

Análise do banco de dados de resultados dos ensaios de emissão acústica realizados no sistema PETROBRAS

Professor: João Marcos A. Rebello

Aluno: Sergio Damasceno Soares

Introdução

Pesquisadores e engenheiros brasileiros têm estudado o fenômeno de emissão acústica (EA) desde 1979 e o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da PETROBRAS (CENPES) tem desempenhado importante papel neste contexto. Durante os últimos 24 anos, a PETROBRAS tem tentado usar a técnica de Emissão Acústica como uma ferramenta de inspeção. Neste período o conceito de Emissão Acústica foi alterado de uma revolucionária técnica de inspeção para uma técnica de inspeção global com o objetivo de indicar áreas para inspeção complementar.

A PETROBRAS tem uma grande quantidade de vasos de pressão e outros equipamentos inspecionados por Emissão Acústica para estabelecer uma correlação com Ensaios Não Destrutivos, nos último cinco anos foram inspecionados mais de 500 equipamentos.

O CENPES tem conduzido testes hidrostáticos destrutivos e auxiliado as refinarias do sistema PETROBRAS com o objetivo de definir um novo procedimento para análise de dados de Emissão Acústica.

O princípio usado nesta técnica de inspeção é que o crescimento de uma descontinuidade provocado por um campo de tensão irá emitir um sinal sonoro. O sinal emitido viaja pela estrutura e é capturado por transdutores posicionados na superfície do equipamento em ensaio. A emissão acústica é capaz de detectar a propagação de descontinuidades internas ou que afluem à superfície. A localização das descontinuidades pode ser estimada mediante os tempos de chegada dos sinais aos sensores. A localização precisa, assim como o tamanho e a orientação da descontinuidade, pode ser obtida com outras técnicas não-destrutivas. Atualmente, o principal problema na utilização desta técnica é o forte ruído ambiental nas plantas de processo, embora a separação de ruído e sinal seja possível pela utilização de modernos equipamentos que utilizam técnicas de filtragem eletrônica.

A inspeção por emissão acústica é um método de inspeção global, e pode ser aplicado a uma grande variedade de estruturas, incluindo craqueadores catalíticos, esferas de armazenamento, sistemas de tubulações, tanques de armazenamento fabricados em plástico reforçado com fibra de vidro e vasos de pressão. Também pode ser aplicado a extensa faixa de materiais e espessuras, além de estruturas em operação, à temperatura ambiente ou elevada. É necessário o acesso à estrutura para instalar os transdutores. A preparação da superfície só é exigida na área de instalação do transdutor, inclusive a remoção do isolamento. Para gerar a emissão acústica é necessário tensionar a estrutura por sobrepressão ou gradiente térmico.

A emissão acústica detecta descontinuidades que liberem energia de deformação quando a estrutura é tensionada. Eventos tipicamente detectados durante a inspeção por emissão acústica incluem crescimento de trincas de fadiga, danos induzidos pela ação do hidrogênio, corrosão sob tensão, empolamentos, corrosão avançada e quebra de fibras em materiais plásticos reforçados com fibra de vidro.

A grande vantagem do método de inspeção por emissão acústica consiste no fato de ser uma inspeção relativamente rápida, de uma grande área, na presença de descontinuidades ativas estruturalmente, podendo indicar áreas isoladas que necessitem de inspeção complementar. A grande vantagem transforma-se, também, em grande desvantagem enquanto o paradigma da inspeção de equipamentos não for mudado, pois a inspeção por emissão acústica somente irá detectar descontinuidades ativas. Sendo assim, muitas das descontinuidades geradas no processo de fabricação podem não ser detectadas.

O ensaio por emissão acústica fundamenta-se na detecção de ondas de natureza mecânica, emitidas pelas descontinuidades durante a solicitação dos materiais e equipamentos. As pequenas alterações que ocorrem nos materiais quando estes iniciam os processos de fratura geram, em maior ou menor grau, uma quantidade de ondas de natureza acústica, originadas pela liberação de energia que está associada a estes mecanismos.

O caráter passivo da técnica por emissão acústica, isto é, detectar os sinais emitidos pela estrutura sem nada introduzir nela, torna este ensaio fundamentalmente diferente dos

outros convencionais. Os ensaios convencionais aplicam um determinado impulso sobre o material e analisam a resposta produzida. No ensaio por emissão acústica nem todas as descontinuidades serão detectadas, pois somente os defeitos críticos entram em processo de fratura, à medida que a peça for solicitada mecanicamente. Neste caso, as atenções são concentradas na análise de defeitos ativos, isto é, que se alteram com a solicitação mecânica.

O ensaio de emissão acústica realizado industrialmente em vasos de pressões e demais equipamentos que contenham pressão interna é realizado coletando e processando sinais gerados pelas descontinuidades porventura existentes. O processamento dos sinais geralmente é executado por programas de computador específicos para emissão acústica. Estes *softwares* são desenvolvidos pelas empresas que fabricam sistemas de emissão acústica e em alguns casos prestam serviços de inspeção. Portanto, a forma com que a análise de dados é executada não é totalmente conhecida.

O Departamento de Materiais e Metalurgia da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em conjunto com o Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC) propuseram a FINEP um projeto para o estudo a relação existente entre esforço mecânico aplicado e sinais de emissão acústica para apoiar o CENPES no desenvolvimento de critérios de análise de ensaios de emissão acústica em equipamentos da indústria de petróleo.

Uma das etapas deste estudo consistiu em realizar um levantamento dos ensaios de emissão acústica realizados no sistema PETROBRAS e os ensaios não destrutivos realizados após o ensaio de emissão acústica para possibilitar o estabelecimento de uma correlação entre resultados de emissão acústica e mecânica da fratura. O levantamento dos resultados de emissão acústica e ensaios não destrutivos foi sistematizado em um banco de dados construído em Microsoft Access.

A análise do banco de dados proporcionará um estudo da confiabilidade co critério MONPAC de análise de dados de emissão acústica e como consequência uma definição do grau de confiabilidade do ensaio de emissão acústica.

Revisão bibliográfica das atividades relacionadas a inspeção com a técnica de emissão acústica

Durante os últimos 23 anos, a PETROBRAS tem tentado usar a técnica de Emissão Acústica como uma ferramenta de inspeção de equipamentos. Neste período o conceito de Emissão Acústica foi alterado de uma revolucionária técnica de inspeção para uma técnica de inspeção global com o objetivo de indicar áreas para inspeção complementar.

A PETROBRAS tem uma grande quantidade de vasos de pressão e outros equipamentos inspecionados por Emissão Acústica para estabelecer uma correlação com Ensaios Não Destrutivos, somente nos último cinco anos foram inspecionados mais de 300 equipamentos em refinarias, terminais e plataformas *off-shore*.

O CENPES tem conduzido testes hidrostáticos destrutivos e auxiliado as refinarias do sistema PETROBRAS com o objetivo de definir um novo procedimento para análise de dados de Emissão Acústica.

Este capítulo apresenta uma breve revisão bibliográfica dos projetos e resultados obtidos pelo CENPES desde 1979 e alguns artigos publicados sobre o tema de emissão acústica que guardam relação com a aplicação em ambientes da indústria de petróleo.

Um método para a obtenção das assinaturas (formas de onda) de eventos claros de emissão acústica foi desenvolvido por Breckenridge, Tschiegg, e Greespan. A forma de onda identifica o que é a fonte, livre de contaminação pelo tocar do corpo-de-prova, aparato e transdutor. A técnica é baseada na comparação de dois sinais do transdutor, um do evento em questão e um do evento artificial de forma de onda conhecida. O aparato é também adaptado para a calibração de transdutores em uma certa sensibilidade. A configuração da fonte (evento de emissão acústica real ou simulado) e o correspondente transdutor de recepção para casos especiais do problema de Lamb são apresentados neste artigo.

No sentido de distinguir emissões acústicas de ruído de fundo e melhorar o entendimento do mecanismo de geração da emissão, é importante obter o espectro de frequência de um sinal individual de fratura na mais extensa faixa de frequência possível. Graham e Alers modificaram um registrador de fita de vídeo Sony como uma maneira que um sinal de emissão acústica individual de fratura possa ser registrado e subsequente revisto em um analisador de espectro Hewlett-Packard. Este sistema torna possível a rápida determinação do conteúdo em frequência do sinal de 0 a 3 MHz. Também permite a medição da distribuição de amplitude de qualquer série de sinais emitidos durante um intervalo particular de tempo de um teste de deformação mecânica. Uma vez que muitas das irregularidades observadas no espectro podem ser traçadas para ressonâncias internas na cerâmica do transdutor usado, um microfone transdutor capacitor especial foi desenvolvido com resposta plana em frequência. Resultados em ligas de alumínio, ligas de titânio, alguns aços e um cristal único de MgO mostraram todos o mesmo espectro em geral. Um vaso de pressão de reator de aço (A533B) deformando em tensão exibiu máxima energia próximo de 1,0 MHz e o trincamento de vidro através de um indentador esférico apresentou um máximo similar entre 0,5 e 1,0 MHz dependendo da carga aplicada.

O primeiro relatório feito pela PETROBRAS foi escrito por Allevato (Allevato, 1979) em 1979. Este minucioso relatório descrevia uma pequena história do método desde a utilização dos sinais acústicos emitidos durante a deformação do estanho para construção de utensílios domésticos e militares, nos séculos anteriores, passando por Joseph Kaiser, na Alemanha nos anos 50, Schofield e Tatro, nos Estados Unidos da América nos anos 50 e outros cientistas na década de 60. Allevato reportou aplicações na pesquisa de materiais, integridade estrutural de vasos de pressão e reatores. Neste período o sistema descrito e conhecido pela PETROBRAS era o ACOUST proveniente da Exxon Nuclear, foram utilizados cabeçotes da Dunegan Corporation com pré-amplificadores Trodyne. A análise de sinais foi conduzida com o auxílio de osciloscópio.

Allevato (Allevato, 1980) revisou os princípios básicos, a instrumentação e as aplicações gerais da técnica de ensaio não destrutivo (END) por emissão acústica (“ondas elásticas espontâneas produzidas por materiais sob tensões mecânicas”) em

1980. A ênfase foi à avaliação da integridade estrutural de vasos de pressão e reatores em geral.

Foram fornecidos exemplos do uso desta técnica de inspeção na indústria de petróleo, com gráficos, diagramas e fotografias. O campo de aplicação da técnica estava se expandindo com o desenvolvimento de melhores cabeçotes, permitindo o estudo do desempenho mecânico de materiais em altas temperaturas. Foram descritas as aplicações para a área de pesquisa dos materiais, com estudos teóricos em corrosão sob tensão induzida pelo hidrogênio, e na avaliação da integridade de vasos de pressão e reatores em geral. O sistema de emissão acústica com os seus principais componentes foi descrito. Allevato apresentou o diagrama de blocos do sistema *Acoust* da *Exxon Nuclear*, sensores para temperatura ambiente e para alta temperatura, pré-amplificador e caixa de junção. A análise de dados englobava a contagem de duração do sinal, a contagem de eventos, a análise de energia e a medida da média quadrática. Sistemas de áudio, de queda de energia, magnético de armazenamento de informação e de análise de tempo foram descritos sucintamente. O sistema de análise de relevância e localização de fontes utilizava mapas tridimensionais de localização e relevância (duas dimensões para a superfície do objeto em teste e uma dimensão para relevância) e tabela de localização de defeitos (atuais gráficos de localização exata). A localização de fontes por métodos não computacionais utilizava os métodos de hipérboles, Appollonius, tabela de otimização e sondagem (inserção de sinais artificiais conhecidos). Foram apresentados exemplos de utilização da técnica de inspeção por emissão acústica em reatores de hidrocrackeamento e hidroacabamento, torre absorvedora e tubos de perfuração utilizando sistemas de 32 canais com sensores de 220 kHz e 450 kHz. Os materiais inspecionados foram aços A 387-61T grau E, SA-387-D, A-212-B e A-336-F22. Allevato concluiu pela viabilidade do método de inspeção por emissão acústica para avaliação da integridade estrutural de equipamentos da indústria de petróleo.

Em 1980, Allevato e Ramos discutiram as aplicações de emissão acústica em testes de corrosão. Em estudos de corrosão não é necessária a presença de tensão em função da fonte de estímulo serem as reações eletroquímicas que produzem gases. Gráficos foram apresentados com a correlação entre corrosão e taxa de emissão acústica, contagem acumulada e hidrogênio coletado, efeito galvânico na emissão acústica e o efeito do inibidor Na_2CrO_4 na direção do decréscimo da atividade de emissão acústica. Em 1980,

emissão acústica não estava totalmente desenvolvida para estudo dos fenômenos de corrosão, mas era possível prever que poderia ser usada em estudos de corrosão associada e esforços mecânicos como, por exemplo, corrosão sob tensão.

Em 1982, Allevato e Carneval (Allevato, 1982) mostraram os princípios básicos, instrumentos e aplicações gerais da técnica de emissão acústica, enfatizando a integridade estrutural de vasos de pressão e reatores. Neste momento, Allevato escreveu que o campo de emissão acústica estava aumentando com desenvolvimento de sensores que permitiriam o estudo do desempenho de materiais em altas temperaturas e monitoração e detecção de trincas de fadiga em estruturas *off-shore*. Os ensaios de emissão acústica eram conduzidos com instrumentações que utilizavam o sistema operacional DOS para coleta e análise de dados. Em 1982 os dados eram exportados em discos flexíveis que comportavam 144 kB.

Em 1983, Allevato (Allevato, 1983) testemunhou o que pode ter sido o primeiro teste de emissão acústica feito no Brasil. Este teste foi realizado na Oxiteno do Nordeste na Bahia, e foi conduzido pela DNV-ITL utilizando o sistema D/E 1032 com 32 canais.

Mourão, Siqueira, e Allevato reportaram em 1984 (Farias, 1983) o primeiro projeto de pesquisa na PETROBRAS para monitoramento estrutural de plataformas *off-shore* usando várias técnicas, inclusive emissão acústica.

Durante o ano de 1984, foram realizadas inspeções usando emissão acústica em duas refinarias da PETROBRAS. Os relatórios dessas inspeções não foram encontrados na biblioteca do CENPES, porém foram identificadas pelo PETROSIN (*software* que controla a documentação técnica). O registro do PETROSIN informa que os testes foram realizados nas esferas TQ 16J da REFAP e na esfera EF-4418 da REPAR. Este relatório foi escrito por Cláudio Allevato, Gilberto Borges e Marcos Mattos.

Em 1986, Feres e Carvalho (Feres, 1986) publicaram um artigo sobre a inspeção por emissão acústica realizada nos reatores K-3401 A e B localizados na refinaria localizada em Cubatão (RPBC). Este artigo foi dividido em duas seções. A primeira seção descrevia o resultado para detecção e localização de descontinuidades, e a segunda seção foi destinada a determinar em qual fase do ciclo de operação existiam as

condições mais severas para nucleação de descontinuidades e ou propagação de descontinuidades existentes.

Em 1986, Camerini (Camerini, 1986) reportou que a preocupação das indústrias com os custos operacionais e valores associados com a inspeção de equipamentos tinham um papel importante na inspeção com emissão acústica. Emissão acústica tem sido desenvolvida para reduzir custos de inspeção e garantir a integridade de um equipamento ou parte dele. Estas opções seriam possíveis pela avaliação dinâmica da propagação de uma onda de tensão dentro do material, exame rápido e inspeção em serviço. Testes de *crack tip opening displacement* (CTOD) foram realizados e vasos de pressão foram submetidos a testes hidrostáticos. Os vasos de pressão contendo defeitos artificiais tais como perda de espessura por usinagem e trincas feitas por impacto em temperatura criogênica. Foi concluído que emissão acústica apresentava bons resultados na localização linear de trincas de fadiga, mas em vasos de pressão os resultados não foram tão bons em função do grande espalhamento. Sensores de emissão acústica não detectaram defeitos usinados e as trincas, mas as trincas levaram os vasos à falha nos testes hidrostáticos.

Camerini, Soares e Sant'Anna (Camerini, 1987) relataram em 1987 que testes laboratoriais confirmaram que emissão acústica tinha um bom potencial para ser usada na inspeção de equipamentos, mas ensaios de campo não alcançaram o mesmo nível sendo necessários maiores desenvolvimentos. O sistema PAC-3004, ambiente DOS com possibilidade de utilização de 4 canais com sensores R-15 e pré-amplificadores 1220A foram usados nestes trabalhos. Três testes laboratoriais com trincas de fadiga e cinco vasos de pressão com defeitos artificiais foram conduzidos. Para os vasos foi utilizado um sistema PAC com 12 canais e sensores R15I. O último teste foi realizado simultaneamente com dois diferentes prestadores de serviço, infelizmente os resultados dos dois prestadores de serviço foram diferentes entre si e não apresentaram corretamente o local da falha no vaso de pressão.

Blackburn desenvolveu em 1988 um procedimento de teste para caminhões que transportam e distribuem gases industriais (por exemplo: oxigênio, hélio, hidrogênio, monóxido de carbono e misturas) em cilindros de aços. O Departamento de Transporte dos USA (DOT) especifica tubos de aço Cr - Mo, com 558,80 mm de diâmetro, 12,7

mm de espessura e 10,363 m de comprimento. A pressão típica de enchimento é 185 kgf/cm². Anteriormente, DOT requeria reteste hidrostático dos tubos a cada 5 anos. O desenvolvimento conduzido por Blackburn sistematizou o estudo em tópicos organizados da seguinte forma:

- Discussão da máxima profundidade de defeito permitida;
- Desenvolver um método de teste por EA para carreta de tubos;
- Estudo de atenuação o sinal;
- Discussão dos resultados de laboratório de trincas de fadiga em corpos-de-prova do tipo CT;
- Discussão dos diferentes tipos de fontes de emissão acústica nas trincas de fadiga.

O teste de EA irá indicar a presença e posição de descontinuidades. Após a detecção da descontinuidade, o tipo e a dimensão da descontinuidade definirá se será permitida a manutenção da carreta em serviço. As descontinuidades porventura existentes nos cilindros da carreta tenderão a se transformar em trincas de fadiga em função do ciclo de trabalho da carreta, enchimento, esvaziamento e enchimento em períodos de 3 dias em média. Utilizando fundamentos de Mecânica da Fratura o tamanho crítico da descontinuidade nas condições de serviço (por exemplo na máxima pressão de serviço) pode ser determinado.

A não remoção da carreta do serviço, o teste ser feito com o próprio produto de trabalho, e a não contaminação da carreta com água são algumas das vantagens do ensaio de EA. O ensaio de EA localiza as descontinuidades e as dimensões são obtidas com outros métodos não destrutivos.

No comprimento dos tubos, atenuação está na faixa de 20 a 24 dB. Gráficos de atenuação *versus* distância são medidos nos tubos que contém gás em pressão moderada.

Este método simplesmente localiza campos de emissão. Significancia dos campos de emissão é obtida baseada na contagem do evento. Posições de campos significantes são inspecionadas por ultra-som. Existência de descontinuidades, dimensões, são estabelecidas pela inspeção ultra-sônica.

Testes foram realizados para caracterizar emissão do crescimento da trinca de fadiga. Corpos-de-prova tensão compacto (CT) em orientação longitudinal foram preparados. A máxima de tensão foi equivalente a que iria ocorrer na profundidade máxima permitida da descontinuidade. Corpos-de-prova foram levados a fratura e EA foi monitorada. Gráficos de picos de amplitude, e voltagem RMS *versus* carga indicaram que: existe mais que uma fonte de EA nas descontinuidades nos tubos de aço liga; EA é prontamente medida em baixas cargas as quais são próximas as cargas de serviço.

Dados dos testes de corpos-de-prova CT e dos testes dos tubos forneceram picos de amplitude de várias fontes diferentes. Curvas de atenuação foram usadas para corrigir pico de amplitude medido. A tabela 2.1 apresenta este resultado.

Tabela 2.1 - Relação entre picos de amplitude e fontes de EA.

Fonte	Pico de amplitude na fonte (dB)
Escama desbastada	50-110
Corrosão externa	66-78
Contato mecânico	19-66
Crescimento de trinca de fadiga	19-60

Atual crescimento de trinca nestes aços cromo - molibdênio produz relativamente baixo, mas detectável picos de amplitudes. Outras fontes são orientadas na detecção e localização de descontinuidades.

O grupo de pesquisa da ABENDE preparou um programa em 1988 com o objetivo de desenvolver a técnica de emissão acústica no Brasil. Faziam parte deste grupo, usuários brasileiros e prestadores de serviço, além da PETROBRAS. Os primeiros resultados indicaram um grande potencial devido a testes de laboratório, mas testes de campo não atingiram o mesmo nível. Baseado em avanços substanciais na instrumentação no período 87-88 e em recentes procedimentos escritos, outra avaliação foi conduzida. Nesta avaliação, cinco corpos de prova tubulares foram construídos para retestar esta nova abordagem. Foi determinado que a detecção de vazamento tinha alta sensibilidade e era proporcional a pressão. Fontes identificadas como A e B (severas) foram identificadas prematuramente quando relacionada ao colapso final, isto significava que

o critério proposto em 1988 obtinha resultados satisfatórios. Embora as fraturas não tenham ocorrido nos locais assinalados, os corpos de prova falharam em regiões com danos estruturais os quais foram previamente detectadas e localizadas. Localização linear e planar não foram avaliadas em função da geometria do corpo de prova, mas a localização zonal mostrou bons resultados.

Castelo Branco (Castelo Branco, 1989) apresentou os resultados obtidos de um programa para avaliar a confiabilidade do uso da técnica de emissão acústica em escala industrial, em 1988. Este programa consistiu de testes em laboratórios em 15 corpos de prova de CTOD, 30 testes hidrostáticos até a falha em pequenos vasos de pressão e sessenta ensaios de campo. Foram inspecionadas 16 esferas, 13 reatores, 10 vasos, nove cilindros, cinco torres, dois permutadores e cinco tubulações. Foram estabelecidas cinco conclusões:

- (a) o método de emissão acústica indicou confiabilidade e confirmou o princípio de funcionamento quando utilizado em escala laboratorial;
- (b) não foi possível definir o campo de aplicação de emissão acústica;
- (c) equipamentos, *software*, acessórios e padronização não alcançaram a nível requerido para aplicações gerais;
- (d) o método de emissão acústica pode ser usado em casos específicos; e,
- (e) emissão acústica não deve ser usada como substituta de outras técnicas de END.

Estes resultados sugeriam que a técnica não tinha sido completamente desenvolvida e que o campo de aplicação não estava bem definido, mas que poderia ser usada cuidadosamente em casos específicos.

A parceria entre a BRASITEST e a PAC não obteve bons resultados em 1989 quando foram realizados testes em juntas tubulares submetidas a ciclos de fadiga e vasos de pressão submetidos à teste hidrostático até a falha. Camerini e Soares (Camerini, 1989) descreveram outras conclusões. Por exemplo: por meio de um *pulser* foi determinado que os sensores não tinham o mesmo comportamento. Esta sentença foi muito importante porque os critérios de análise foram baseados em parâmetros obtidos de sinais coletados. Finalmente, em 1989, foi sugerido que emissão acústica não devia ser usada com a instrumentação que estava disponível no mercado até que mudanças

profundas fossem introduzidas no *hardware* e no *software*, e novas avaliações pudessem ser conduzidas.

Castelo Branco e Camerini (Castelo Branco, 1989) descreveram em um artigo publicado em 1989 os principais pontos polêmicos da técnica de emissão acústica. As discussões foram centradas na necessidade ou não de uma localização exata da fonte, desempenho de sensores, procedimentos globais ou específicos e sobre pressão ou monitoramento contínuo durante o processo industrial. Neste ponto emissão acústica não foi considerada uma técnica confiável e novos esforços foram propostos para desenvolver a técnica para uso na PETROBRAS. As soluções propostas foram: desenvolver localização exata e em tempo real, aumentar a fidelidade e a confiabilidade do sensor. Também foi estabelecido que procedimentos específicos que realizam a monitoração durante as condições reais de operação tinham demonstrado resultados melhores quando comparados com procedimentos de sobre pressão.

Jones, Friesel, e Gerberich mediram EA durante o crescimento subcrítico de trincas em diversos materiais (Ferro, Níquel, aço inoxidável austenítico 304, aço ferramenta, e em um cristal único Fe-Si). Os testes foram conduzidos usando corpos-de-prova tipo tensão compacto (CT) em uma variedade de ambientes. Foi concluído que os pequenos, saltos de trincas descontínuas não foram detectados com o equipamento de monitoração de EA. Igualmente, para o crescimento subcrítico de trincas intergranulares, foi concluído a extensão da trinca sem a presença de EA ou pequenos saltos de trincas descontínuas não detectáveis por EA. Também foi postulado que as superfícies de fratura transgranular acompanhando o crescimento subcrítico de trincas intergranulares resultaram de ligamentos que foram fraturados ao lado do avanço da frente da trinca.

A caracterização quantitativa de fontes de emissão acústica em microtrincamentos de aços foi estudada em 1990 por Takatsubo e Kishi e publicada em um artigo onde a técnica de análise das ondas das fontes de emissão acústica são uma nova técnica não destrutiva para a pesquisa de processos dinâmicos de fratura. Takatsubo e Kishi aplicaram esta técnica para a caracterização quantitativa de fontes de trincas em fratura dúctil. Usando duas amostras de aço ASTM A533B com diferentes conteúdos de enxofre, emissões acústicas durante testes de tenacidade à fratura foram detectadas, localizadas, e analisadas. Os sinais detectados de emissão acústica foram classificados

em dois tipos de acordo com as formas de onda analisadas. Uma foi um sinal devido ao microtrincamento em inclusão de MnS, e outra foi um sinal devido a coalescência de vazios. Os resultados da análise da onda da fonte mostraram que o microtrincamento nas inclusões foi devido a trinca em tensão do tipo Modo I com dimensões de 10-30 μm , e a coalescência de vazios foi devido a tensão cisalhante misturada com trincas com dimensões de 60-100 μm . Foi confirmado que esta técnica é muito efetiva para a avaliação quantitativa de microtrincamento e para a detecção de nucleação e crescimento de trincas.

Nos últimos anos muitos testes hidrostáticos, ciclos de fadiga e testes de carregamento térmico tem sido realizados vasos de pressão de reatores, os quais continham defeitos tipo trinca, com a ajuda do desenvolvimento de condições de detectabilidade de crescimento ou não de trincas por emissão acústica (EA). Deuster, Sklarczyk e Waschkies estudaram em 1991 a EA gerada e registrada durante estes experimentos. Técnicas para avaliação dos dados de EA têm sido desenvolvidas as quais permitem a separação dos eventos de EA de crescimento de trincas e fricção de trincas superficiais pelo tempo de subida. Crescimento de trinca pode ser detectado pela alta sensibilidade em carregamentos térmicos e testes de fadiga, onde a detectabilidade da fricção das superfícies da trinca aumenta, com a quantidade de tensões compressivas entre as superfícies da trinca. Em testes hidrostáticos somente um baixo nível de EA é produzido pelo não crescimento de trincas devido à falta de tensões compressivas.

Camerini (Camerini, 1992) relatou em 1991 alguns aspectos dos estudos feitos em emissão acústica na PETROBRAS. Estes aspectos foram divididos em quatro itens. Primeiro, em 1988 durante uma missão de três meses nos EUA foi concluído que existe um aumento do uso de emissão acústica para verificar a integridade estrutural e grandes companhias como MONSANTO e EXXON estavam usando emissão acústica quase como uma rotina. Apesar dos progressos, emissão acústica não era aceitável e confiável como outras técnicas de END. A capacidade de aquisição de dados e localização exata deviam ser melhoradas. A técnica de emissão acústica pode ser usada como exame complementar, não como substituta. As normas em 1991 eram pobres e em baixo número. O programa MONPAC era o pacote mais poderoso para realização de inspeção. Os estágios de desenvolvimento da PETROBRAS e dos usuários brasileiros eram similares aos do mercado dos Estados Unidos da América em uso, dúvidas e

preocupações, e a inspeção com emissão acústica podia ser permitida em casos específicos. O segundo item foi à condução de dois testes, um em uma junta tubular submetida a ciclo de fadiga e outro em um vaso de pressão. Estes testes mostram que a técnica convencional de emissão acústica não era capaz de detectar sinais gerados por trincas. A terceira parte foi uma tese de mestrado para estudar a correlação entre emissão acústica e um aço estrutural (A516 Gr-60) durante teste de CTOD (BSI, 1979). A conclusão principal desta tese foi que a energia do sinal (MARSE) tinha baixa intensidade, em torno de 25 dB, e o limiar de detecção usado em procedimentos de campo era ajustado para 40 dB, tornando impossível a detecção de eventos oriundos de trincas e propagação de descontinuidades. A quarta parte foi à realização de um teste com a *Hartford Steam Boiler* nas dependências da refinaria Duque de Caxias (REDUC). Neste teste foram indicadas dez áreas ativas e após o seccionamento das áreas ativas não foram encontradas evidências de descontinuidades. O relatório do teste foi escrito após uma pressão máxima no teste hidrostático ter alcançado 25 kgf/cm^2 e o vaso falhou com 28 kgf/cm^2 . Regiões com descontinuidades do tipo trinca que apresentaram crescimento durante o teste hidrostático não foram indicadas como ativas na emissão do relatório do teste.

Procurando por um comportamento padrão de emissão acústica de uma trinca propagando em um aço estrutural, testes de CTOD monitorados por emissão acústica foram realizados por Camerini, Soares e Rebello. Os resultados foram publicados em 1992 (Camerini, 1992) e mostram a capacidade da técnica de emissão acústica para detectar uma trinca antes de sua propagação, isto é, antes do CTOD de iniciação. Aços estruturais para aplicação em vasos de pressão têm sido extensamente estudados para determinar seu comportamento a fratura, em função do grande nível de confiabilidade esperado nestes equipamentos. Neste caso ultra-som e radiografia são normalmente conduzidos para detectar descontinuidades internas. Quando o teste de emissão acústica é adotado, o vaso é carregado por pressão interna, com o objetivo de abrir as pontas das descontinuidades e gerar sinais de emissão acústica. Duas questões devem ser respondidas: qual é o nível de carga requerido? E tal carregamento fará a propagação da descontinuidade e afetará a integridade do vaso? Estas duas questões foram respondidas para o aço C-Mn estrutural específico quando carregado até a falha em testes de CTOD monitorados por emissão acústica. As seguintes conclusões podem ser estabelecidas: durante o teste de CTOD dois picos característicos correspondente a uma intensa

atividade acústica foram observados; o segundo pico ocorria com a fratura do corpo de prova e não foi considerado importante, o primeiro pico estava relacionado com o momento do início da propagação estável da trinca. Um fato relevante foi à intensa atividade acústica antes da extensão estável da trinca ter ocorrido. Em uma base quantitativa foi determinado que o valor de CTOD correspondente a emissão acústica detectável era menor que o CTOD de iniciação de propagação estável, e o teste de emissão acústica podia ser confiavelmente realizado em valores suficientemente baixos de CTOD, onde o risco de fratura podia ser descartado.

Em 1994, a REDUC pediu ao CENPES para pesquisar um dispositivo e uma técnica que permitisse a detecção de vazamento em válvulas de unidades de processo em operação. Este estudo (Rodrigues, 1994) era necessário devido ao fato de que a REDUC troca em torno de 1000 válvulas durante as paradas de manutenção a cada quatro anos. Dois dispositivos foram testados usando duas técnicas diferentes. O primeiro dispositivo foi um equipamento PAC para inspecionar vasos usando emissão acústica, e o segundo foi um equipamento MICROSONIC usando o método ultra-sônico. Um pequeno corpo de prova com três válvulas foi construído para faixas de pressão entre 5 kgf/cm² e 40 kgf/cm². Foi concluído que o dispositivo MICROSONIC devia ser usado em refinarias e plataformas *offshore* para detectar vazamentos devido ao seu baixo custo, fácil manuseio e bom desempenho. Os sinais detectados eram oriundos do fluxo do fluido e os sensores de emissão acústica foram posicionados próximos à jusante das válvulas.

O projeto de pesquisa "Avaliação de Integridade de Equipamentos em Serviço com H₂S" conduzido pelo CENPES gerou um relatório escrito por Soares em 1995 (Soares, 1995). Neste projeto o CENPES aderiu ao projeto multicliente "*Reducing Duration of SSC Qualification Testing through AE Monitoring*" que estava sendo conduzido pela CLI INTERNATIONAL. Este relatório mostrou os principais resultados obtidos entre outubro de 1983 e julho de 1984. O objetivo deste projeto era avaliar diferentes técnicas para realizar a análise de corrosão sob tensão para ajudar a reduzir o tempo requerido para qualificar aços de alta resistência para aplicações em ambientes com H₂S. Outro relatório gerado neste projeto foi escrito por Carneval em 1996 (Carneval, 1996). Neste relatório foi descrita a avaliação não destrutiva conduzida em um vaso de pressão for a de serviço da REPLAN devido a danos pelo hidrogênio críticos para a operação segura do equipamento. Este relatório mostrou a inspeção ultra-sônica convencional baseada na

norma ASTM A578 em toda a chaparia do vaso para detecção de trincamento em degraus, inspeção ultra-sônica semi-automática usando procedimento para mapeamento de corrosão, teste hidrostático monitorado por emissão acústica para identificar áreas críticas. As conclusões principais foram: procedimentos ultra-sônicos convencionais não cobrem toda a área do vaso e gastam muito tempo, sistemas semi-automáticos mostram um bom desempenho, mas tem alto custo, adicionado a falta de procedimentos específicos para danos por hidrogênio pode ser um ponto negativo para esta tecnologia; os resultados da inspeção ultra-sônica confirmaram que as inspeções realizadas em campo na REPLAN, mas os resultados não foram confirmados por testes destrutivos. Ao final do teste hidrostático, as regiões indicadas por emissão acústica e ultra-som foram reinspecionadas para determinar se as descontinuidades tinham crescido ou não. A condição extrema imposta durante o teste hidrostático (300% maior que o teste hidrostático) (quatro vezes a pressão de teste hidrostático), embora o material não estivesse na condição fragilizado, mostrou a condição intrinsecamente segura do projeto do vaso, devido ao fato do vaso não ter falhado durante a prova de carga, embora tenha ocorrido deformação plástica em função da pressão interna ter aplicado tensões superiores ao limite de escoamento do material de construção do vaso de pressão. Ao compararmos o resultado da inspeção ultra-sônica para a detecção de danos induzidos pela operação do equipamento e o resultado do ensaio de emissão para indicação de áreas ativas concluiu-se pela não sobreposição das áreas. As descontinuidades indicadas pela técnica ultra-sônica (descontinuidades laminares, paralelas a superfície) não foram ativas pelo método de emissão acústica e as áreas ativas detectadas pelo método de emissão acústica não apresentavam sinais de ultra-som. Existem duas formas de avaliar esta situação: primeiro, as descontinuidades detectadas pela inspeção ultra-sônica não eram críticas para a estrutura, e, segundo, as regiões indicadas não mostraram qualquer descontinuidade detectável por métodos de END convencional. Em função disto, os resultados de emissão acústica foram classificados como não conclusivos.

O ensaio de emissão acústica têm sido cada vez mais utilizado na inspeção de tanques de armazenamento. Em função da grande utilização, as empresas Shell e Dow estudaram os resultados obtidos com o emprego de EA e publicaram em 1998, na 7ª Conferência Européia de Ensaio Não Destrutivos, um resumo de um breve estudo da confiabilidade da inspeção de fundo de tanque com EA. Os resultados de EA em fundos de tanque são apresentados graduados em faixas conforme a tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Classificação dos resultados de EA em fundos de tanque.

Classificação	Grau de atividade acústica	Ações
A	Muito pequeno	Sem necessidade de manutenção
B	Pequeno	Sem necessidade de manutenção
C	Intermediário	Avaliação da necessidade de manutenção
D	Ativo	Prioridade na programação de manutenção
E	Altamente ativo	Alta prioridade na programação de manutenção

Para justificar a estratégia de manutenção com EA, van de Loo e Herrmann (1998) realizaram uma validação de resultados em uma população de 150 tanques. Os tanques classificados como A não necessitavam de reparo e os classificados como E necessitavam, mostrando uma ótima correlação para os casos extremos da tabela 2.2.

López descreveu em 1999 a evolução obtida por equipamento de pesquisa no emprego de técnicas para determinação o comprimento de trincas em aços de uso industrial submetidos a processo de corrosão sob tensão. Foi apresentado neste artigo a correlação entre os resultados obtidos pela medida simultânea de pulsos de emissão acústica e a variação de resistência elétrica do corpo de prova. A função de distribuição das energias U dos pulsos apresenta um comportamento exponencial U^m com um expoente m que depende do tipo de fratura, modificado pelo tratamento térmico do material. Esta função de distribuição permite corrigir certos erros experimentais como a escolha inadequada de níveis de detecção de pulsos.

Durante setembro de 1999 foi realizada uma avaliação de um anel de incêndio da plataforma *offshore* PPE-1A (Freitas, 1999). Esta inspeção foi realizada como parte de um projeto de pesquisa para estudar critérios de aceitação para aplicações de materiais compostos em plataformas *offshore*. O objetivo era garantir o desempenho do anel de incêndio da primeira aplicação de material composto nestas condições. Esta tubulação tem as seguintes características: diâmetro 6 polegadas, material PSX-L3, pressão de operação 10 kgf/cm², início de operação 1999, carregamento cíclico, temperatura

ambiente. A inspeção foi subdividida em duas fases: a primeira foi realizada através de inspeção visual e a segunda usando emissão acústica. A máxima pressão de operação foi aprovada para 10 kgf/cm^2 , e uma nova inspeção foi programada para 2000. Em agosto de 2003 a reinspeção não tinha sido realizada, em função de problemas operacionais, resalta-se porém, que o anel de incêndio permanece em bom estado e em funcionamento.

A refinaria Gabriel Passos (REGAP) realizou teste hidrostático monitorado por emissão acústica em três vasos de pressão horizontais. O objetivo desta inspeção foi coletar dados para avaliar se existe qualquer correlação entre emissão acústica e ultra-som onde conceitos de mecânica da fratura foram usados. Este trabalho foi realizado em 1999 (Soares, 1999). As áreas indicadas por emissão acústica continham defeitos, mas em função da grande variedade de profundidades não foi possível estabelecer esta correlação. Outro ponto foi que o vaso estava em condições seguras, enquanto que emissão acústica forneceu um resultado indicando que o vaso devia ser retirado de operação.

Em 1999 (Soares, 1999), um teste hidrostático feito em escala laboratorial, em um vaso de pressão fora de serviço devido a estágios avançados de danos detectados pela técnica ultra-sônica em chapas do costado e também em juntas soldadas, identificando um processo de trincamento e redução das características mecânicas conhecido por trincamento em degraus. Estas descontinuidades não permitiam a continuidade operacional de forma segura. O vaso F-6005 foi inspecionado em serviço e fora de serviço com sistema de inspeção ultra-sônica semi-automático e o teste de emissão acústica foi realizado com o equipamento SPARTAN 2000. O teste hidrostático foi realizado no CENPES. Entre as pressões entre $10,5$ e $15,0 \text{ kgf/cm}^2$ a estrutura apresentou um comportamento diferente, ou seja, aumento da atividade acústica demonstrado pelo incremento da taxa de contagens de emissão acústica e quantidade de sinais, indicando a possibilidade de deformação plástica. Foi concluído que existe a real possibilidade de mostrar antecipadamente os pontos onde poderão ocorrer vazamentos, em função da região onde o vaso iria falhar ter sido indicada com $7,9 \text{ kgf/cm}^2$, enquanto o vaso falhou somente com $89,0 \text{ kgf/cm}^2$.

Amassamentos em dutos enterrados podem resultar de várias causas. Terremotos, deslocamentos de terreno, explosões e escavações são algumas das causas mais comuns. Amassamentos em dutos podem causar um sério risco de segurança devido ao duto estar em perigo imediato de falha. Por outro lado, se não existe crescimento significativo de descontinuidades, o período de tempo no qual o reparo é necessário pode ser dilatado. Em 1999, Ternowchek e Calva descreveram como as tecnologias de EA e ultra-som foram usadas para ajudar na avaliação dos efeitos de amassamentos em dutos. A técnica de EA também foi usada para determinar se a área poderia ser seguramente acessada para expor o amassamento do duto. Mudanças de características físicas (dureza, espessura, tensão limite de escoamento, etc) e o surgimento de trincas podem ocorrer na região do amassamento. EA e ultra-som podem ser utilizadas para definir se existem ou não trincas e junto com as dimensões do amassamento servem como subsídio para a avaliação de integridade do duto na região do amassamento.

Existe um conceito crescente que o método presente usado para re-certificar vagões tanque ferroviários, teste hidrostático, pode não fornecer uma avaliação adequada da integridade dos vagões. O teste hidrostático tem como um de seus propósitos, além da verificação de estanqueidade, aliviar tensões quando novos vagões são fabricados. A indústria tem adotado seu uso para re-certificar a integridade estrutural de vagões tanque. Infelizmente este não é uso correto do teste hidrostático porque não fornece ao executor nenhuma indicação da presença de corrosão ou microtrincamento. O teste somente indica o não vazamento de produto com a gravidade específica se um estiver ocorrendo. Isto foi ilustrado recentemente quando dois vagões diferentes, nos EUA, foram certificados com a técnica hidrostática e vazaram produto em um período curto após o teste. Ternowchek (1999) descreve técnica de emissão acústica usada em conjunto com o teste hidrostático para fornecer ao proprietário do vagão a indicação de qualquer problema oculto não detectável com inspeção visual ou teste hidrostático. O procedimento de teste descrito fornece um meio para detecção de defeitos sub-críticos em um estágio inicial, localizar e fazer reparos sem desmontar o conjunto completo do isolamento do vagão. Este procedimento tem se tornado na *American Association of Railroads* (AAR) nos EUA uma prática aceita.

Durante o resfriamento e a partida de dois reatores instalados na RLAM foram gerados sinais significantes de emissão acústica (Donato, 2000). A inspeção ultra-sônica

detectou falta de penetração na soldagem dos dois reatores. Condições severas de operação de reatores apontam para a possibilidade de fratura frágil e propagação crítica de descontinuidades durante partida, operação e resfriamento. Várias conclusões foram estabelecidas, mas em relação à emissão acústica pode ser dito que devem ser realizados estudos prévios de tensões térmicas para definir a taxa de resfriamento e o diferencial de temperatura. As razões para esta proposta são fornecer estímulo para as descontinuidades e não criar novas trincas na estrutura.

Nikulín, Khanzhin e Rojnov apresentaram estudo do método de emissão acústica para materiais, processos e tecnologia de monitoração. Foram apresentados os resultados do estudo do mecanismo e cinética da fratura de materiais metálicos (aços de duas fases, binários Zr-2,5Nb e ligas de ferro multicomponentes Zr-1,2Sn-1Nb-0,3Fe, multifilamento Nb₃Sn e supercondutores baseados em Nb-Ti e fios de composição baseada em HTSC). A análise quantitativa da fratura é baseada nas medições do pico de amplitude do impulso acústico (máximo) por sensores não ressonantes para medição linear do deslocamento acústico e medições dos parâmetros das trincas. Os métodos desenvolvidos de calibração absoluta do equipamento de EA foram verificados por testes de vários materiais e medições de parâmetros das trincas em fraturas e dobras. As dependências da calibração para quantificação das medições também foram relatadas.

Os avanços na avaliação da integridade estrutural e predição de tensões residuais de vasos de pressão usando a técnica de emissão acústica foram apresentados por Chelladurai, Sankaranarayanan e Purushothamam em 2000. Desde a primeira aplicação da técnica de emissão acústica em uma carcaça de motor de foguete quarenta/cinquenta anos atrás, a tecnologia de emissão acústica tem feito rápido progresso na avaliação de integridade de vasos de pressão metálicos ou de material composto. Chelladurai, Sankaranarayanan e Purushothamam realizaram experimentos com um número de vasos de pressão com camadas de Titânio e Kevlar-epoxi listados para aplicação aeroespacial com número ótimo de canais de emissão acústica. Com base nos dados de emissão acústica coletados durante o ciclo de pressurização e subsequente ciclo de prova de pressão, foi determinado ser possível estimar a vida residual em atenção à degradação apresentada pela razão Felicity. Paralelamente, a possibilidade da estimativa da vida residual de garrafas de pressão de liga Ti-6Al-4V de margem baixa também é discutida neste artigo em referência aos estudos internos desenvolvidos em vasos aeroespaciais.

No Vikram Sarabhai Space Centre em Trivandrum, a técnica de emissão acústica tem demonstrado também ser uma ferramenta eficiente para detecção e caracterização da severidade de descontinuidades como falta de fusão, que não eram detectadas por técnicas de ensaios não destrutivos convencionais.

Com o teste de emissão acústica associado à Mecânica da Fratura, ambas apoiadas por detalhadas propriedades mecânicas e metalúrgicas, novos conceitos de avaliação estão sendo introduzidos, capacitando a aplicação de metodologias de detecção de defeitos associadas com mecanismos de degradação ao contrário da simples detecção de descontinuidades que obviamente não contribuem para a operação segura dos equipamentos. Exemplos destes conceitos podem ser obtidos no antigo PD-6493 (BSI) e no atual API-579. A PETROBRAS/CENPES continua a procurar e desenvolver uma metodologia de avaliação que contemple todas estas disciplinas.

O CENPES têm atuado em quatro frentes de desenvolvimento da técnica de emissão acústica:

- acompanhamento dos ensaios de campo realizados nas unidades de negócio da PETROBRAS;
- desenvolvimento de sistema de qualificação e certificação de pessoal na modalidade emissão acústica;
- participação em projeto multicliente do *Petroleum Environmental Research Forum* (PERF) intitulado PERF AE 95/11 *Advanced acoustic emission for onstream inspection*;
- desenvolvimento de projeto CTPetro junto a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e a Universidade Federal do Ceará (UFC).

Estas atividades não são excludentes e muitas das atividades desenvolvidas em uma das frentes de desenvolvimento é utilizada para outras pesquisas, garantindo um fluxo contínuo de informação e desenvolvimento.

Uma das etapas do projeto CTPetro consiste em analisar os resultados de campo para identificar condições de maior ou menor acerto e, caso seja possível, quantificar os índices de acerto do ensaio de emissão acústica.

A associação da medição da energia de emissão acústica e o movimento de discordâncias em ligas metálicas foi estudado por Brown, Reuben e Steel. A emissão contínua gerada durante escoamento de liga de alumínio 7075-T6, aço carbono En9 e aço inoxidável 316 foi examinada pela visão convencional das fontes de discordância. Um modelo teórico simples relacionando o movimento de discordância da energia de EA para deformação plástica, taxa de deformação e certas características micro-estruturais foi desenvolvida de um meio elástico existente e relações de fluxo cisalhantes. Experimentalmente o total de energia de EA dentro de um corpo de prova de uma liga testada foi quantificado de uma medição de uma superfície simples.

A análise de reconhecimento de padrão de sinais de emissão acústica foi estudada por Kanji Ono e Qixin Huang revisando as várias aproximações de análise de reconhecimento de padrão de sinais de EA, que tem sido empregada durante os últimos anos. Devido aos significativos avanços da tecnologia de computação, o reconhecimento de padrões tem se tornado uma ferramenta prática e deve ser utilizada mais intensamente na comunidade de EA. Como um exemplo, foram examinadas as falhas estruturais de compósitos de resina reforçado com fibra, trincamento de matriz, decoesão e delaminação. Tais micro-fraturas geram numerosos sinais de EA que podem ser detectados. Contudo a maioria dos sinais não leva diretamente a fratura final e estudos antigos de EA tem falhado na identificação clara dos mecanismos de micro-fratura. As características dos sinais gerados de EA nos processo de falha de compósitos reforçados com fibra de vidro e de carbono podem ser classificados por reconhecimento de padrões. Os sinais de EA são registrados digitalmente e analisados pelo uso de um classificador de proximidade de vizinhança. O programa utilizado, ICEPAK, pode classificar até seis tipos desconhecidos de forma de onda de sinais. Os tipos de sinais identificados são então correlacionados com diferentes modos de falha que garantem a faixa de carregamento de tensão. Características dos sinais de EA de processos de falha de várias manipulações de camadas e simulando ondas de chapa propagando no corpo de prova foram também investigados para ajudar a discriminar características de vários tipos de sinais e correlacionar tipos de sinais identificados com mecanismos de micro-falha. É mostrado que a identificação dinâmica do mecanismo de micro-falha em compósitos é possível com os avançados sistemas de análise de emissão acústica usando reconhecimento de padrões.

A iniciação de microtrincas em inclusões de MnS e sua coalescência durante testes de tenacidade à fratura de aço ASTM A533B em corpos de prova tensão compacto foram detectadas pela técnica de emissão acústica. Os testes feitos para caracterização quantitativa do microtrincamento das fontes de emissão, as quais foram caracterizados pela dimensão e orientação da trinca, modos de fratura, e histórico no tempo, são representadas por um momento tensor dependente do tempo. Desde que as formas de onda registradas estão relacionadas ao momento tensor, as funções de deslocamento de Green do corpo de prova, e a função de transferência do sistema de registro por uma integral convolução da teoria da elastodinâmica, os momentos tensores são determinados por técnicas de deconvolução. Dois tipos de fontes foram determinados: um modo de tração da trinca causado por decoesão da inclusão de MnS e a coalescência de microtrincas com modos de tração e cisalhamento misturados. As dimensões e o tempo de duração das microtrincas foram também estimados neste estudo realizado por Ohira e Pao.

Com o objetivo de elucidar a microcinética do trincamento assistido pelo hidrogênio em aço de baixa liga, um novo sistema desenvolvido de inversão de fonte de emissão acústica EA foi usado por Hayashi e Takemoto. Este sistema e alguns problemas encontrados na sua aplicação de monitoração da cinética de microtrincamento foram descritos em artigos publicados em congressos. O sistema de monitoração de EA é composto de um sensor do tipo deslocamento, um pré-amplificador, um conversor A/D de alta velocidade, e um computador pessoal de 32 bit. A função de transferência do sistema de medição de EA foi cuidadosamente examinada e determinada para medir o deslocamento da superfície, sem fornecer a distorção da onda, até 1,5 MHz. Programas computacionais para o procedimento da inversão de fonte de EA tornaram possível calcular a função secundária de Green (função de transferência do material), e também para simular o deslocamento da posição do sensor, e para calcular as ondas da fonte das ondas detectadas pela integral convolução no domínio do tempo, e a integral deconvolução no domínio da frequência. A energia liberada pela propagação da trinca em degraus foi obtida pela deconvolução das ondas detectadas com a função de transferência total do sistema, que foi experimentalmente determinada pela quebra da barra de grafite. A dimensão da trinca foi determinada pela energia liberada com o auxílio da mecânica da fratura, e foi determinada para ser bem ajustada a área de fratura intergranular induzida pelo hidrogênio em estágio inicial. Apesar da acurácia da

informação da fonte ondas devem ser cuidadosamente examinadas em outros experimentos com grandes corpos de prova, pode ser dito que procedimentos de inversão da fonte de EA fornecem informações mais diretas da microcinética de trincamento assistido pelo meio.

A execução de teste hidrostático é uma operação tensa e perigosa. Para equipamentos que já estiveram em serviço torna-se mais preocupante ainda pois o teste hidrostático avaliará apenas a estanqueidade do equipamento não revelando nenhuma informação em relação a integridade estrutural do objeto ensaiado. As figuras de 2.1 a 2.4 ilustram o catastrófico resultado obtido com a execução de teste hidrostático sem acompanhamento de nenhuma ferramenta de avaliação de integridade.



Fig. 2.1 – Resultado de teste hidrostático sem acompanhamento de ferramenta de avaliação de integridade estrutural.



Fig. 2.2 – Detalhe da região fraturada da figura 2.1.



Fig. 2.3 – Detalhe da seção arrancada do vaso após fratura.



Fig. 2.4 – Vista em outro ângulo da região fraturada da figura 2.1.

Materiais e métodos

Para a realização deste estudo foram utilizados os materiais descritos abaixo:

- banco de dados em ambiente Microsoft Access (Aguar, 2002);

A utilização do banco de dados propiciou a utilização das informações reais existentes para uma equipe da área de inspeção para a tomada de decisão a respeito da continuidade operacional dos equipamentos ensaiados. Além das informações geométricas e das características construtivas dos equipamentos, o banco de dados contempla os resultados das inspeções não destrutivas realizadas após o ensaio de emissão acústica. Os resultados da inspeção não destrutiva foram utilizados para o estabelecimento de correlações entre emissão acústica e mecânica de fratura.

Análise do banco de dados

O banco de dados analisado contempla 210 ensaios realizados. A tabela 3.1 revela que os equipamentos ensaiados classificados como “E” são os mais críticos para a continuidade operacional segura. A análise do banco de dados seleciona 21 equipamentos com classificação “E”. A tabela 4.1 apresenta o resumo dos dados obtidos em 18 equipamentos, uma das pastas não foi localizada (registro 044) para a coleta de informações e dois equipamentos tratavam-se de tanques de armazenamento.

Tabela 4.1

Equipamentos classificados como “E” no ensaio de emissão acústica

Tipo e código do equipamento	Ensaio não destrutivo	Dimensionamento de descontinuidades		
Esfera (008)	EV, LP, PM e US	380 mm superficial, FP, DL		
Coluna (030)	US	IE, FP		
Coluna (032)	US	FF		
Coluna (035)	PM	0 (zero)		
Coluna (038)	EV, PM	Vazamentos, 0 (zero)		
Coluna (039)	US	FP		
Coluna (046)	PM, US	FP		
Vaso de pressão (050)	PM, US	IE		
Vaso de pressão (061)	PM, US	10 mm		
Vaso de pressão (132)	PM, US	TT, TL, FIPH		
Vaso de pressão (133)	PM, US	TT, TL		
Vaso de pressão (134)	PM	TT, TL		
Reator (155)	Sem	Sem		
Reator (166)	US, EV, PM	Trinca		
Vaso de pressão (1203)	LP, US, PM	Tipo	Comprimento	profundidade
		Trincas	60, 5 e 11 mm	> 2 mm
		Trinca	20 mm	3,2 mm
		Trinca	60 mm	
		FF	210, 280 e 45 mm	
Vaso de pressão (1206)	Sem	Sem		
Trocador de calor (1207)	RX	FP, PO, FF		
Tubulação (1219)	EV	0 (zero)		

Nota:
 EV – ensaio visual; LP – líquidos penetrantes; PM – partículas magnéticas; US – ultra-som; IE – inclusão de escória. FP – falta de penetração; DL – dupla laminação; FF – falta de fusão; TT – trinca transversal; TL – trinca longitudinal; FIPH – fissuração induzida pelo hidrogênio; RX – radiografia; PO – porosidade.

A análise qualitativa dos dados apresentados na tabela 4.1 permite afirmar:

- 71% dos equipamentos classificados como “E” são colunas e vasos de pressão.

A figura 4.1 apresenta a distribuição por equipamentos;

- 81% dos equipamentos classificados como “E” apresentam descontinuidades. A figura 4.2 apresenta este resultado;

- esfera, vaso de pressão, reator e trocador de calor, quando inspecionados, apresentaram descontinuidades;
- 67% das colunas inspecionadas apresentaram descontinuidades, e;
- tubulações não apresentaram descontinuidades.

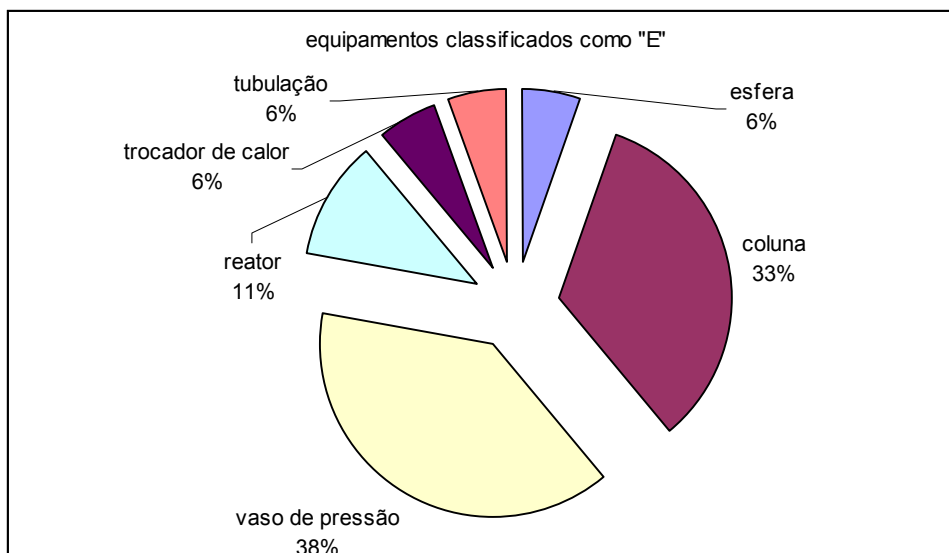


Fig. 4.1 – Distribuição percentual de equipamentos ensaiados por emissão acústica e classificado como “E”.

Para a realização de análise quantitativa é necessário a utilização de informações sobre o material, espessura, geometria, tratamento térmico, pressão de teste hidrostático, máxima pressão de trabalho e temperatura. Estas informações foram obtidas no banco de dados.

Apenas três equipamentos apresentados na tabela mostram dimensionamento de descontinuidades, totalizando seis descontinuidades. Destas descontinuidades apenas duas apresentam o dimensionamento da altura. O valor da altura da descontinuidade, quando não fornecido, será inferido em 2 mm para descontinuidades superficiais e para descontinuidades internas será utilizado o valor do diâmetro do furo cilíndrico necessário para a execução da inspeção ultra-sônica.

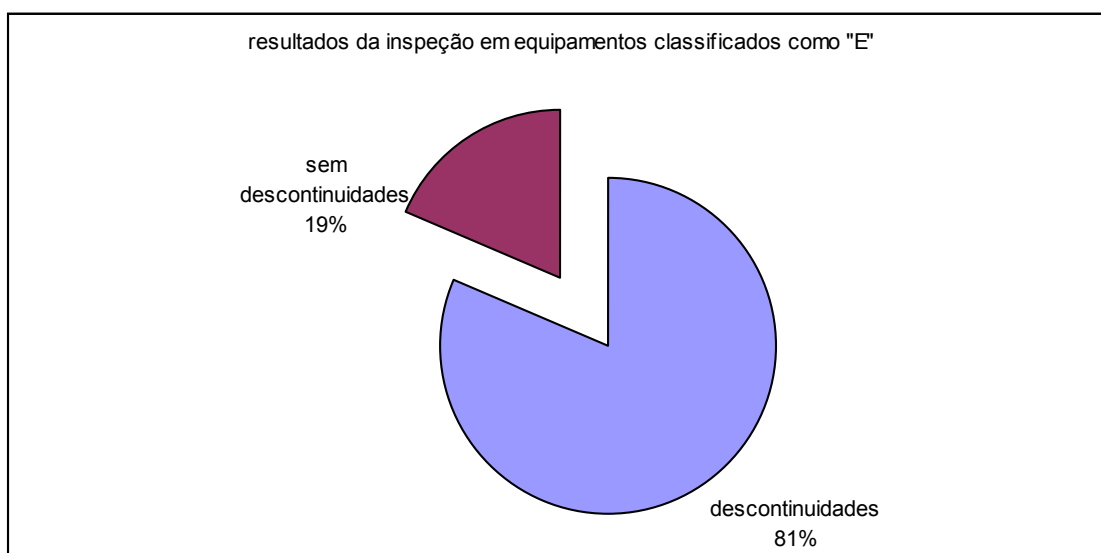


Fig. 4.2 – Percentual de equipamentos classificados como “E” que apresentaram ou não apresentaram descontinuidades.

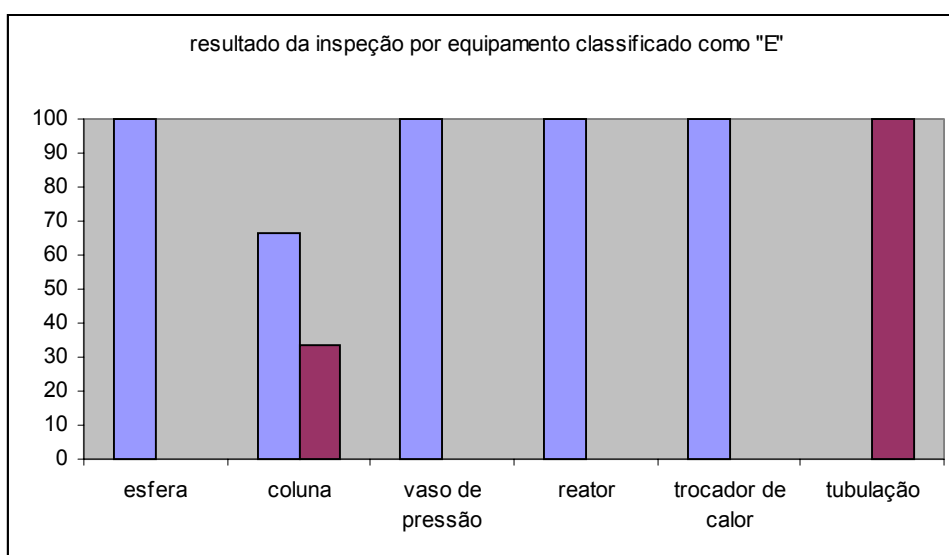


Fig. 4.3 – Resultado percentual por equipamento classificado como “E” que apresentaram ou não apresentaram descontinuidades.

A tabela 4.2 apresenta os equipamentos avaliados pela mecânica da fratura e os respectivos parâmetros utilizados nos cálculos. Os equipamentos foram calculados na condição carregamento estático e nível 2 da norma BS 7910.

Tabela 4.2

Equipamentos avaliados pela mecânica da fratura

Tipo e código do equipamento	Parâmetros								
	Material		Altura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Dimensão da seção (mm)	Tensão de membrana (MPa)	de	Condição de tratamento
Esfera (008)	ASTM A515 Gr70		2	380	64,6	4000	126		Tratado termicamente
Vaso de pressão (061)	ASTM A515 Gr70		2	10	44,5	5000	157		Tratado termicamente
Vaso de pressão (1203)	ASTM A516 Gr70		3,8	60,5	111	10868	141		Tratado termicamente
			2	11					
			3,2	20					
			2	60					
			2	210					
			3,9	280					
			2	45					

A tabela 4.3 apresenta os valores das propriedades mecânicas dos materiais utilizados nas análises.

Tabela 4.3

Propriedades mecânicas

Material	Propriedades mecânicas		
	Tensão escoamento (MPa)	limite de Tensão limite de resistência (MPa)	Tenacidade a fratura K (MPa.m ^{0,5})
ASTM A515 Gr70	256	483	80
ASTM A516 Gr70	256	483	80
ASTM A204 Gr.A	255	448	80

Os parâmetros das tabelas 4.2 e 4.3 são entradas para o cálculo do diagrama FAD (*Failure Assessment Diagram*) apresentado na figura 4.4. A tabela 4.4 apresenta os resultados do diagrama FAD para os equipamentos analisados. O lugar geométrico representado pelo par Kr e Lr fornece informação sobre o provável modo de falha. Aproximando-se do lado esquerdo do diagrama tem-se o modo de falha colapso e do lado direito fratura. Descontinuidades que, após o cálculo, determinem pontos inclusos na figura ($Kr < 1,0$ e $Lr < 1,55$, na figura 4.4) são consideradas aceitáveis, o caso contrário inaceitável. O parâmetro “fator de segurança do carregamento” exemplifica a distância entre o lugar geométrico (Kr , Lr) e a curva do diagrama FAD. Valores inferiores a 1 identificam situações críticas onde a falha pode ter ocorrido, valores

inferiores porém próximos a 1 identificam situações próximas da falha e valores muito superiores a 1 apresentam situações confortáveis estruturalmente.

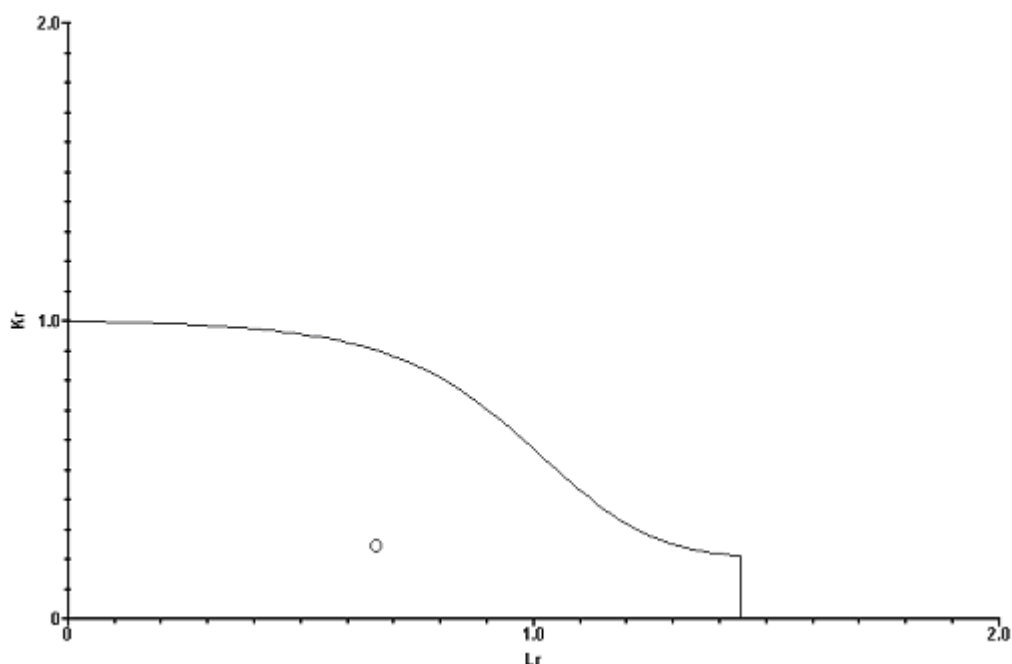


Fig. 4.4 – Diagrama FAD típico.

A tabela 4.5 apresenta os equipamentos classificados como “D” conforme a tabela 3.1. A análise do banco de dados seleciona 41 equipamentos com classificação “D”. Dez equipamentos classificados como “D” tratavam-se de tanques de armazenamento e não foram considerados nesta análise.

Tabela 4.4

Resultados do diagrama FAD para equipamentos classificados como “E”

Equipamento	Valores			
	Percentual de ativação (%)	Kr	Lr	Fator de segurança do carregamento
Esfera (008)	10	0,235	0,591	1,994
Vaso de pressão (061)	71	0,232	0,736	1,669
Vaso de pressão (1203)	65	0,323	0,661	1,669
		0,221	0,661	1,850
		0,276	0,661	1,741
		0,248	0,661	1,790
		0,251	0,662	1,783
		0,337	0,664	1,644
		0,247	0,661	1,793

A análise qualitativa dos dados apresentados na tabela 4.5 permite afirmar:

- 81% dos equipamentos classificados como “D” são reatores e vasos de pressão. A figura 4.5 apresenta a distribuição por equipamentos;
- 71% dos equipamentos classificados como “D” apresentaram descontinuidades, quando inspecionados. A figura 4.6 ilustra este resultado;
- esferas, vasos de pressão, reatores e coletores, quando inspecionados apresentaram descontinuidades;
- 70% dos vasos de pressão inspecionados apresentaram descontinuidades.

Apenas três equipamentos apresentados na tabela 4.5 tiveram o comprimento de suas descontinuidades dimensionado. O valor da altura das descontinuidades foi considerado igual a 2 mm para as descontinuidades superficiais; e, para descontinuidades internas, igual ao diâmetro do furo cilíndrico utilizado para a calibração da sensibilidade do ensaio ultra-sônico.

A tabela 4.6 apresenta os equipamentos avaliados pela mecânica da fratura e os respectivos parâmetros utilizados nos cálculos. Os equipamentos foram calculados na condição carregamento estático e nível 2 da norma BS 7910. A tabela 4.3 apresenta os valores das propriedades mecânicas dos materiais utilizados nas análises.

Tabela 4.5

Equipamentos classificados como “D” no ensaio de emissão acústica

Tipo e código do equipamento	Ensaio não destrutivo	Dimensionamento de descontinuidades		
Esfera (011)	US, PM	760 mm, 190 mm, 100 mm, 430 mm, 15 mm, 200 mm, 60 mm		
Esfera (014)	PM, US	Trincas		
Vaso de pressão (28)	Sem	Sem		
Vaso de pressão (052)	Sem	Sem		
Vaso de pressão (062)	PM e US	Trincas, dimensões não informadas		
Vaso de pressão (089)	Sem	Sem		
Vaso de pressão (128)	PM, US	Descontinuidades, dimensões não informadas		
Vaso de pressão (141)	Sem	Sem		
Esfera (144)	US, PM e EV	Tipo	Comprimento	profundidade
		TL na perna	400 mm	4 mm
		TL na perna	700 mm	4 mm
		TL na perna	700 mm	5 mm
		TL na perna	200 mm	Passante
Esfera (146)	PM, EV	0 (zero)		
Vaso de pressão (147)	EV, PM	0 (zero)		
Reator (150)	US, EV, LP	Trincas, dimensões não informadas		

Vaso de pressão (168)	US, EV	Descontinuidades
Reator (170)	EV, US, PM	Descontinuidades sem dimensões
Vaso de pressão (1199)	US, LP, PM	0 (zero)
Reator (1200)	US, PM	Trincas, dimensões não informadas
Reator (1201)	PM, US	Trincas superficiais com comprimentos 6 mm, 3 mm e 3 mm, trincas internas com comprimentos 210 mm e 30 mm
Vaso de pressão (1204)	PM	Diversas trincas com comprimentos 5 mm, 10 mm, 8 mm, 3 mm, 15 mm, 7 mm e 6 mm
Vaso de pressão (1205)	Sem	Sem
Vaso de pressão (1208)	EV	Vazamentos
Reator (1212)	EV, PM, US	0 (zero)
Vaso de pressão (1213)	US, LP	DL
Reator (1214)	Sem	Sem
Reator (1215)	PM, US, LP	Trincas, dimensões não informadas
Reator (1216)	US, PM, LP	FF, IE, TL, dimensões não informadas
Coletor (1220)	US	0 (zero)
Esfera (1232)	US, PM	FP
Vaso de pressão (1233)	US	0 (zero)
Vaso de pressão (1234)	Sem	Sem
Vaso de pressão (1235)	Sem	Sem
Vaso de pressão (1236)	PM, ACFM	Trincas, dimensões não informadas

Nota:

EV – ensaio visual; LP – líquidos penetrantes; PM – partículas magnéticas; US – ultra-som; IE – inclusão de escória. FP – falta de penetração; DL – dupla laminação; FF – falta de fusão; TT – trinca transversal; TL – trinca longitudinal; FIPH – fissuração induzida pelo hidrogênio; RX – radiografia; PO – porosidade.

A tabela 4.7 apresenta os resultados do diagrama FAD para os equipamentos classificados como “D”.

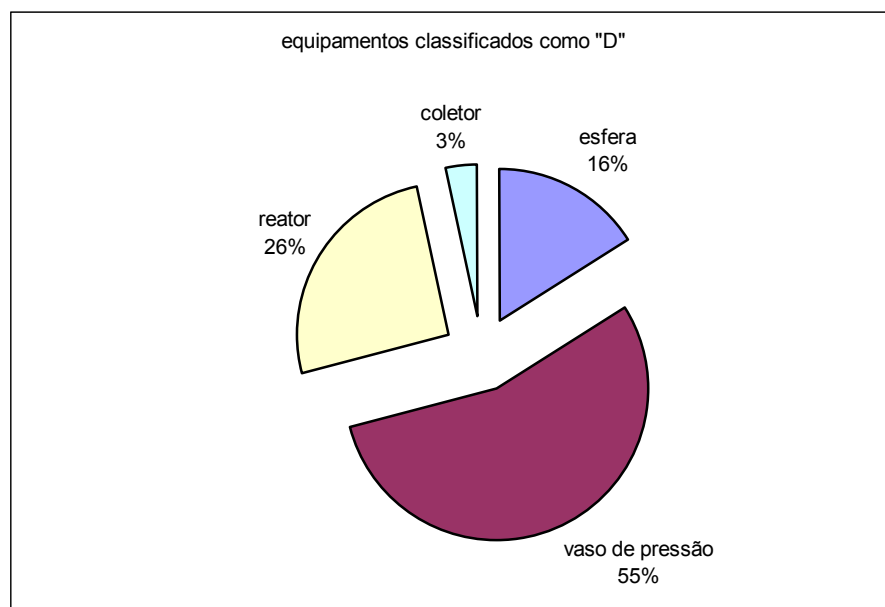


Fig. 4.5 – Distribuição percentual de equipamentos ensaiados por emissão acústica classificados como “D”.

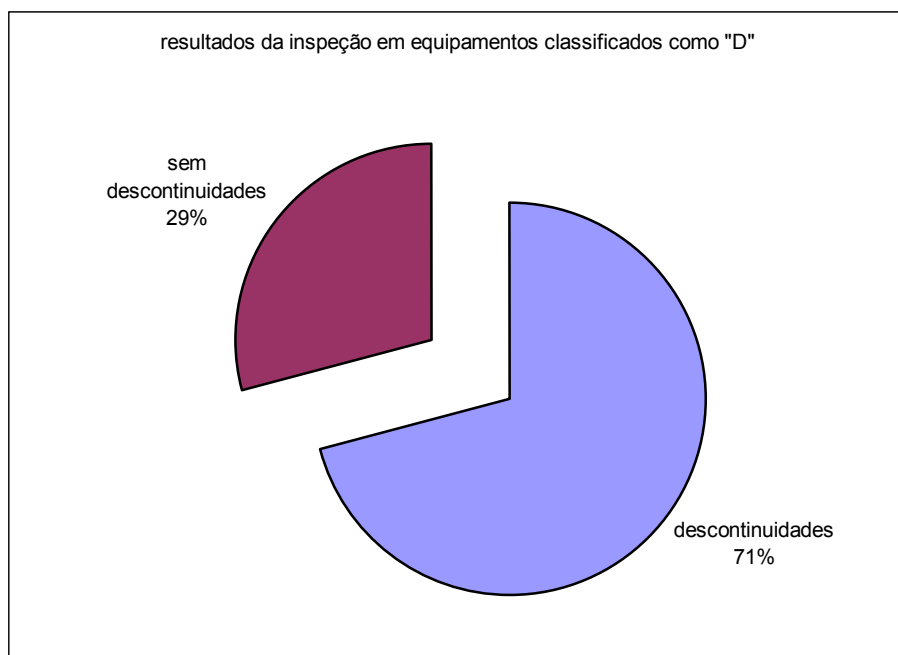


Fig. 4.6 – Percentual de equipamentos classificados como “D” que apresentaram ou não apresentaram descontinuidades.

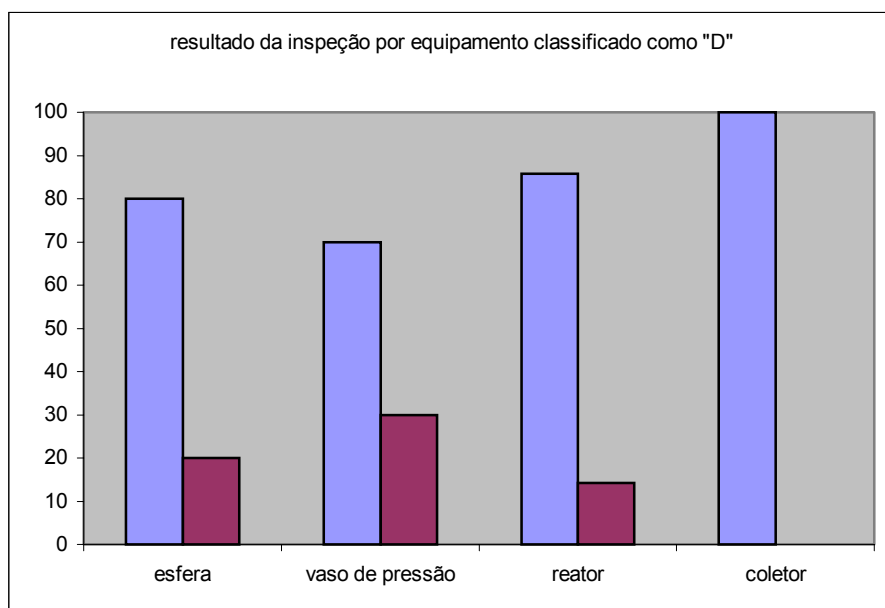


Fig. 4.7 – Resultado percentual por equipamento classificado como “D” que apresentaram ou não apresentaram descontinuidades.

A tabela 4.8 apresenta os equipamentos classificados como “C” conforme a tabela 3.1. Dezesesseis equipamentos classificados como “C” pertenciam a classe tanques de armazenamento e não foram considerados nesta análise.

A análise qualitativa dos dados apresentados na tabela 4.8 permite afirmar:

- 50% dos equipamentos classificados como “C” são vasos de pressão e reatores.
A figura 4.8 apresenta a distribuição por equipamentos;
- 60% dos equipamentos classificados como “C” apresentaram descontinuidades.
A figura 4.9 apresenta este resultado;
- esferas, vasos de pressão e reatores, quando inspecionados, apresentaram descontinuidades;
- 100% das esferas inspecionadas apresentaram descontinuidades, e;
- colunas e trocadores de calor não apresentaram descontinuidades.

A tabela 4.9 apresenta o equipamento classificado como “C” avaliado pela mecânica da fratura com os respectivos parâmetros utilizados no cálculo.

Tabela 4.6

Equipamentos classificados como “D” avaliados pela mecânica da fratura

Tipo e código do equipamento	Parâmetros								
	Material		Altura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Dimensão da seção (mm)	Tensão de membrana (MPa)	Condição de tratamento	
Esfera (011)	ASTM A515		2	760	64,6	4000	126	Tratado termicamente	
		Gr70	2	190					
			2	100					
			2	430					
			2	15					
			2	200					
			2	60					
Reator (1201)	ASTM A516		2	6	63,5	5000	175	Tratado termicamente	
		Gr70	2	3					
			2	3					
			4,8	210					
			4,8	30					
Vaso de pressão (1204)	ASTM A204		5	2	12	2000	60	Tratado termicamente	
		GrA	2	11					
			3,2	20					
			2	60					
			2	210					
			3,9	280					
			2	45					

A tabela 4.10 apresenta os resultados do diagrama FAD para os equipamentos classificados como “C”.

A tabela 4.11 apresenta os equipamentos classificados como “B” conforme a tabela 3.1. Treze equipamentos classificados como “B” pertenciam a classe tanques de armazenamento e não foram considerados nesta análise.

A análise qualitativa dos dados apresentados na tabela 4.11 permite afirmar:

- 64% dos equipamentos classificados como “B” são esferas. A figura 4.11 apresenta a distribuição por equipamentos;
- 75% dos equipamentos classificados como “B” apresentam descontinuidades. A figura 4.12 apresenta este resultado;
- esferas, quando inspecionadas, apresentaram descontinuidades;
- 100% das esferas apresentaram descontinuidades, e;
- vasos de pressão não apresentaram descontinuidades.

Tabela 4.7

Resultados do diagrama FAD para equipamentos classificados como “D”

Equipamento	Percentual de ativação (%)	Valores		
		Kr	Lr	Fator de segurança do carregamento
Esfera (011)	81	0,530	0,595	1,831
		0,528	0,591	1,845
		0,233	0,591	2,000
		0,235	0,593	1,990
		0,216	0,591	2,043
		0,234	0,591	1,996
		0,232	0,591	2,002
		0,213	0,685	1,799
Reator (1201)	78	0,191	0,684	1,863
		0,191	0,684	1,863
		0,279	0,729	1,591
		0,270	0,697	1,663
Vaso de pressão (1204)	48	0,150	0,254	4,623
		0,142	0,248	4,774
		0,133	0,276	4,511
		0,166	0,267	4,321
		0,171	0,277	4,168
		0,279	0,336	3,105
		0,164	0,264	4,376

A tabela 4.12 apresenta o equipamento, classificado como “B”, avaliado pela mecânica da fratura e os respectivos parâmetros utilizados nos cálculos.

A tabela 4.13 apresenta os resultados do diagrama FAD para o equipamento classificado como “B”.

A tabela 4.14 apresenta os equipamentos classificados como “A” conforme a tabela 3.1. Dez equipamentos classificados como “A” pertenciam ao grupo identificado como tanques de armazenamento e não foram considerados nesta análise.

Tabela 4.8

Equipamentos classificados como “C” no ensaio de emissão acústica

Tipo e código do equipamento	Ensaio não destrutivo	Dimensionamento de descontinuidades
Reator (005)	Sem	Sem
Vaso de pressão (007)	Sem	Sem
Esfera (009)	EV, ME	Sem
Esfera (010)	EV, PM, US	Trincas superficiais e descontinuidades internas
Esfera (012)	PM, US	Descontinuidades
Esfera (013)	PM, US	Descontinuidades
Reator (025)	Sem	Sem
Reator (026)	Sem	Sem
Vaso de pressão (031)	EV	Corrosão
Coluna (033)	EV	Corrosão
Vaso de pressão (037)	PM	Zero
Vaso de pressão (040)	PM	Descontinuidades
Coluna (042)	EV, PM	Corrosão
Coluna (055)	Sem	Sem
Vaso de pressão (058)	PM, US, LP	IE, PO, segregações
Vaso de pressão (063)	EV	Sem
Coluna (064)	EV	Sem
Esfera (067)	Sem	Sem
Vaso de pressão (072)	Sem	Sem
Vaso de pressão (073)	US	Zero
Vaso de pressão (090)	Sem	Sem
Vaso de pressão (140)	PM, LP, US	Trinca
Reator (152)	EV, PM, LP	Trinca
Esfera (161)	US	Trinca com comprimento 55 mm e altura 1,2 mm
Coluna (165)	PM, EV	Zero
Vaso de pressão (167)	EV	Trinca
Vaso de pressão (169)	EV, LP	Zero
Vaso de pressão (1202)	Sem	Sem
Esfera (1209)	Sem	Sem
Reator (1210)	LP	Zero
Reator (1211)	Sem	Sem
Trocador de calor (1217)	LP, US	Zero
Tubulação (1223)	Sem	Sem
Tubulação (1224)	Sem	Sem
Tubulação (1226)	Sem	Sem
Tubulação (1228)	Sem	Sem

Tubulação (1231)	Sem	Sem
Nota:		
EV – ensaio visual; ME – medição de espessura, LP – líquidos penetrantes; PM – partículas magnéticas;		
US – ultra-som; IE – inclusão de escória; PO – porosidade.		

A análise qualitativa dos dados apresentados na tabela 4.14 permite afirmar:

- 53% dos equipamentos classificados como “A” são vasos de pressão. A figura 4.13 apresenta este resultado;
- 40% dos equipamentos classificados como “A” apresentaram descontinuidades, quando inspecionados. A figura 4.14 ilustra este resultado;
- esferas e vasos de pressão, quando inspecionados apresentaram descontinuidades;
- 60% das esferas inspecionadas apresentaram descontinuidades, e;
- 100% das colunas inspecionadas não apresentaram descontinuidades.

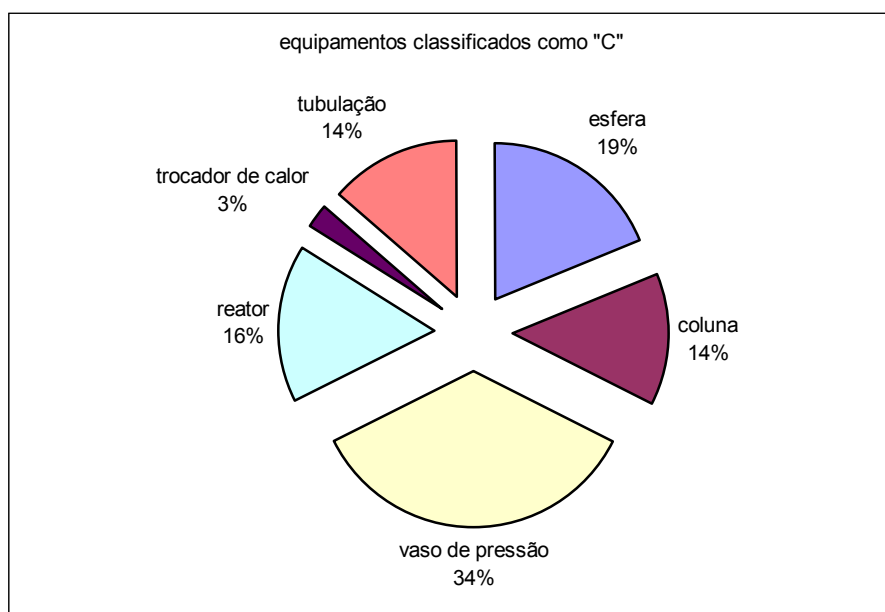


Fig. 4.8 – Distribuição percentual de equipamentos ensaiados por emissão acústica e classificado como “C”.

Apenas um equipamento apresentou dimensionamento do comprimento da descontinuidade detectada. A tabela 4.15 apresenta o equipamento, classificado como “A”, avaliado pela mecânica da fratura e os respectivos parâmetros utilizados nos cálculos.

A tabela 4.16 apresenta os resultados do diagrama FAD para os equipamentos classificados como “A”.

A tabela 4.17 apresenta os equipamentos que não apresentaram sinais significantes de emissão acústica conforme a tabela 3.1. Dois equipamentos classificados como “não significativo” pertenciam ao tipo tanque de armazenamento e não foram considerados nesta análise.

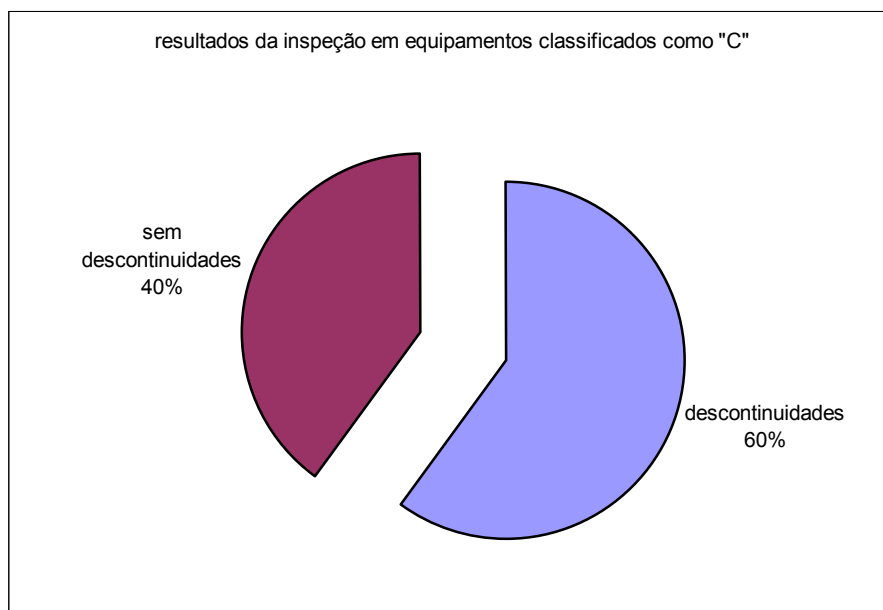


Fig. 4.9 – Percentual de equipamentos classificados como “C” que apresentaram ou não apresentaram descontinuidades.

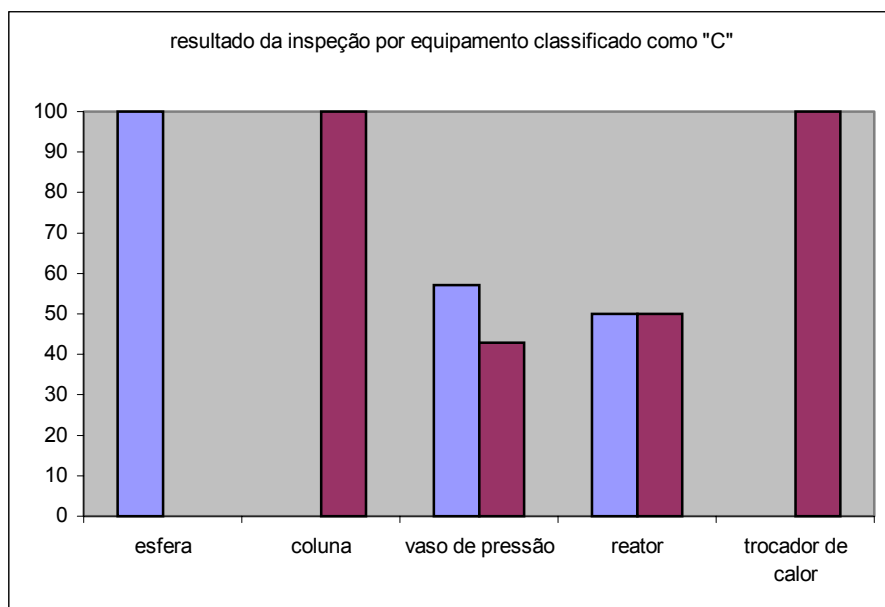


Fig. 4.10 – Resultado percentual por equipamento classificado como “C” que apresentaram ou não apresentaram descontinuidades.

Tabela 4.9

Equipamento classificado como “C” avaliado pela mecânica da fratura

Tipo e código do equipamento	Parâmetros							Condição de tratamento
	Material	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Dimensão da seção (mm)	Tensão de membrana (MPa)	de	
Esfera (161)	ASTM A516 Gr70	1,2	55	46,5	4000	22,6 kgf/cm ²		Tratado termicamente

Tabela 4.10

Resultados do diagrama FAD para equipamentos classificados como “C”

Equipamento	Valores			
	Percentual de ativação (%)		Kr	Lr
Esfera (161)	10		0,236	1,017
	Fator de segurança do carregamento			
	1,236			

Tabela 4.11

Equipamentos classificados como “B” no ensaio de emissão acústica

Tipo e código do equipamento	Ensaio não destrutivo	Dimensionamento de descontinuidades
Esfera (016)	PM, US	descontinuidades
Esfera (019)	PM	TL
Vaso de pressão (049)	Sem	Sem
Esfera (057)	Sem	Sem
Vaso de pressão (074)	US	Zero
Esfera (091)	Sem	Sem
Esfera (099)	Sem	Sem
Esfera (139)	EV	Sem

Esfera (160)	US	Trinca com 2,5 mm de altura e 180 mm de comprimento
Tubulação (1218)	Sem	Sem
Tubulação (1225)	Sem	Sem

A análise qualitativa dos dados apresentados na tabela 4.17 permite afirmar:

- 59% dos equipamentos ensaiados são vasos de pressão. A figura 4.16 apresenta a distribuição por equipamentos;
- 44% dos equipamentos ensaiados, quando inspecionados, apresentaram descontinuidades. A figura 4.17 ilustra este resultado;
- vasos de pressão, esferas, tubulação e caldeiras apresentaram descontinuidades, quando inspecionadas;
- 100% das caldeiras inspecionadas apresentaram descontinuidades, e;
- 100% dos reatores e trocadores de calor não apresentaram descontinuidades.

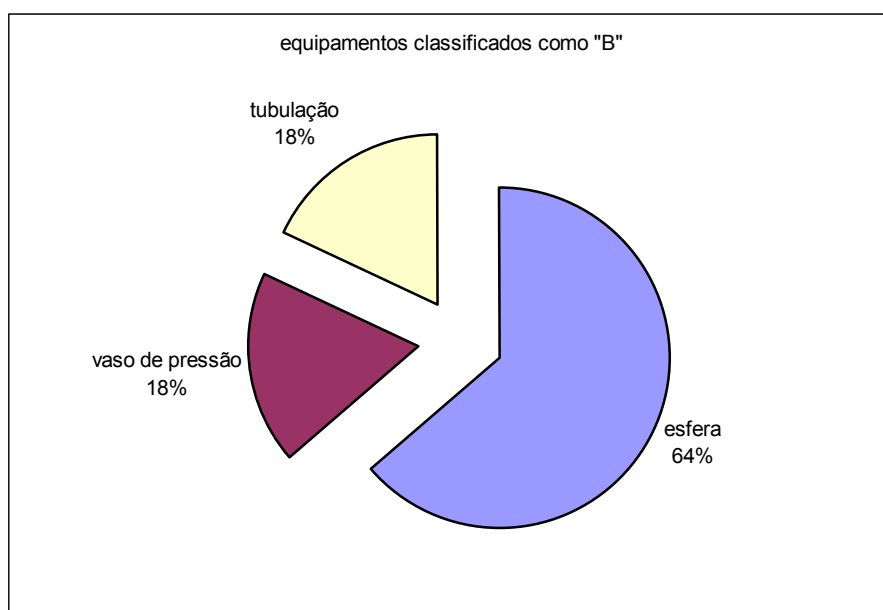


Fig. 4.11 – Distribuição percentual de equipamentos ensaiados por emissão acústica e classificados como “B”.

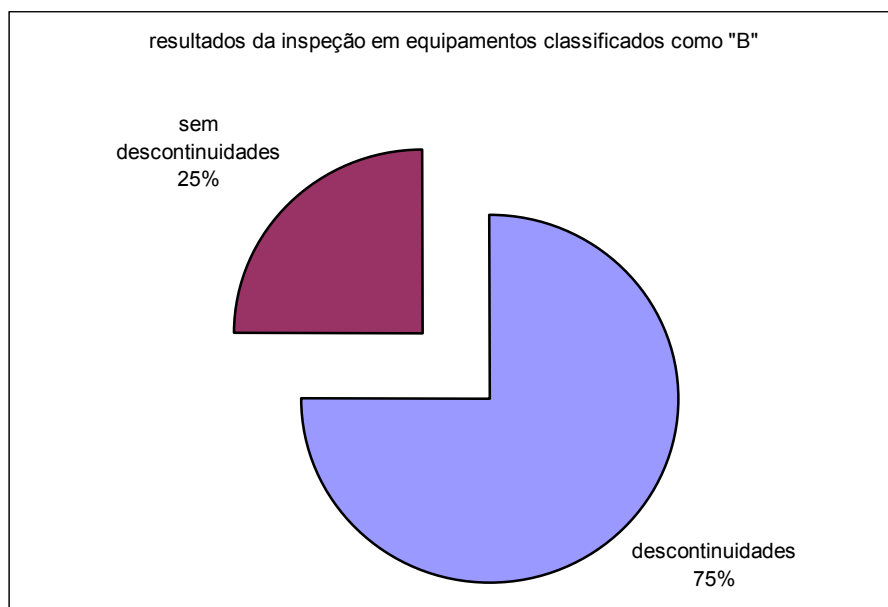


Fig. 4.12 – Percentual de equipamentos classificados como “B” que apresentaram ou não apresentaram descontinuidades.

Tabela 4.12

Equipamento classificado como “B” avaliado pela mecânica da fratura

Tipo e código do equipamento	Material	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Parâmetros			Tensão de membrana (MPa)	Condição de tratamento	de
				Espessura (mm)	Dimensão da seção (mm)				
Esfera (160)	ASTM A516 Gr70	2,5	180	46,5	7817		217	Tratado termicamente	

Tabela 4.13

Resultados do diagrama FAD para equipamentos classificados como “B”

Equipamento	Valores			
	Percentual de ativação (%)	Kr	Lr	Fator de segurança do carregamento
Esfera (161)	10	0,342	1,018	1,129

Tabela 4.14

Equipamentos classificados como “A” no ensaio de emissão acústica

Tipo e código do equipamento	Ensaio não destrutivo	Dimensionamento de descontinuidades
Reator (001)	Sem	Sem
Vaso de pressão (006)	Sem	Sem
Esfera (015)	PM, US	Descontinuidades
Esfera (018)	PM, US	Descontinuidades
Coluna (034)	PM, EV	Zero
Vaso de pressão (036)	Sem	Sem
Vaso de pressão (041)	PM	Zero
Vaso de pressão (045)	EV, PM	Zero
Vaso de pressão (053)	Sem	Sem

Esfera (059)	US	Zero
Vaso de pressão (065)	US	Zero
Vaso de pressão (076)	EV	Sem
Vaso de pressão (086)	EV	Sem
Vaso de pressão (136)	PM, US	Trinca 10 mm comprimento
Esfera (148)	US, PM	Trinca
Esfera (154)	PM, US	Zero
Reator (1222)	Sem	Sem

Apenas um equipamento apresentou dimensionamento do comprimento da descontinuidade detectada para a classificação “insignificante”. A informação de espessura do equipamento inspecionado não pode ser recuperada no banco de dados, sendo assim, este equipamento não foi analisado segundo os critérios de mecânica da fratura.

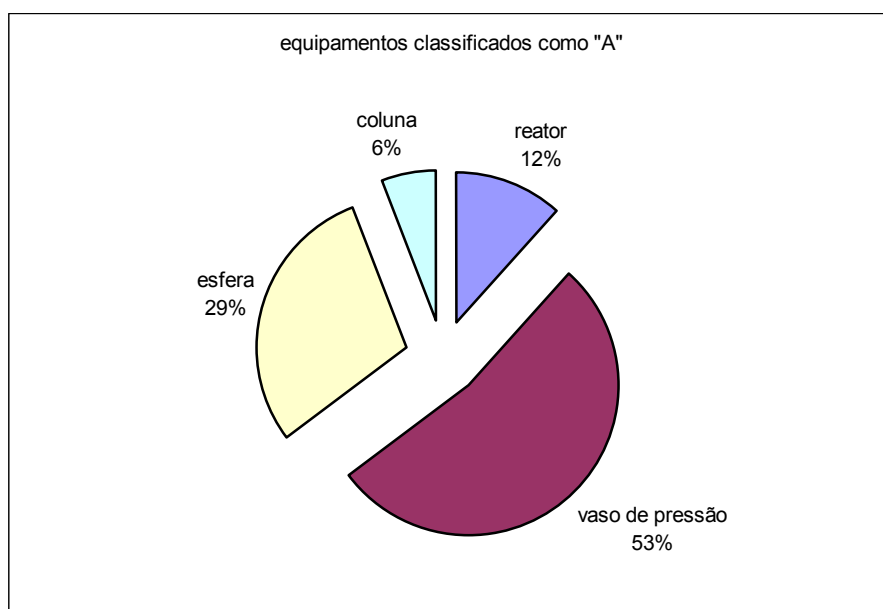


Fig. 4.13 – Distribuição percentual de equipamentos ensaiados por emissão acústica classificados como “A”.

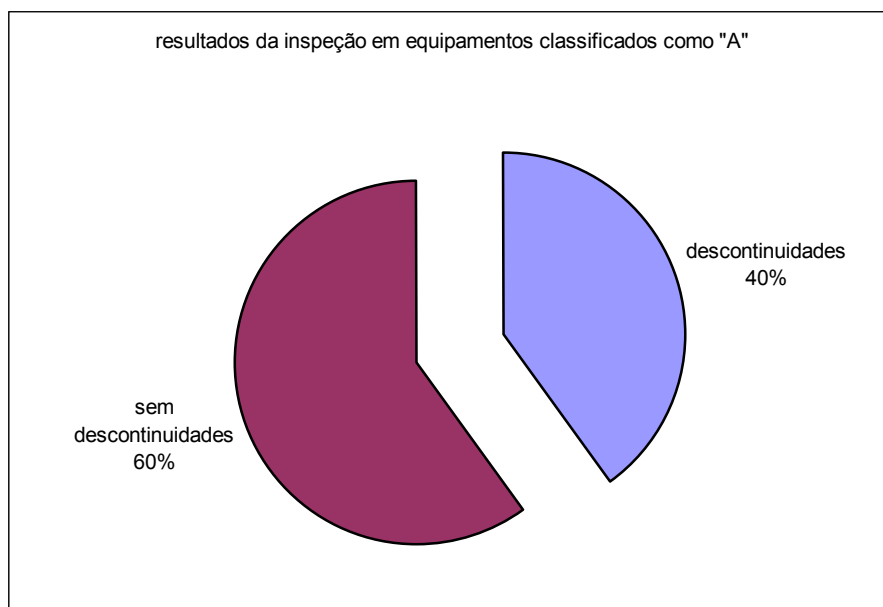


Fig. 4.14 – Percentual de equipamentos classificados como “A” que apresentaram ou não apresentaram descontinuidades.

O equipamento (registro 029) identificado como transformador não foi considerado nesta análise por se tratar de outra metodologia de trabalho.

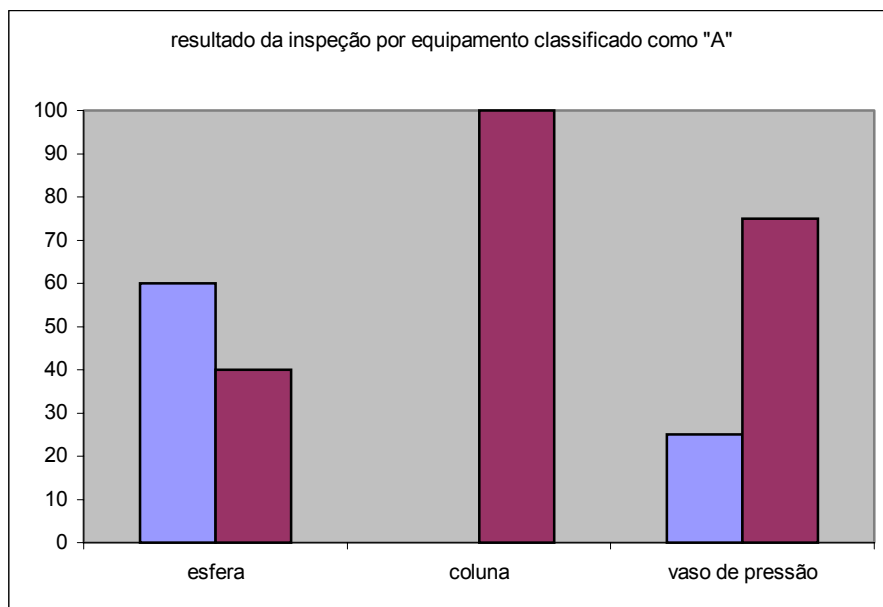


Fig. 4.15– Resultado percentual por equipamento classificado como “A” que apresentaram ou não apresentaram descontinuidades.

Tabela 4.15

Equipamento classificado como “A” avaliado pela mecânica da fratura

Tipo e código do equipamento	Material	Parâmetros							Condição de tratamento
		Altura (mm)	Comprimento (mm)	Espessura (mm)	Dimensão da seção (mm)	Tensão de membrana (MPa)			
Vaso de pressão (136)	ASTM C	A285	2	10	12,5	1250	25	Tratado termicamente	

Tabela 4.16

Resultados do diagrama FAD para equipamentos classificados como “A”

Equipamento	Valores			
	Percentual de ativação (%)	Kr	Lr	Fator de segurança do carregamento
Vaso de pressão (136)	605	0,09	0,128	9,831

Diversas análises podem ser estabelecidas com os dados coletados. Análises podem ser efetuadas considerando a quantidade de equipamentos contendo ou não descontinuidades, a análise por tipo de equipamento e análises considerando os resultados de mecânica da fratura.

Tabela 4.17

Equipamentos classificados como “não significativos” no ensaio de emissão acústica

Tipo e código do equipamento	Ensaio não destrutivo	Dimensionamento de descontinuidades
Vaso de pressão (002)	Sem	Sem
Vaso de pressão (003)	Sem	Sem
Vaso de pressão (004)	Sem	Sem
Esfera (017)	PM, US	Descontinuidades
Esfera (021)	US, PM	FF, TL, indicações superficiais
Esfera (022)	US, PM	TL, FF
Tubulação (027)	LP, EV	Zero
Vaso de pressão (043)	EV, PM	Corrosão
Vaso de pressão (047)	PM	Zero
Vaso de pressão (048)	EV	Sem
Vaso de pressão (051)	Sem	Sem
Vaso de pressão (054)	LP, EV	Sem
Vaso de pressão (056)	LP, PM	Zero
Esfera (060)	EV	Sem
Vaso de pressão (066)	EV	Sem
Vaso de pressão (068)	Sem	Sem
Vaso de pressão (069)	Sem	Sem
Vaso de pressão (070)	Sem	Sem
Vaso de pressão (071)	Sem	Sem
Vaso de pressão (075)	EV	Sem
Vaso de pressão (077)	Sem	Sem
Vaso de pressão (078)	Sem	Sem
Tubulação (079)	Sem	Sem
Vaso de pressão (080)	Sem	Sem
Vaso de pressão (081)	Sem	Sem
Vaso de pressão (082)	EV, US, PM	Descontinuidades
Vaso de pressão (083)	EV	Sem
Vaso de pressão (084)	Sem	Sem

Vaso de pressão (085)	EV	Sem
Tubulação (098)	US	Trinca, FF, FP
Vaso de pressão (125)	EV	Sem
Vaso de pressão (131)	EV	Sem
Reator (135)	EV, PM, LP	Zero
Reator (137)	EV, LP, PM	Zero
Caldeira (143)	EV, PM, LP	Trinca 15 mm de comprimento
Trocador de calor (164)	EV, US	Zero
Tubulação (1221)	LP	TR
Tubulação (1227)	Sem	Sem
Tubulação (1229)	Sem	Sem
Tubulação (1230)	Sem	Sem
Esfera (1237)	PM, US	Zero
Esfera (1238)	PM, EV	Zero
Esfera (1240)	PM	FF

A figura 4.19 apresenta o resultado geral por grau de classificação.

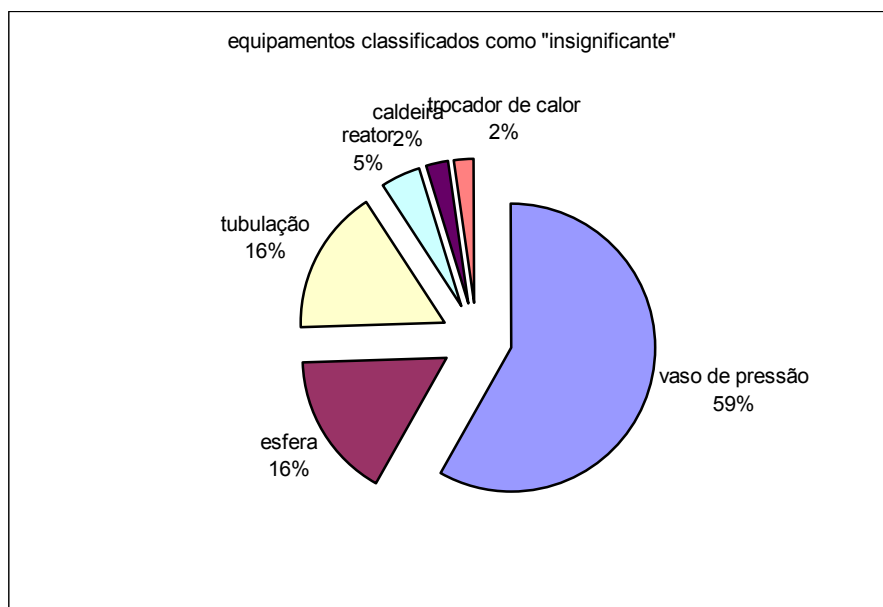


Fig. 4.16 – Distribuição percentual de equipamentos ensaiados por emissão acústica classificados como “insignificante”.

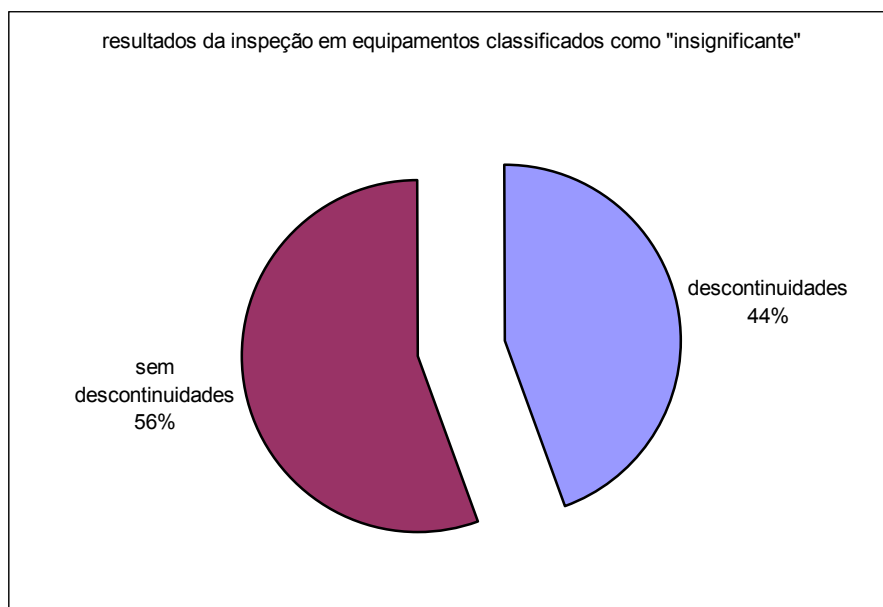


Fig. 4.17 – Percentual de equipamentos classificados como “insignificante” que apresentaram ou não apresentaram descontinuidades.

A inflexão percebida para a classe “B” pode ser explicada pela pequena quantidade de inspeção complementar realizada nestes equipamentos.

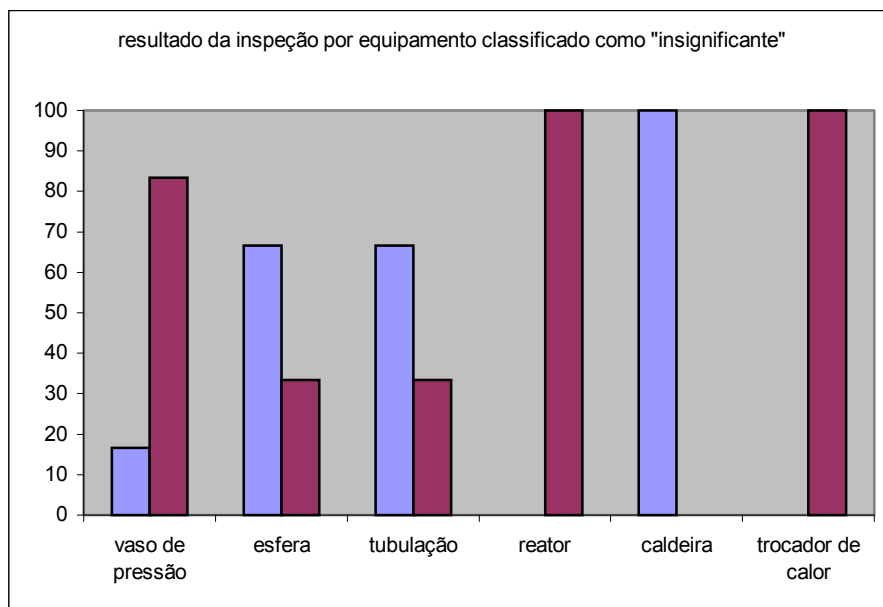


Fig. 4.18 – Resultado percentual por equipamento classificado como “não significativo” que apresentaram descontinuidades.

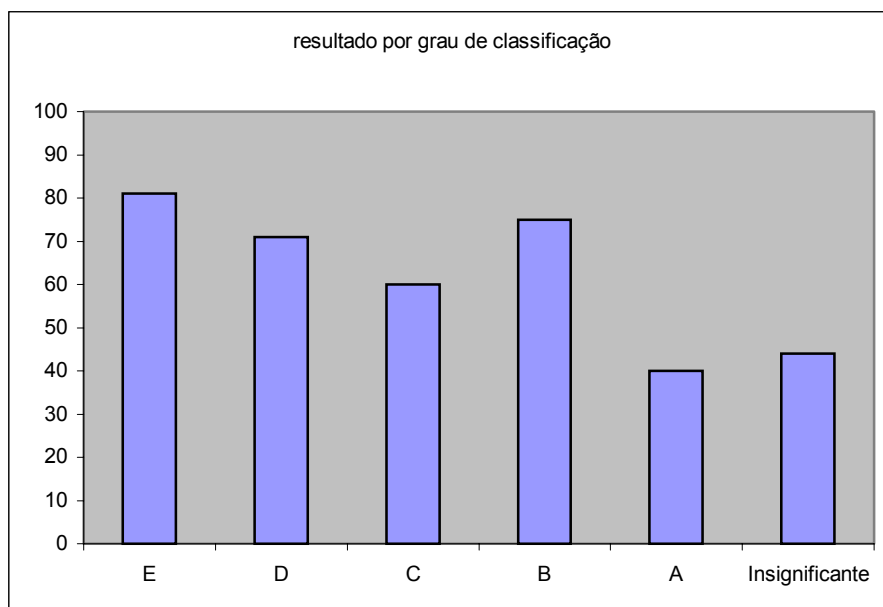


Fig. 4.19 – Resultado por grau de classificação dos equipamentos inspecionados.

A figura 4.20 apresenta o resultado da comparação entre o critério MONPAC e Mecânica da Fratura.

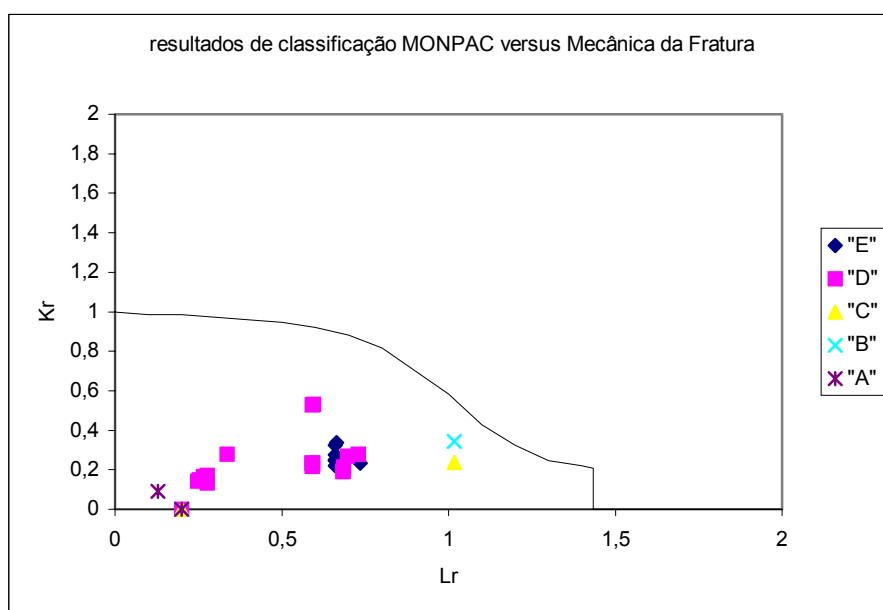


Fig. 4.20 – Comparação critério MONPAC e Mecânica da Fratura.

Não existe uma separação clara entre os lugares geométricos dos graus mais críticos (“E” e “D”) e os menos críticos (“A”, “B” e “C”). Isto também pode ser explicado pela

pequena quantidade de valores disponíveis para os equipamentos classificados como “C”, “B” ou “A”.

A tabela 4.18 apresenta quantidade de equipamentos analisados qualitativamente. Pode-se notar que apenas as categorias: esfera e vaso de pressão, apresentaram equipamentos em todas as classificações do critério de análise MONPAC.

Tabela 4.18

Equipamentos analisados qualitativamente

	esfera	coluna	vaso de pressão	reator	trocador de calor	tubulação	coletor	caldeira
Área E	1	6	6	1	1	1		
Área D	5		10	7			1	
Área C	4	1	7	2	1			
Área B	3		1					
Área A	5	1	4					
Insignificante	6		6	2	1	3		1

A análise qualitativa por categoria de equipamento e classificação MONPAC apresenta o resultado descrito na tabela 4.19.

Tabela 4.19

Resultado percentual da presença de descontinuidades por tipo de equipamento e classificação MONPAC

	esfera	coluna	vaso de pressão	reator	trocador de calor	tubulação	coletor	caldeira
Área E	100	67	100	100	100	0		
Área D	80		70	86			100	
Área C	100	0	57	50	0			
Área B	100		0					
Área A	60	0	25					
Insignificante	67		17	0	0	67		100

As figuras 4.21a e 4.21b apresentam o resultado por grau de classificação para as categorias esfera e vaso de pressão, respectivamente. Para equipamentos da categoria vasos de pressão existe uma relação entre classificação do ensaio de emissão acústica e presença de descontinuidades.

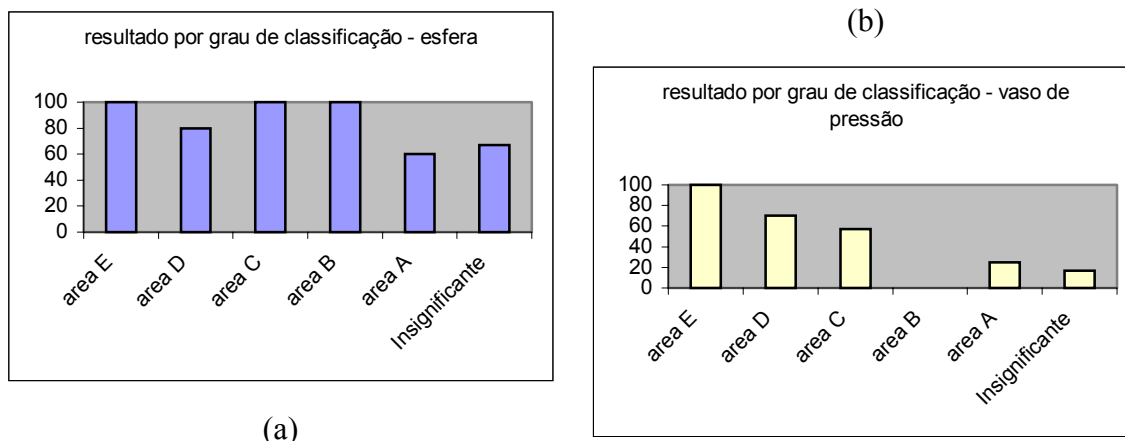


Fig. 4.21 – Resultado por grau de classificação dos equipamentos inspecionados: (a) esferas; (b) vasos de pressão.

A figura 4.22 apresenta o resultado da comparação entre o critério MONPAC e Mecânica da Fratura para equipamentos da categoria esfera. A figura 4.23 apresenta o resultado da comparação entre o critério MONPAC e Mecânica da Fratura para equipamentos da categoria vasos de pressão. Pode-se notar que os dados obtidos na análise das descontinuidades em vasos de pressão apresentam um padrão mais próximo do esperado, ou seja, a crescente gradação de criticidade de “A” até “E” também se faz presente quando os conceitos de mecânica da fratura são utilizados.

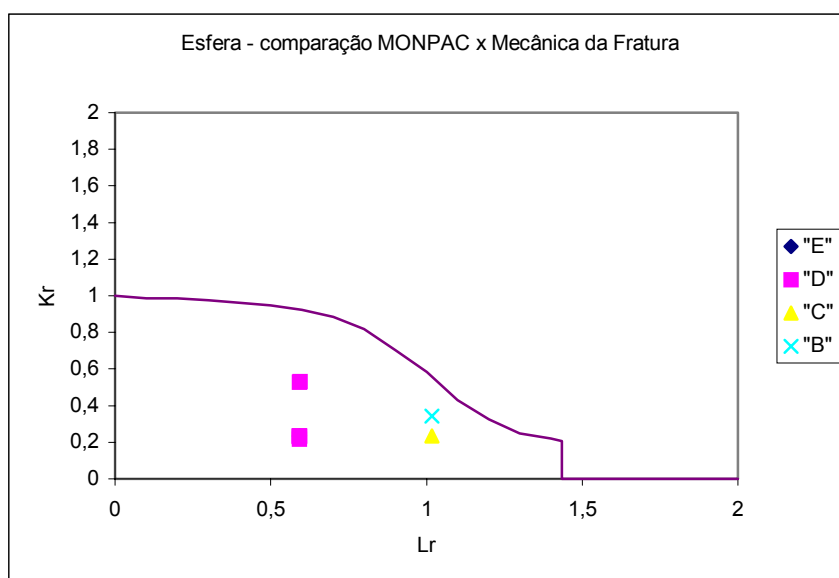


Fig. 4.22 – Comparação critério MONPAC e Mecânica da Fratura para equipamentos da categoria esfera.

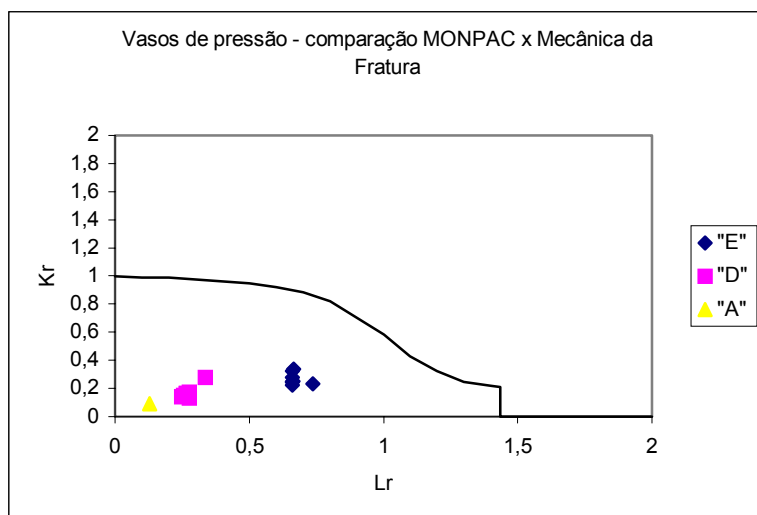


Fig. 4.23 – Comparação critério MONPAC e Mecânica da Fratura para equipamentos da categoria vasos de pressão.

Conclusões

Os dados coletados em 210 ensaios de emissão acústica realizados no sistema PETROBRAS analisados e apresentados neste relatório permitiram o estabelecimento de conclusões e recomendações.

Foram analisados 157 equipamentos (53 equipamentos eram tanques de armazenamento). Dos 157 equipamentos analisados, apenas nove equipamentos tiveram suas descontinuidades dimensionadas em duas (comprimento e profundidade) ou três direções (comprimento, altura e profundidade). Estes nove equipamentos continham 31 descontinuidades.

As análises efetuadas e apresentadas no capítulo 4 permitem concluir que:

- existe uma relação entre o critério MONPAC e a presença de descontinuidades nos equipamentos ensaiados, ou seja, quase todos os equipamentos classificados como “E” apresentam descontinuidades enquanto que menos da metade dos equipamentos classificados como “A” apresentaram descontinuidades;
- a análise de mecânica da fratura apresentou incongruências em relação ao estabelecido no item anterior. Não existe uma separação clara entre as classificações MONPAC. A pequena quantidade de dados para a realização desta análise, principalmente nas categorias “B” e “C” podem ser a causa deste resultado;
- os equipamentos das categorias esfera e vaso de pressão apresentam resultados em todas as classificações MONPAC, sendo assim, fornecem o conjunto para análise de dados;
- equipamentos do tipo esfera não apresentaram diferenças significativas da presença de descontinuidades quando comparados com o resultado do critério MONPAC;
- equipamentos do tipo vaso de pressão apresentaram diferenças significativas da presença de descontinuidades quando correlacionados com a classificação do critério MONPAC, ou seja, todos os equipamentos classificados como “E” continham descontinuidades e apenas $\frac{1}{4}$ dos equipamentos classificados como “A” continham descontinuidades;

- a análise de mecânica da fratura para os equipamentos do tipo esfera apresenta equipamentos classificados como “B” e “C” com maior criticidade que os equipamentos classificados como “D” e “E”, este resultado não era esperado, porém deve-se ressaltar a pequena quantidade de dados para a análise dos equipamentos classificados como “B” e “C”;
- a análise de mecânica da fratura para os equipamentos do tipo vaso de pressão apresenta aumento de criticidade das descontinuidades quando comparada com a classificação MONPAC, ou seja, descontinuidades dimensionadas em equipamentos classificados como “E” pelo critério MONPAC são mais críticas que as descontinuidades detectadas e dimensionadas em equipamentos classificados como “A” pelo critério MONPAC;
- em função do exposto acima conclui-se que o ensaio de emissão acústica apresenta melhor resultado na inspeção de vasos de pressão;
- a técnica de inspeção com emissão acústica pode ser empregada na seleção de equipamentos e regiões para inspeção não destrutiva complementar.

Recomenda-se:

- aumentar a quantidade de equipamentos do banco de dados;
- a inspeção não destrutiva complementar deve fornecer todas as dimensões das descontinuidades detectadas nos equipamentos inspecionados após o ensaio de emissão acústica. Estas dimensões são necessárias para o estabelecimento da correlação entre mecânica da fratura e emissão acústica;

Referências bibliográficas

Aguiar, Juliano, Tesser, Juliano, Relatório sobre visitas às unidades da PETROBRAS, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Mestrado em Engenharia e Ciências de Materiais, 2002.

Allevato, Cláudio (1979), A técnica de inspeção por emissão acústica, Relatório Interno PETROBRAS/CENPES/DIQUIM BPEN 620.112 /A434, 61 p, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Allevato, Cláudio (1980), A técnica de inspeção por emissão acústica, PETROBRAS Boletim Técnico, v. 23, n. 3, p. 285-310, Julho/Setembro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Allevato, Cláudio (1983), Ensaio por emissão acústica em equipamento da Oxiteno do Nordeste S.A, Relatório Interno PETROBRAS/CENPES/DILOT MCT 650-03195, 4 p, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Allevato, Cláudio e Carneval, Ricardo de O. (1982), A técnica de inspeção por emissão acústica, anais III Seminário Nacional de Ensaios Não-Destrutivos, ABENDE, 124-180, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Allevato, Cláudio e Ramos, Marcio de Almeida (1980), Aplicações da técnica de emissão acústica em ensaios de corrosão, anais VII Seminário Nacional de Corrosão, 258-265, ABRACO, Rio de Janeiro. RJ, Brasil.

Blackburn, P. R. *AE Re-testing of cylinders for transportation of compressed gases*, Materials Evaluation, v. 46, nº 2, Fevereiro 1988.

Breckenridge, Franklin R., Tschiegg, Carl E. e Greenspan, Martin, *Acoustic emission: some applications of Lamb's problem*, **Journal of Acoustic Society American**, vol.57, n.3, março 1975

Camerini, Cláudio Soligo e Castelo Branco, Paulo Pinheiro (1989), anais IX Congresso Anual de Ensaio Não Destrutivo, ABENDE, 103-119, São Paulo, SP.

Camerini, Cláudio Soligo, Feres Filho, Pedro, Augusto, Ricardo I. M. e Soares, Sergio Damasceno (1988), anais VIII Seminário Nacional de Ensaio Não-Destrutivo, 161-174, São Paulo, SP, Brasil.

Camerini, Cláudio Soligo, Sant'Anna, Antonio Cláudio e Soares, Sergio Damasceno (1986), anais 8ª Mesa Redonda de Materiais, Inspeção de Equipamentos e Controle de Corrosão, 19 páginas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Camerini, Cláudio Soligo, Sant'Anna, Antonio Cláudio Correa Meyer e Soares, Sergio Damasceno (1987), Avaliação da técnica de emissão acústica, Relatório Interno PETROBRAS/CENPES/DILOT MCT 650-09652, 38 p, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Camerini, Cláudio Soligo e Soares, Sergio Damasceno (1989), Ensaio com emissão acústica em vaso de pressão até a ruptura e em junta tubular sob regime de fadiga, anais Mesa Redonda de Materiais, Inspeção de Equipamentos e Controle de Corrosão, 18 p, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Camerini, Cláudio Soligo, Soares, Sergio Damasceno e Castello Branco, Paulo Pinheiro de (1990), Desenvolvimento da técnica de emissão acústica, Relatório Interno PETROBRAS/CENPES/SEMEC MCT 650-13094, 11 p, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Camerini, Claudio Soligo, Soares, Sergio Damasceno e Rebello, João Marcos A. (1992), Relationship between acoustic emission and CTDO test for a structural steel, anais 13th World Conference on Non-Destructive Testing, 24-28, São Paulo, SP, Brasil.

Carneval, Ricardo de Oliveira, Soares, Sergio Damasceno e Decaro Filho, Paulo Roberto (1996), Inspeção Não-destrutiva em vaso de pressão V-2058 (REPLAN) retirado de operação pela presença de danos por hidrogênio, Relatório Interno PETROBRAS/CENPES/DILOT/SEMEC MCT 650-17509, 54 p, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Castelo Branco, Paulo Pinheiro e Camerini, Cláudio Soligo (1989), anais 1º Seminário Latino-americano de Inspeção de Equipamentos, 404-412, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Chelladurai, T., Sankaranarayanan, A.S. e Purushothaman, K.K., *Advances in structural integrity evaluation and residual strenght prediction of pressure vessels using acoustic emission technique*, **15 WCNDT**, Roma, Italia, 2000

Deuster, G., Sklarczyk C. e Waschkie, E., *Detection and analysis of defects in reactor pressure components by location and interpretation of acoustic emission sources*, **Nuclear Engineering and Design** **129**, pp. 185-190, 1991, North-Holland.

Donato, Guilherme Victor Peixoto, Avaliação de descontinuidades dos reatores D-2401 A/B - RLAM (2000), Relatório Interno PETROBRAS/CENPES/DIPILOT/SEMEC MCT 650-22081, 32 p, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Donato, Guilherme Victor Peixoto e Feres Filho, Pedro (2000), Avaliação de integridade de esferas de GLP, utilizando o ensaio de emissão acústica e a mecânica da fratura, anais XIX Congresso Nacional de Ensaios Não-destrutivos, ABENDE, 97-102, São Paulo, SP, Brasil.

Drouillard, Thomas F. (1996), A history of acoustic emission, Journal of Acoustic Emission, v 14, n 1, 1-33.

Farias, Francisco Mourão, Siqueira, Hélio Barros de, e Allevato, Cláudio (1983), Monitoração estrutural de plataformas "offshore", Relatório Interno PETROBRAS/CENPES/DIPILOT/SEMEC MCT 650-03621, 71 p, Rio de Janeiro, 1983.

Feres Filho, Pedro e Carvalho, Nestor F. (1986), anais XIV Seminário de Inspeção de Equipamentos, IBP, 88-107, Porto Alegre, RS, Brasil.

Freitas, Gustavo Adolfo Cavalcanti e Pessoa, Guilherme Alves (1999), Avaliação da linha principal do anel de incêndio da plataforma PPE-1A, 34 p, utilizando emissão

acústica, Relatório Interno PETROBRAS/CENPES/DILOT/SEMEC MCT 650-21378, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Graham, L. J. e Alers, G.A., *Frequency spectra of acoustic emissions generated by deforming metals and ceramics*, **Ultrasonic Symposium Proceedings IEEE**.

Hayashi, Yasuhisa e Takemoto, Mikio, *Development of an AE source inversion system and its application to the monitoring*, **Corrosion Engineering 39**.

Jones, R. H., Friesel, M. A. e Gerberich, W. W., *Acoustic emission from intergranular subcritical crack growth*, **Metallurgical Transaction A**, volume 20A, pp 637-648, abril 1989.

López, Rafael J., *Emisión acústica em el proceso de corrosión bajo tensión*, **E-GLEA-1**, Buenos Aires, Argentina, 1999.

Nikulin, S.A., Khanzhin, V.G., e Rojnov, A.B., *Application of acoustic emission method for materials, processes and technologies monitoring*, **15 WCNDT**, Roma, Italia, 2000

Ohira, Takanori e Pao, Yih-Hsing, *Quantitative characterization of microcracking in A533B steel by acoustic*, **Metallurgical Transactions A**.

Ono, Kanji e Huang, Qixin, *Pattern recognition analysis of acoustic emission signals, progress in acoustic emission VII, Correlation Analysis*

Rodrigues Filho, Arlindo, Camerini, Cláudio Soligo e Soares, Sergio Damasceno (1994), Desenvolvimento de dispositivo para teste de válvulas em operação na REDUC, Relatório Interno PETROBRAS/CENPES/SEMEC MCT 650-15928, 49 p, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Soares, Sergio Damasceno, Carneval, Ricardo de Oliveira e Decaro Filho, Paulo Roberto (1995), Redução da duração do teste de qualificação de SSC por meio da monitoração por emissão acústica, Relatório Interno

PETROBRAS/CENPES/DILOT/SEMEC MCT 650-15799.5, 10 p, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Soares, Sergio Damasceno e Carneval, Ricardo de Oliveira (1999), Inspeção ultrasônica dos TQ-14 A/B/C da REGAP submetidos a teste hidrostático monitorado por emissão acústica, Relatório Interno PETROBRAS/CENPES/DILOT/SEMEC MCT 650-20967, 43 p, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Soares, Sergio Damasceno, Decaro Filho, Paulo Roberto e Carneval, Ricardo de Oliveira (1998), Ensaaios não-destrutivos realizados no vaso V-2058 após teste hidrostático monitorado por emissão acústica, Relatório Interno PETROBRAS/CENPES/DILOT/SEMEC MCT 650-18944, 17 p, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Takatsubo, Junji e Kishi, Teruo, *Quantitative acoustic emission source characterization of microcrackings in steel*, **Research in Nondestructive Evaluation** (1990) 1:219-233

Ternowchek, Samuel J., *Railroad tank car integrity testing using acoustic emission techniques*, **International Chemical and Petroleum Industry Inspection Technology VI Topical**, American Society for Nondestructive Testing, Houston, 1999

Ternowchek, Samuel J. e Calva, Mauricio V., *Acoustic Emission and ultrasonic testing of dent damaged buried pipeline*, **International Chemical and Petroleum Industry Inspection Technology VI Topical**, American Society for Nondestructive Testing, Houston, 1999

van de Loo, P. J. e Herrmann, B., *How reliable is acoustic emission (AE) tank testing? The quantified results of an AE usergroup correlation study!*, **Proceedings of 7th European Conference on Nondestructive Testing**, Dinamarca, 1998.