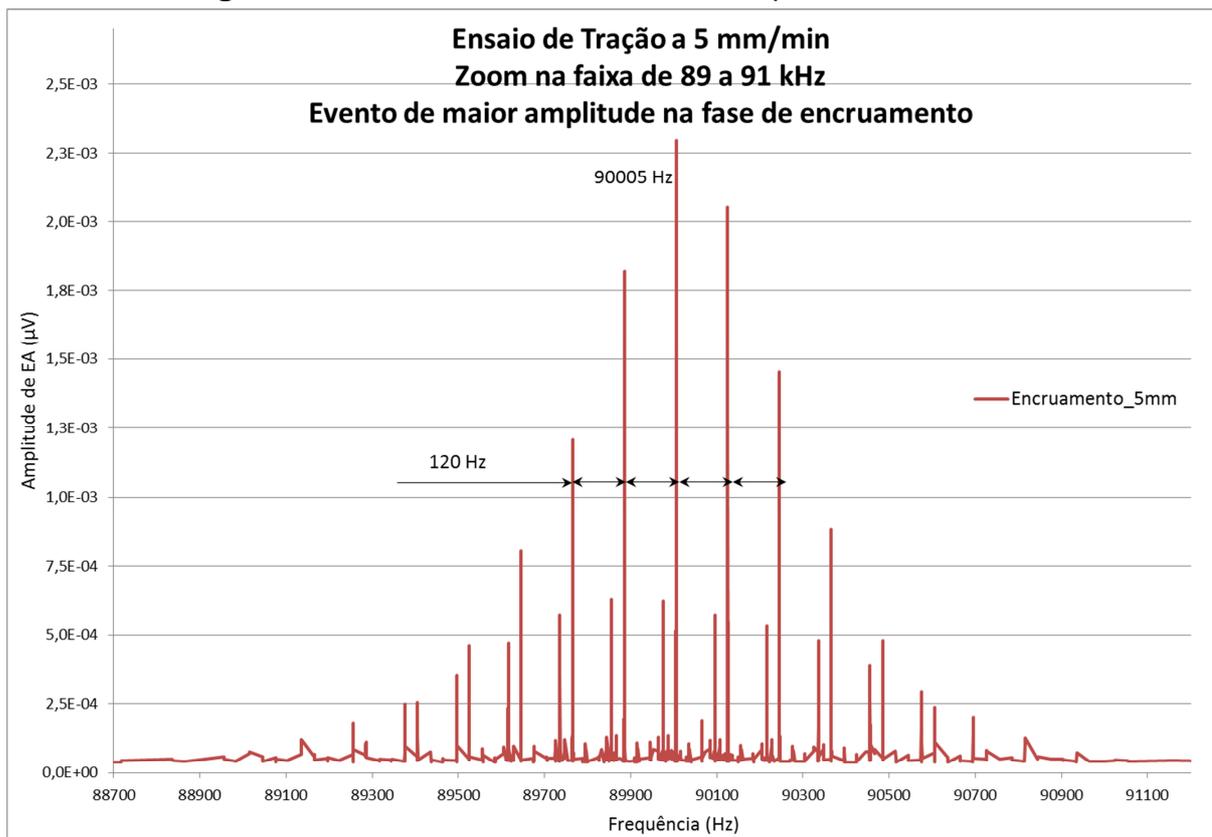
Fonte: AUTOR, 2014

Na Figura 41 destaque para a presença de sinais da fase de encruamento (meio). Há também certa equidistância média entre acúmulos de picos da ordem de 9970 Hz.

Figura 41 – Zoom 1 – Detalhe para os 3 primeiros picos – 5 mm/min

Fonte: AUTOR, 2014

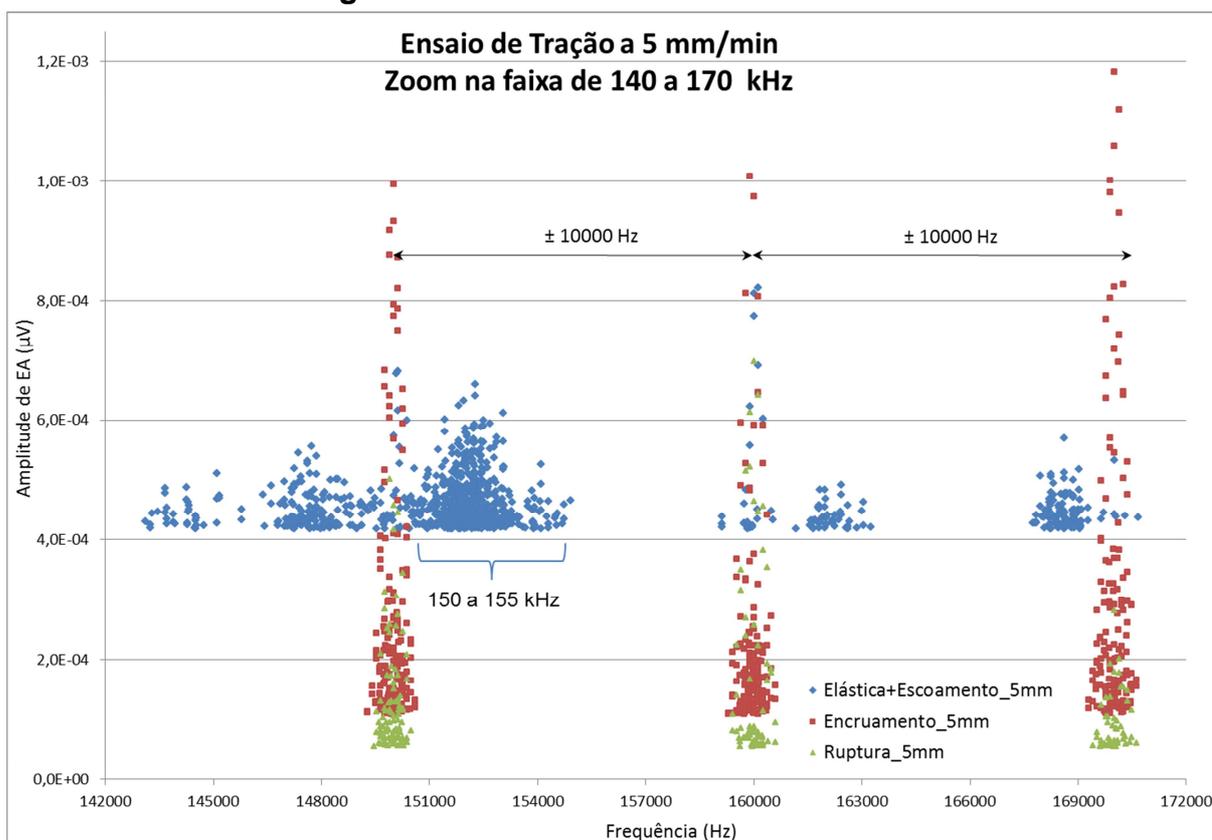
A Figura 42 detalha o ponto de maior valor de pico que ocorreu precisamente na frequência da 90005,3 Hz. Nota-se que a partir dessa frequência, aparecem bandas laterais igualmente distribuídas com intervalos médios de frequência da ordem de 120 Hz.

Figura 42 – Zoom 2 – Zona de maior amplitude – 5 mm/min

Fonte: AUTOR, 2014

A Figura 43 detalha a região do gráfico que apresenta sinais relevantes da fase inicial (elástica e escoamento). Tal energia se concentrou no intervalo de 150 a 155 kHz. Destaque também para os intervalos de picos no encruamento que se deu na ordem de 10 kHz.

Figura 43 – Zoom 3 – Detalhe – 5 mm/min



Fonte: AUTOR, 2014

4.4 Análise do ensaio para velocidade de 50 mm/mim

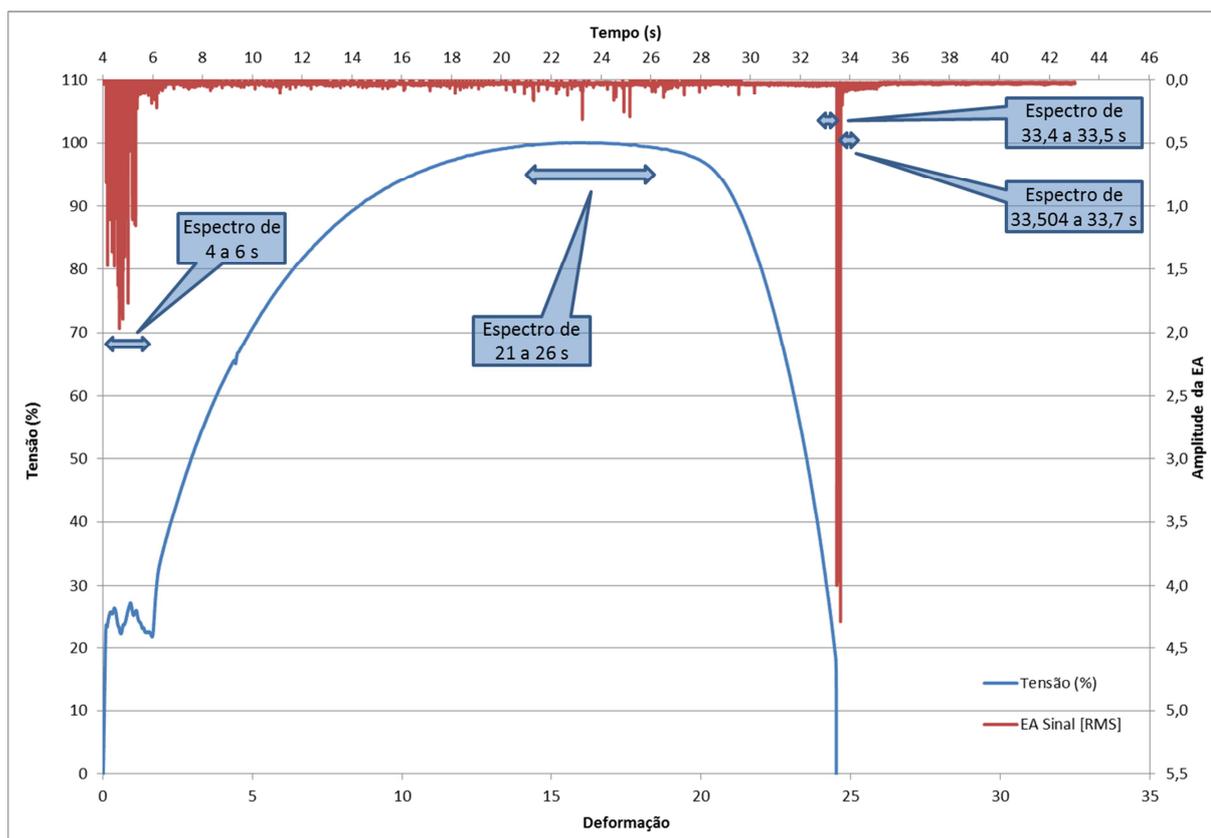
A Figura 44 exibe também 2 (dois) gráficos agrupados em um único. Destaque para os 3 (três) momentos temporais que são enquadrados a etapas próprias do ensaio de tração. Os agrupamentos de tempo são alocados para esse ensaio como sendo 1 em cada fase, ou seja, fase de início, meio e fim do ensaio. A saber:

- De 4 a 6 segundos → Início do ensaio → Fase Elástica + Escoamento
- De 21 a 26 segundos → Meio do ensaio → Fase de encruamento e encruamento não uniforme
- De 33,4 a 33,7 segundos → Fim do ensaio → Fase de ruptura

As diferentes cores das curvas indicam cada grandeza que pode ser elucidada através da legenda no próprio gráfico. Ambas as curvas foram também

adequadas e sincronizadas partindo-se dos sinais da ruptura, ou seja, o último evento de destaque de EA está coincidente com a última ocorrência de tensão.

Figura 44 – Gráfico duplo da Tensão x Deformação com Amplitude de EA x Tempo
Velocidade de 50 mm/min



Fonte: AUTOR, 2014

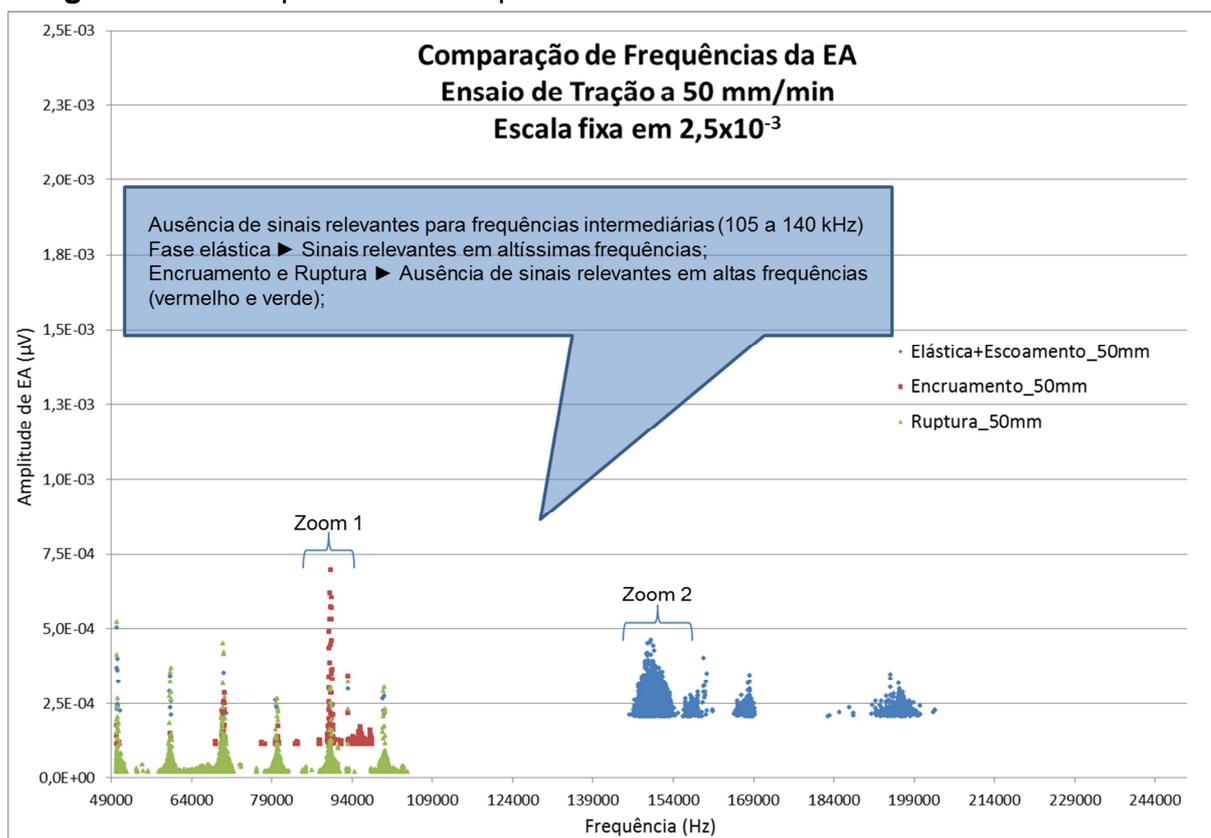
A Figura 45 expõe também as maiores amplitudes verificadas para o espectro de frequência estratificados da curva de tendência (EA x tempo). Dados extraídos pelo mesmo artifício matemático chamado de transformada rápida de Fourier (FFT).

O gráfico foi também “seccionado” e expõe apenas as frequências consideradas altas e/ou altíssimas, ou seja, de 50 kHz a 250 kHz.

Na fase inicial (elástica + escoamento), apesar de haver pontos isolados para a faixa inferior a 100 kHz, há ampla manifestação de sinais relevantes na faixa espectral acima de 150 kHz. Para as fases de encruamento e ruptura, existe uma concentração de pontos abaixo de 100 kHz. Para os três momentos houve ausência de pontos relevantes na faixa de 105 a 140 kHz. As amplitudes se mostram em

patamares medianos e ocorrem picos mais acentuados também na faixa de ± 90 kHz.

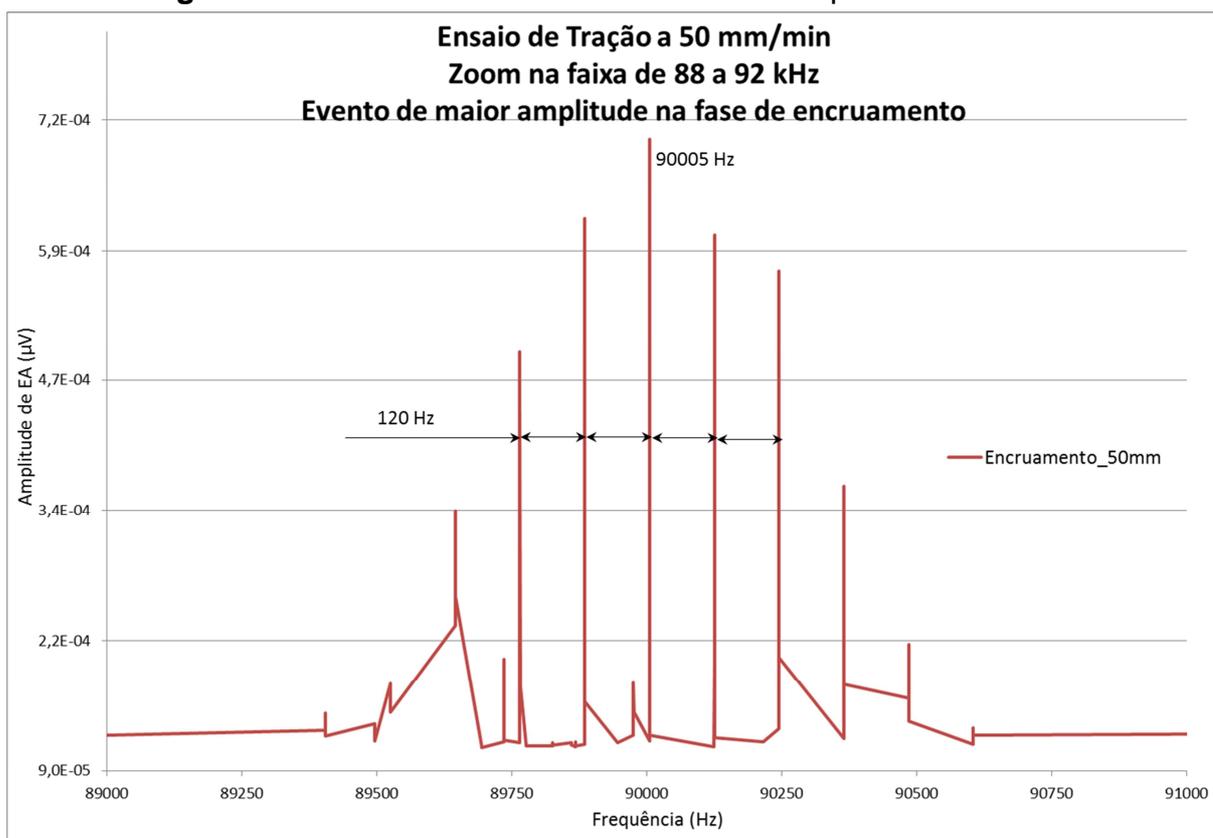
Figura 45 – Comparativo de frequências observadas – Velocidade de 50 mm/min



Fonte: AUTOR, 2014

A Figura 46 detalha o ponto de maior valor de pico que ocorreu precisamente na frequência da 90005,3 Hz. Nota-se que a partir dessa frequência, aparecem bandas laterais igualmente distribuídas com intervalos médios de frequência da ordem de 120 Hz.

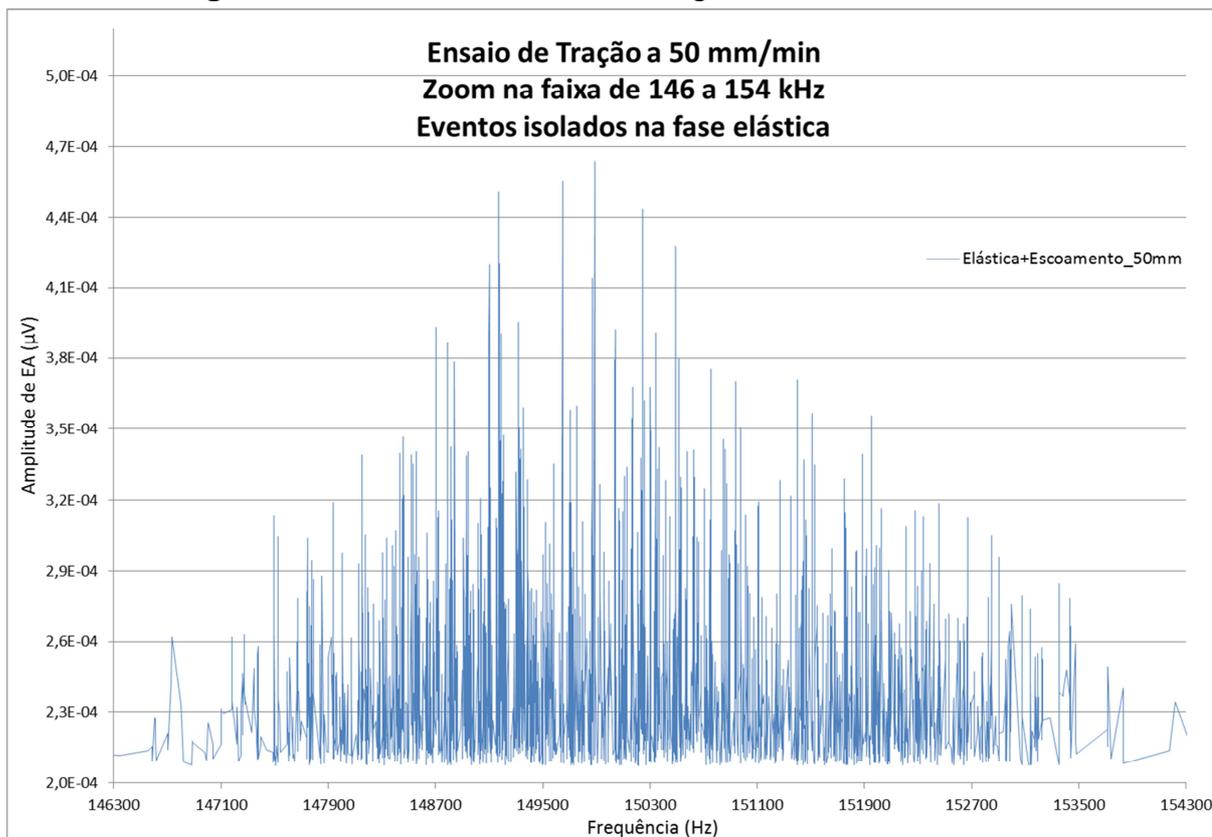
Figura 46 – Zoom 1 – Detalhe o maior valor de pico – 50 mm/min



Fonte: AUTOR, 2014

A Figura 47 detalha o acúmulo de energia acústica verificado na faixa de frequência de 147 a 154 kHz. O maior valor de pico se deu na frequência de 149888,833 Hz. Diferentemente das verificações anteriores, a configuração gráfica dos valores para essa faixa se mostrou aleatória, ou seja, há uma grande quantidade de pontos sem uma sequência definida.

Figura 47 – Zoom 2 – Zona de energia acústica – 50 mm/min



Fonte: AUTOR, 2014

4.5 Análise do ensaio por fase (Inicial, meio e fim)

As figuras ou gráficos deste tópico apresentam gráficos comparativos das frequências observadas somente na fase elástica e escoamento (início), exclusivamente na fase de encruamento (meio) e tão-somente na ruptura (fim).

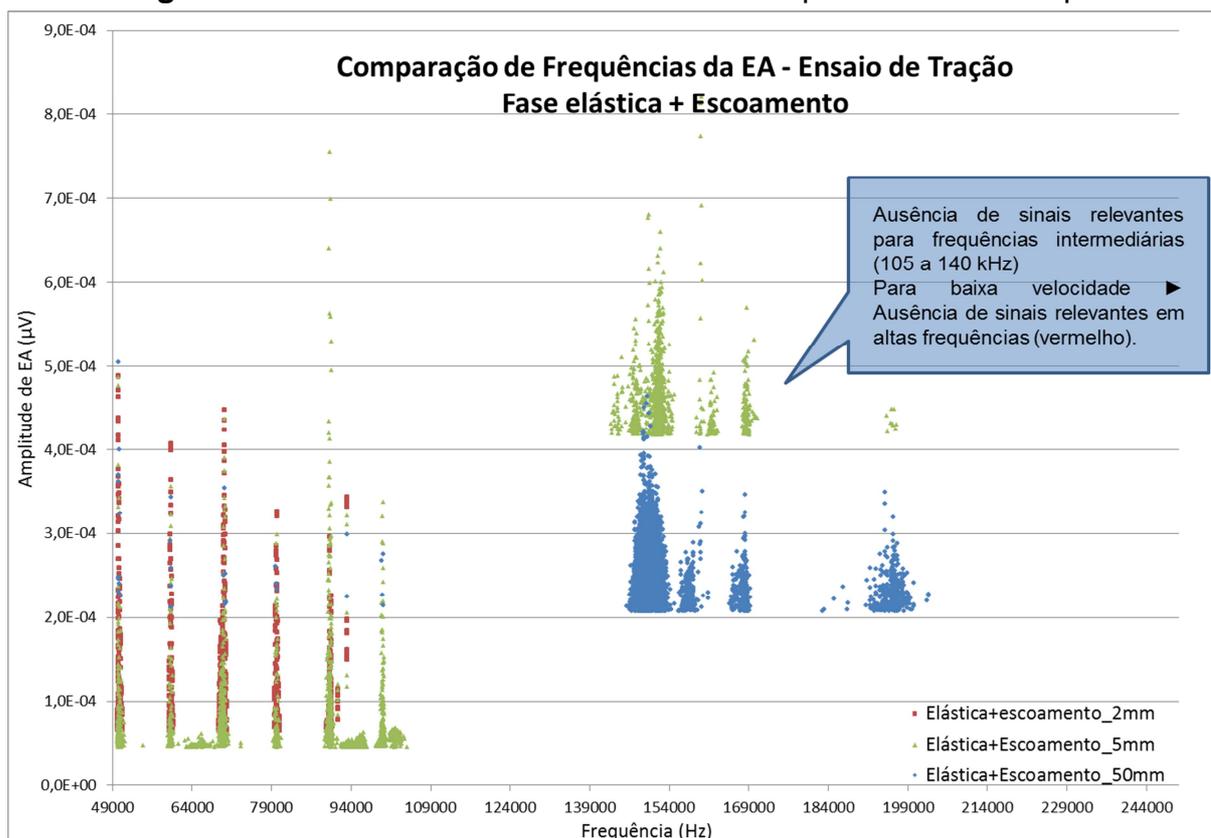
4.5.1 Comparação relativa para a fase elástica e escoamento

Na Figura 48, destaque para a ausência de pontos relevantes na faixa intermediária do espectro visível, ou seja, não se observa sinais proeminentes na faixa de 105 a 140 kHz. Para a velocidade mais baixa (2 mm/min) os pontos ocorrem somente na parte inferior do espectro aparente, ou seja, de 50 a 100 kHz. Já em

velocidades superiores (5 e 50 mm/min) há também uma concentração de pontos na faixa espectral acima de 140 kHz.

Para esta fase elástica e escoamento, as amplitudes apresentam valores medianos e destaque algum fora observado.

Figura 48 – Fase elástica e escoamento – Frequências de destaque



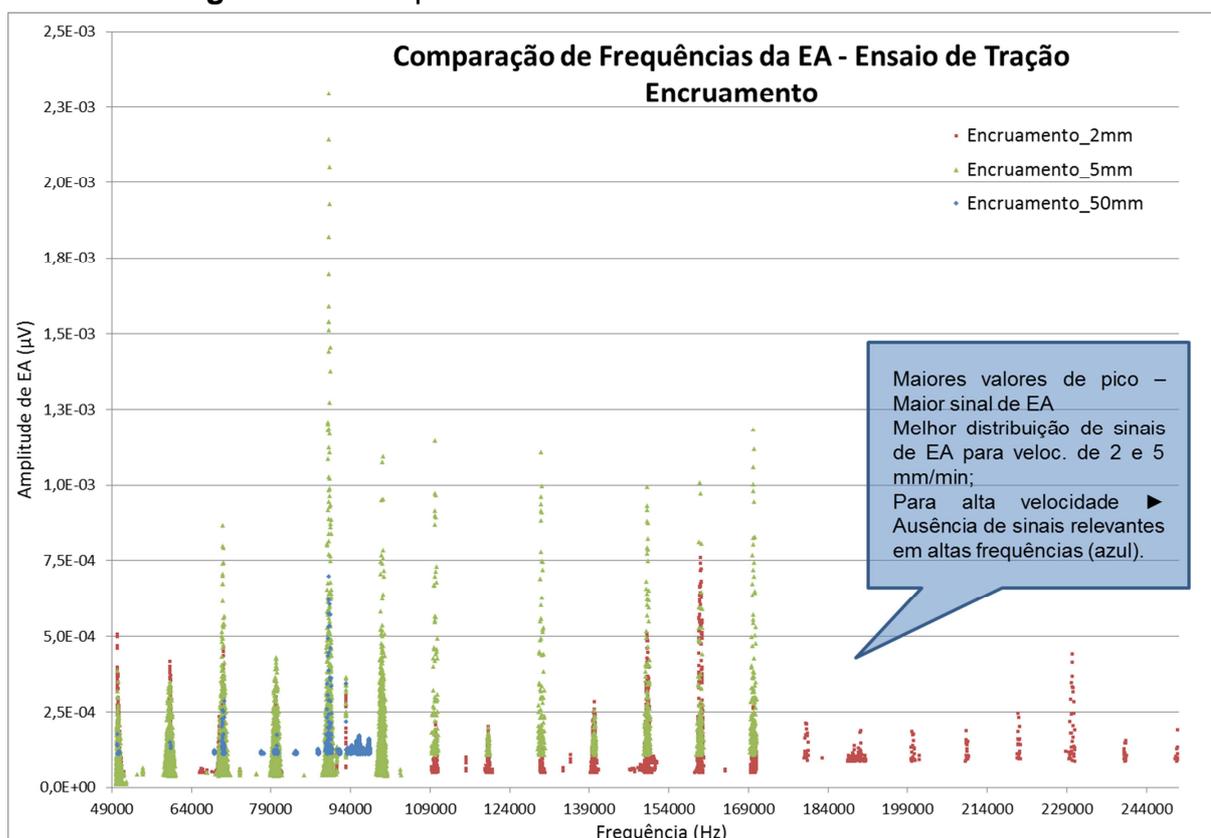
Fonte: AUTOR, 2014

4.5.2 Comparação relativa para a fase de encruamento

Na Figura 49 nota-se que há uma distribuição mais harmônica no espectro de pontos relevantes para a velocidade mais baixa (2 mm/min) que aparecem em praticamente toda a faixa, de 50 a 250 kHz. Para a velocidade intermediária (5 mm/min) esta apresenta pontos no espectro de 50 a 170 kHz. Já para a velocidade mais alta (50 mm/min), esta possui destaque apenas para frequências abaixo de 100 kHz, ou seja, está ausente para faixa de frequências maiores que esta.

Nesta fase de encruamento as amplitudes se apresentam relativamente maiores com destaque para a faixa de frequência próxima de 90 kHz que alcançou os maiores valores para todas as amostras deste ensaio.

Figura 49 – Frequências observadas – Fase de encruamento



Fonte: AUTOR, 2014

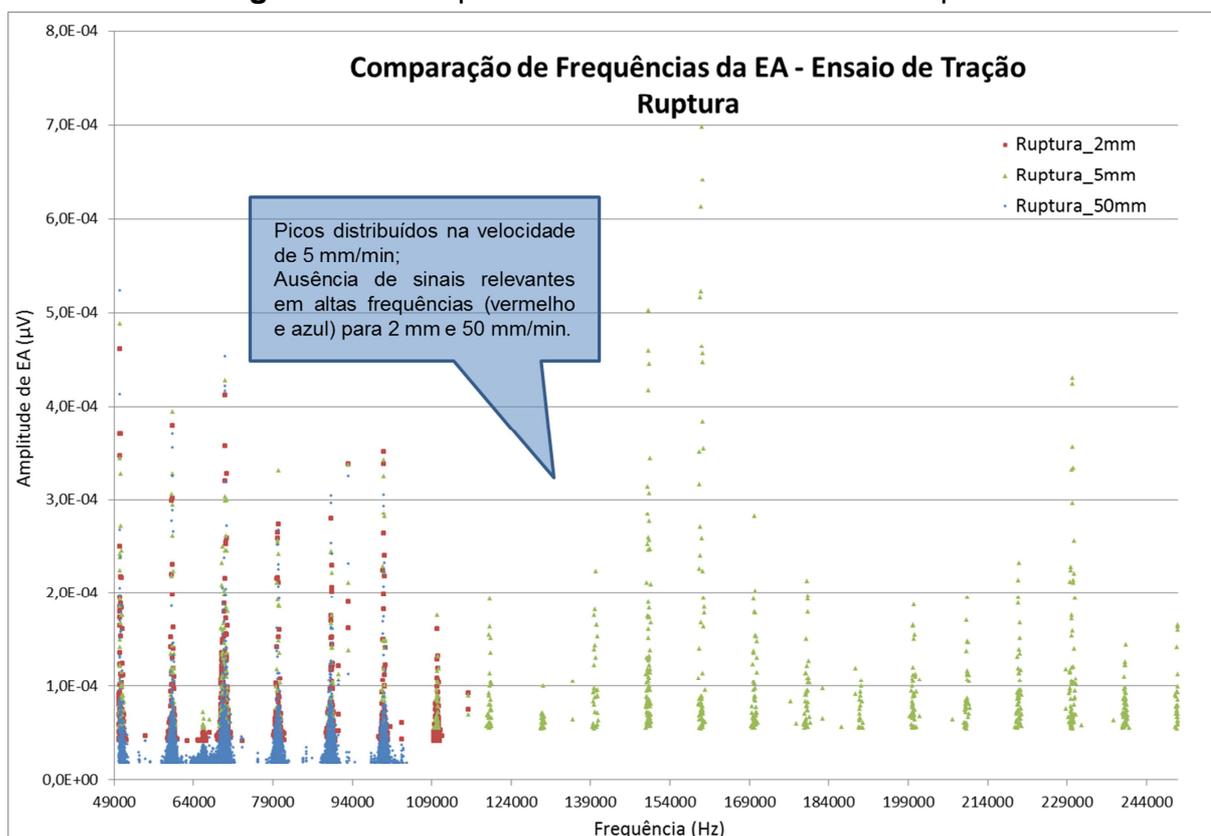
4.5.3 Comparação relativa para a fase de ruptura

Na Figura 50 nota-se que há uma distribuição mais harmônica no espectro de pontos relevantes para a velocidade intermediária (5 mm/min) que aparecem em praticamente toda a faixa, de 50 a 200 kHz. Já para as velocidades de 2 e 50 mm/min, esta possui destaque apenas para frequências abaixo de 115 kHz, ou seja, é notória a ausência de valores relevantes para faixa de frequências maiores que esta.

Nesta fase de ruptura as amplitudes se comportam de maneira mediana e

não há destaque ou pontos proeminentes no espectro.

Figura 50 – Frequências observadas – Fase de ruptura

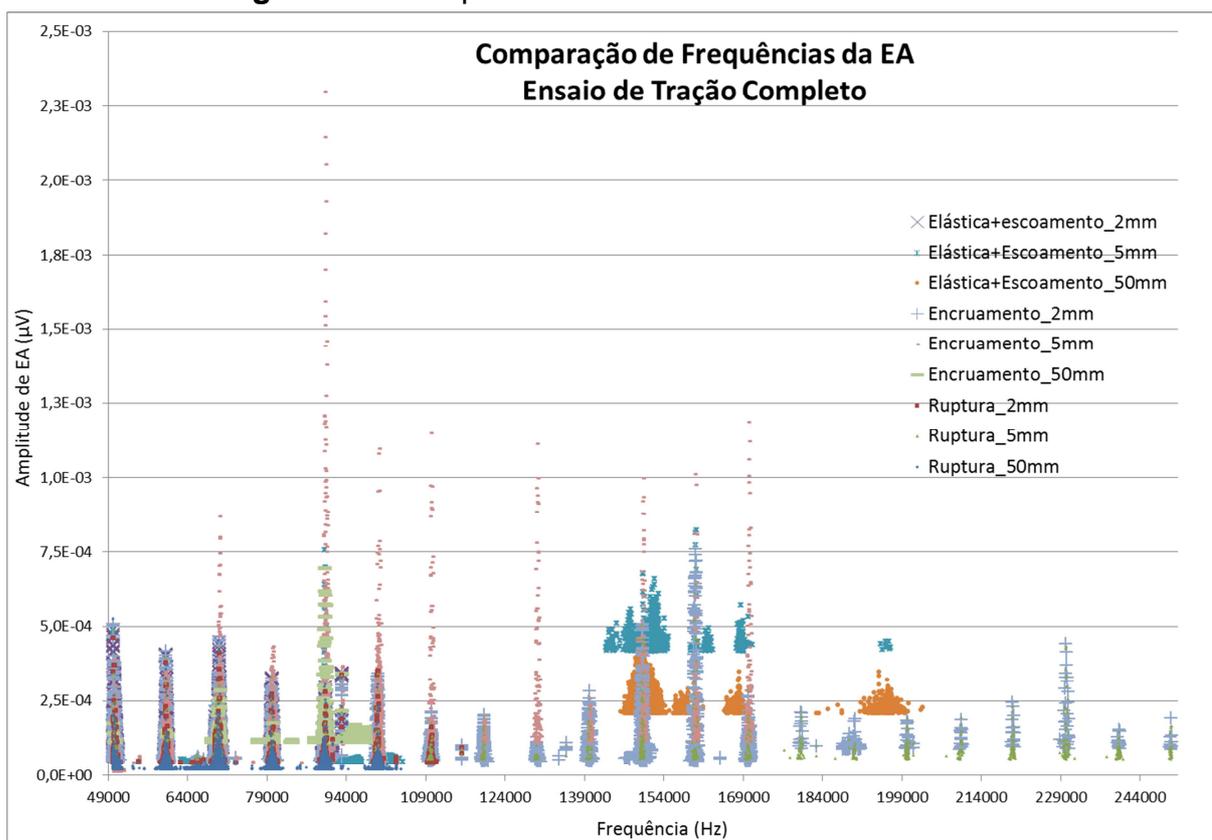


Fonte: AUTOR, 2014

4.6 Comparação relativa para todas as fases

Na Figura 51 nota-se que há uma distribuição harmônica no espectro de pontos relevantes para toda a faixa de frequência estudada. Existem intervalos de ocorrência de eventos de EA cujos valores se dão, em média, em 9990,1 Hz. Notória também a presença de energia acústica diferenciada na fase elástica e escoamento (início) para velocidades média e alta.

Figura 51 – Frequências observadas – Todas as fases



Fonte: AUTOR, 2014

5 CONCLUSÃO

Foi comprovado no decorrer dos trabalhos que a EA apresenta-se como uma inovadora ferramenta preditiva podendo tornar-se de fundamental importância no que tange a análise destes fenômenos acústicos e, conseqüentemente, o apontamento de defeitos insipientes em aços estruturais. O equipamento de aquisição de dados de EA desenvolvido pelo projeto de P&D e que fora utilizado para monitorar os ensaios desse trabalho assim como as ferramentas de análise incorporadas atenderam perfeitamente os quesitos preditivos cuja essência básica é “pré dizer” defeitos quando estes ainda não causam limitações nas funções dos equipamentos monitorados. Como ferramenta preditiva, por conseguinte, a técnica de EA aliada a um bom equipamento de aquisição de dados pode e deve ser plenamente utilizada no âmbito da manutenção, podendo evitar grandes danos e, conseqüentemente, gerando valor em qualquer ambiente específico que lhe cabe.

Verificado que a resposta da EA durante os ensaios de tração foi satisfatória e contundente na validação desta importante técnica. Pela característica da máquina de tração de se impor uma velocidade constante no avanço do estiramento dos corpos de prova, conseguiu-se sincronizar toda a curva do estado de tensão-deformação com os eventos de EA. Eventos estes que ficaram evidenciados graficamente em cada fase do ensaio de tração, facilitando a visualização e deixando claro o momento da ocorrência de sinais.

Para os gráficos correlacionados do estado de tensão-deformação com os níveis de EA, pode-se inferir que existe uma padronização de emissão por fase do ensaio (elástica e/ou plástica) independente da velocidade de avanço que se imponha no corpo de prova. Há grande semelhança na ocorrência de eventos acústicos em porções análogas do estado de tensão do material em cada uma das três curvas estudadas. Os maiores valores globais em RMS estão, por conseguinte, localizados em porções específicas destes estados de tensão. Entretanto, a imposição da velocidade do estiramento do corpo de prova influencia de maneira diretamente proporcional a amplitude do sinal de EA, ficando evidente que quanto menor a velocidade, menor o sinal de EA, sendo a recíproca, portanto, verdadeira.

A análise dos espectros de frequências foi também satisfatória e decisiva para o direcionamento dos pareceres técnicos. Nos gráficos de espectros pode-se notar

que há certa padronização de intervalos de frequência onde ocorrem os eventos de EA que toma como média o valor de 9990,1 Hz. O comportamento das frequências no espectro se mostra semelhante a harmônicas equidistantes pelo valor mencionado anteriormente. Quando se impõe uma velocidade mais baixa (2 mm/min) os eventos se concentram na faixa de 50 a 100 kHz, faixa relativamente menor.

Os maiores valores em amplitude de EA se dão no encruamento e estão concentrados em 90 kHz para velocidades de 5 e 50 mm/min e em 160 kHz com a velocidade de 2 mm/min. Nota-se que para as 2 (duas) maiores velocidades, o maior valor de EA ocorre na mesma frequência. Para todos os maiores valores há um destaque por estes estarem acompanhados de bandas laterais espaçadas em 120 Hz. Este fenômeno pode estar associado a ruído elétrico da rede.

O espectro de frequência para a velocidade de avanço de 50 mm/min (rápida) mostrou-se diferenciado dos outros por não apresentar frequências intermediárias na faixa de 105 a 140 kHz, ou seja, não há nessa faixa sinais relevantes do encruamento presente nas demais curvas. Esta particularidade mostra que para eventos cujo estado de tensão se dá de maneira repentina, as fontes de EA (deslocações) não atuam nessa faixa, ou seja, dependendo da dinâmica (rapidez de eventos) do equipamento, é interessante adotar frequência de análise fora dessa faixa de 105 a 140 kHz quando de estudo de EA. Outra distinção do ensaio com velocidades maiores é a presença de sinais aleatórios e sem padronização na faixa de 150 ± 4 kHz. Essa condição mostra que nessa faixa de frequência há eventos estocásticos na fase elástica e escoamento, fato este que pode ser explorado em análises preditivas para equipamentos cuja natureza dinâmica seja de alteração rápida de estados de solicitações.

Na fase elástica e escoamento, nota-se a ausência de sinais relevantes na faixa de 105 a 140 kHz para todas as velocidades de avanço. Particularidade esta que se faz reiterar a necessidade de se evitar essa faixa análises de EA em equipamentos, visto que, os defeitos insipientes serão evidenciados principalmente na fase elástica.

No encruamento é onde os sinais de EA se mostram com as maiores amplitudes em qualquer velocidade de avanço que fora imposta. Esse fenômeno pode ser explorado na análise preditiva visto que as frequências pelas quais o material estrutural de baixo carbono “prefere” se mostrar são sabidas e registraram

os valores de 90 e 160 kHz.

Na ruptura, tem-se que para qualquer velocidade de avanço, há presença de sinais de EA até a faixa de 105 kHz, ou seja, é interessante que a análise seja feita nessa faixa de frequência. Para a velocidade de 5 mm/min (mediana) foram observados pontos relevantes nas frequências acima da faixa citada onde o maior pico observado se deu na frequência de 160 kHz.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido às particularidades minudenciadas na conclusão, recomendam-se os seguintes subitens para desenvolvimento futuro. A saber:

- Dever-se-ia aprofundar o estudo do referido material (aço estrutural de baixo carbono) para as frequências de 90 e 160 kHz, as maiores encontradas no trabalho.
- Reavaliar a ausência de picos relevantes na faixa de 105 a 140 kHz no sentido de validar a recomendação de se limitar a análise nessa faixa visto que as deslocções não serão, portanto, facilmente evidenciadas.
- Como a natureza dinâmica de imposição de esforços externos da maioria dos equipamentos é relativamente baixa, é de grande valia a avaliação dos parâmetros em velocidades de avanço (taxa de estiramento) menores, ou seja, verificar eventos de EA e suas respectivas frequências em tempo maiores.
- Extrapolar os ensaios de tração e fazer também ensaios monitorados de EA com compressão, flexão e torção.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, T. L., Fracture Mechanics Fundamentals and Applications, Second Edition, CRC Press, USA, 1995

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 13199: Cilindros de aço sem costura - Método de ensaio por emissão acústica - Método de ensaio, Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 15181: Ensaio não destrutivo, Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASTM – The American Society of Mechanical Engineers, ASTM E1106-12, Standard Test Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, 2012.

ASTM – The American Society of Mechanical Engineers, ASTM E976-10, Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org, 2010.

BARANOV, V.; KRUDRYAVTSEV, V.; SARYCHEV, G.; SCHAVELIN, V.; “Acoustic Emission in Friction”. 1 Ed. London: Elsevier, 2007.

BLITZ, J, SIMPSON, G., Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing, Published by Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1, First edition, 1996;

CALLISTER, W.D., RETHWISCH, D.G., Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach, 4th edition, 2007.

CHACON, KAPPATOS, BALACHANDRAN, GAN, A novel approach for incipient defect detection in rolling bearings using acoustic emission technique. Article, Applied Acoustics, Volume 89, Pages 88-100, March 2015.

Detecção de Vazamento - VPAC e Valve Squeak - PASA. Disponível em: <http://www.pasa.com.br/pasa/equipamentos_vpac.asp>. Acesso em: 19 nov. 2012.

DONATO, G. V. P., Avaliação da Integridade Estrutural API 579/ASME FFS-1 Fitness for Service. Vitória, 2008

DOWNLING, N. E., Mechanical Behavior of Materials, Second edition, Prentice-Hall, New Jersey, USA, 1999;

DUKES, R.; CULPAN, E. A.; "Acoustic Emission: its techniques and applications." IEE Proceedings. Vol.131, pp. 241-251. 1984.

GOWID, DIXON, GHANI, A novel robust automated FFT-based segmentation and features selection algorithm for acoustic emission condition based monitoring systems. Article, Applied Acoustics, Volume 88, Pages 66-74, February 2015.

GROSSE, C. U.; OHTSU, M.; "Acoustic Emission Testing". Berlin: Springer, 2008.

Inspeção por EA - PASA - Physical Acoustics South America. Disponível em: <http://www.pasa.com.br/pasa/estruturas_inspecao.asp>. Acesso em: 07 jan. 2013.

KAISER, J.; "Untersuchungen uber das Auftreten Gerauschen beim Zugversuch." Ph.D. Thesis Techn Hochsch, Munchen, 1950.

LÉDECZI, A.; HAY, T., VÖLGYESI, P.; HAY, D. R.; NÁDAS; A.; JAYARAMAN, S.; "Wireless Acoustic Emission Sensor Network for Structural Monitoring." IEEE Sensor Journal. Vol. 9, pp. 1370-1377. 2009.

LI, X. "A Brief Review: Acoustic Emission Method for Tool Wear Monitoring during Turning." International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol.42, pp. 157-165. 2002.

M. KOTOUL, Z. BÍLEK, Acoustic emission during deformation and crack loading in structural steels. Article International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 44, Issue 3, Pages 291-307, 1990.

MAGALHÃES, A. G., Tese de doutorado sob o título: Aplicação das técnicas de emissão acústica e radiografia na caracterização do dano produzido por fluência em juntas de materiais compósitos sujeitas a diferentes condições ambientais, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1999;

MAIA, L. H. A.; "Influência das Condições de Corte do Fresamento do Aço Baixa Liga ABNT 4140 nos Sinais Vibracionais e de EA." Dissertação de Mestrado,

PUC Minas, Belo Horizonte, 2009.

MAILLET, MORSCHER, Waveform-based selection of acoustic emission events generated by damage in composite materials. Article Mechanical Systems and Signal Processing, Volumes 52–53, Pages 217-227, February 2015.

Manutenção preditiva - MTA Engenharia de Vibrações. Disponível em: <<http://www.mtaev.com.br/download/mnt1.pdf> >. Acesso em: 03 out. 2012.

MASMOUDI, MAHI, TURKI, GUERJOUA, Mechanical behavior and health monitoring by Acoustic Emission of unidirectional and cross-ply laminates integrated by piezoelectric implant. Article Applied Acoustics, Volume 86, Pages 118-125, December 2014.

MEYSAM AKBARI, MEHDI AHMADI, The application of acoustic emission technique to plastic deformation of low carbon steel. Physics Procedia, Volume 3, Issue 1, 1 January 2010, Pages 795-801, Janeiro, 2010

MILLER, R. K.; “Acoustic emission testing,” in Nondestructive Testing Handbook, 3rd ed. Columbus, OH: Amer. Society for Non-Destructive Testing, 2006, vol. 6.

MIX, P. E.; “Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide”. 2 Ed. Denver: Wiley Interscience, 2005.

MUKHOPADHYAY, JAYAKUMAR, HANEEF, KUMAR, RAO, GOYAL, GUPTA, BHASIN, VISHNUVARDHAN, RAGHAVA, GANDHI, Use of acoustic emission and ultrasonic techniques for monitoring crack initiation/growth during ratcheting studies on 304LN stainless steel straight pipe. Article International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 116, Pages 27-36, April 2014.

NR-13 CALDEIRAS, VASOS DE PRESSÃO E TUBULAÇÕES. Redação dada pela Portaria MTE n.º 594, de 28 de abril de 2014, Brasília, 2014.

P&D GT-407 – Relatório técnico do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico Cemig-ANEEL, Desenvolvimento de equipamento para monitoramento de integridade estrutural de equipamentos pressurizados em serviço utilizando

tecnologia wireless, 2010.

SANJAY KUMAR SINGH, K. SRINIVASAN, D. CHAKRABORTY, Acoustic emission studies on metallic specimen under tensile loading. *Materials & Design*, Volume 24, Issue 6, Pages 471-481, September 2003.

SCHOFIELD, B.H.; "Acoustic emission under applied stress." Aeronautical Research Laboratory, Report ARL 150, US Air Force, 1961.

SIEMENS – Siemens Aktiengesellschaft, Transducer and method for acoustic emission (AE) testing, US 5029474 A, 1989.

SMITH, W.F., HASHEMI, J., Fundamentos de Engenharia e Ciência dos Materiais, Obra originalmente publicada sob o título: *Foundations of Materials Science Engineering*, 5th edition, 2010.

SOARES, S. D.; Banco de dados dos ensaios de EA nas unidades da PETROBRAS – análises efetuadas e resultados obtidos, Anais do II INSPEQ, Universidade PETROBRAS, Brasil, 2003.

STROHAECKER, T. R, Mecânica da Fratura, PPGEM-UFRGS, Porto Alegre, 1999;

TELLES, P. C. S., Vasos de Pressão, Segunda edição, Rio de Janeiro,: LTC, 2007;

UNESP – VIBRAÇÃO E RUIDO EM MANUTENÇÃO PREDITIVA. Disponível em: <http://wwwp.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo_12.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2012.

YAN, LIU, CHEN, CHENG, YANG, Fluid cavitation detection method with phase demodulation of ultrasonic signal. Article *Applied Acoustics*, Volume 87, Pages 198-204, January 2015.

ZHU, BAI, ZHANG, LEI, HE, Measurement of true stress–strain curves and evolution of plastic zone of low carbon steel under uniaxial tension using digital image correlation. Article *Optics and Lasers in Engineering*, Volume 65, Pages 81-88, February 2015.