

CORRELAÇÕES ENTRE EMISSÃO ACÚSTICA DE DEFEITOS E PARÂMETROS DE
MECÂNICA DA FRATURA NA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE
EQUIPAMENTOS PRESSURIZADOS

Sergio Damasceno Soares

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, D.Sc.

Prof. Fernando Luiz Bastian, Ph.D.

Prof. José Luiz de França Freire, Ph.D.

Prof. Telmo Roberto Strohaecker, D.Sc.

Dr. Eduardo Hippert Júnior, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2008

SOARES, SERGIO DAMASCENO

Correlações entre emissão acústica de defeitos e parâmetros de mecânica da fratura na avaliação da integridade de equipamentos pressurizados [Rio de Janeiro] 2008

XXII, 261 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2008)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Emissão Acústica
2. Mecânica da Fratura
3. Ensaios Não Destrutivos

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Para Helga e Pedro,

Mais uma etapa cumprida, muito obrigado pelo amor, carinho, dedicação e principalmente compreensão durante esta jornada.

Agradecimentos

Este trabalho não seria possível sem:

- A PETROBRAS, pela viabilização do trabalho,
- A UFRJ, por me aceitar no programa de doutoramento;
- O Professor João Marcos, por me aceitar como aluno no programa;
- O Amigo João Marcos, pela paciência e dedicação como orientador, professor e companheiro de pesquisa;
- Os gerentes do SEMEC (Valter Rocha dos Santos e Aloísio Félix da Nóbrega) e agora TMEC (Carlos Soligo Camerini, César José Moraes Del Vecchio e Fábio Jobim Sartori) por acreditarem;
- Os companheiros do LaboEND, Romeu, Antonio, Marcio e Ivan, pelo espírito fraterno durante o período de aulas e pelas dicas durante o trabalho experimental;
- Os amigos do Grupo de Inspeção, Agildo, Gustavo Pinto e Juliana Garcia, pelo apoio incondicional e suporte quando as “coisas esquentavam”;
- O amigo de longa data, Cláudio Camerini pela incessante crítica a forma de realização do ensaio de emissão acústica em escala industrial;
- Os amigos do TMEC, Guilherme Donato, Eduardo Hippert, José Cláudio e Alexandre Pope, na ajuda na incipiente trajetória pelos caminhos da mecânica da fratura;
- Os companheiros da PASA, Pedro Feres, Marco Luzio, Jorge Pereira, Amauri, Hermann, Andréas e Mark Carlos pela ajuda na manipulação dos dados de emissão acústica;
- O amigo Jose Cláudio Guimarães Teixeira, companheiro de discussão técnica e papo, aprendi muito com ele sobre o trabalho e como viver;
- Aos amigos acústicos Nestor Moura e Pedro Feres, companheiros de vários ensaios e testes que deram certo e que também deram errado;
- A companheirada do TMEC por me aturarem;
- Helga e Pedro, eles sabem como isto foi difícil;
- A turma da UFRGS pelos ensaios preliminares antes deste trabalho;
- O Professor Ronaldo Vieira da PUC-RJ pela execução dos testes hidrostáticos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.).

CORRELAÇÕES ENTRE EMISSÃO ACÚSTICA DE DEFEITOS E
PARÂMETROS DE MECÂNICA DA FRATURA NA AVALIAÇÃO DA
INTEGRIDADE DE EQUIPAMENTOS PRESSURIZADOS

Sergio Damasceno Soares

Março/2008

Orientador: João Marcos Alcoforado Rebello

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

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: estes sinais são chamados de ondas de emissão acústica. Neste trabalho foi desenvolvida uma relação direta entre o ensaio de emissão acústica e os parâmetros de mecânica da fratura para descontinuidades presentes em segmentos de dutos utilizados para o transporte de petróleo e derivados. Os sinais de emissão acústica foram coletados em monitorações de testes hidrostáticos em segmentos de dutos com descontinuidades inseridas artificialmente e após processamento foram sincronizados com as medições da propagação das descontinuidades e a pressão interna aplicada, para obter uma correlação com o parâmetro de mecânica da fratura K_I . Uma equação foi definida para a estimativa de K_I em função dos sinais de emissão acústica. Esta estimativa apresenta índice de correlação próximo a 90%.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor Science (D.Sc)

RELATIONSHIP BETWEEN ACOUSTIC EMISSION OF DEFECTS AND
FRACTURE MECHANICS PARAMETERS TO INTEGRITY EVALUATION OF
PRESSURIZED EQUIPMENTS

Sergio Damasceno Soares

March/2008

Advisor: João Marcos Alcoforado Rebello

Department: Materials and Metallurgical Engineering

Small changes that occur in materials when the fracture process begins generate, in lower or higher grade, an amount of acoustic waves, from energy release associated with this mechanism, this signals are identified as acoustic emission waves. In this work was developed a direct relationship between acoustic emission exam and fracture mechanics parameters for discontinuities in pipeline segments used for transport of oil and derivatives. Acoustic emission signals were obtained during hydrostatic tests in pipelines samples with artificially inserted discontinuities and after processing it were synchronized with discontinuities propagation measurement. Signals collected in tests, after processing by means of filtering, summations and specific procedures, were synchronized with measurements of discontinuities propagation and applied internal pressure, to obtain a correlation with fracture mechanics parameter K_I . An equation was established to estimate K_I as a function of acoustic emission signals. This estimative shows a correlation index close to 90%.

ÍNDICE

I. INTRODUÇÃO	1
II. REVISÃO TEÓRICA	4
II.1 Introdução ao método de inspeção com a técnica de emissão acústica	4
II.2 Características do método de inspeção com a técnica de emissão acústica	6
II.3 Atenuação de sinais de emissão acústica	7
II.4 Velocidade de propagação	8
II.5 Tipos de ondas acústicas nos materiais	10
II.6 Sensores para detecção de sinais de emissão acústica	13
II.7 Unidade de medida de amplitude	15
II.8 Características da onda de emissão acústica	16
II.9 Técnicas de localização de fontes de emissão acústica	23
III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
III.1 Introdução	28
III.2 Garantia da mesma sensibilidade em todos os testes de emissão acústica	28
III.3 Emissão acústica aplicada a problemas de corrosão	29
III.4 Emissão acústica aplicada à detecção de descontinuidades em equipamentos submetidos à carregamentos com pressão interna	41
III.5 Emissão acústica aplicada à integridade estrutural	46
III.6 Considerações finais	84
IV. MATERIAIS E MÉTODOS	88
IV.1 Introdução	88
IV.2 Corpos de prova	88
IV.3 Material	92
IV.4 Sistema de emissão acústica	98
IV.5 Sistema de ultra-som	100
IV.6 Testes hidrostáticos	102

IV.7 Sincronização dos dados	105
IV.8 Cálculo dos valores de mecânica da fratura	106
IV.9 Cálculo das estatísticas	106
IV.10 Pesquisa e aplicação das equações	106
IV.11 Aplicações em casos reais	107
 V. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	 108
V.1 Corpo de prova Tubo 03	108
V.1.1 Resultados do ensaio de emissão acústica	117
V.1.2 Resultados obtidos com o critério MONPAC	123
V.1.3 Análise com localização exata de fontes de emissão acústica	127
V.2 Corpo de prova Tubo 02	129
V.2.1 Resultados do ensaio de emissão acústica	133
V.2.2 Análise com o critério MONPAC	139
V.2.3 Análise com localização exata de fontes de emissão acústica	144
V.3 Corpo de prova Tubo 01	145
V.3.1 Resultados do ensaio de emissão acústica	150
V.3.2 Análise com o critério MONPAC	156
V.3.3 Análise com localização exata de fontes de emissão acústica	160
V.4 Ajuste de equações	160
V.4.1 Critério MONPAC	160
V.4.2 Sinais de emissão acústica	164
V.5 Aplicação em casos reais	186
V.5.1 Conjunto de dados 01	187
V.5.2 Conjunto de dados 02	190
V.5.3 Conjunto de dados 03	193
V.5.4 Conjunto de dados 04	196
V.5.5 Conjunto de dados 05	199
V.5.6 Conjunto de dados 06	202
V.5.7 Conjunto de dados 07	205
V.5.8 Conjunto de dados 08	208

V.5.9 Conjunto de dados 09	211
V.6 Considerações finais	215
VI. CONCLUSÕES	222
VII. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS	224
Referências bibliográficas	225
Anexo – Trabalhos publicados	232

Índice de figuras

II. REVISÃO TEÓRICA

Fig. 2.1 – Características da emissão acústica	5
Fig. 2.2 – Fenômenos de reflexão nas fronteiras do material que contém a fonte de emissão acústica (L, onda longitudinal; T, onda transversal; e S, onda superficial)	6
Fig. 2.3 - Movimento de uma partícula no material em função do tempo	9
Fig. 2.4 - Movimento instantâneo	10
Fig. 2.5 - Onda longitudinal	11
Fig. 2.6 - Onda transversal	11
Fig. 2.7 - Onda superficial	11
Fig. 2.8 – Curva de calibração de sensor de emissão acústica, cortesia da <i>Physical Acoustics South America</i> .	14
Fig. 2.9 – Comprimento de banda de frequência.	15
Fig. 2.10 – Sinal ideal de emissão acústica conforme a equação 4.4.	17
Fig. 2.11 – Determinação do início de um sinal (tempo de chegada) de emissão acústica. Tempo de chegada = 3,14.	19
Fig. 2.12 – Determinação da máxima amplitude e do número de contagens de um sinal de emissão acústica. Amplitude = 44,23 dB, Contagens = 1	19
Fig. 2.13 – Detecção de um sinal de emissão acústica.	20
Fig. 2.14 – Detecção de um sinal de emissão acústica. Representação em módulo do sinal apresentado na figura 2.13.	20
Fig. 2.15 – Detecção de um sinal de emissão acústica. Tempo de chegada (figura 2.11) = 3,14, amplitude = 118,85 dB, contagens = 5, tempo de subida = 2,35.	20
Fig. 2.16 – Término da detecção de um sinal de emissão acústica. Tempo de chegada (figura 2.11) = 3,14, amplitude (figura 2.15) = 118,85 dB, contagens = 12, tempo de subida (figura 2.15) = 2,35, duração do sinal = 11,69.	20
Fig. 2.17 – Energia do sinal acústica apresentado na figura 2.17.	23
Fig. 2.18 – Localização linear de fontes de emissão acústica.	24

Fig. 2.19 – Localização de fonte de emissão acústica com dois sensores em um plano infinito.	25
Fig. 2.20 – Determinação da localização da fonte de emissão acústica com três sensores em um plano infinito.	27

III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Fig. 3.1 – Dispositivo para estudo de fenômenos de corrosão com a técnica de emissão acústica onde: (1) becher; (2) corpo de prova; (3) sensor; (4) pré-amplificador; (5) analisador; (6) tubo de raios catódicos; e, (7) registrador.	30
Fig. 3.2 – Fontes de emissão acústica durante os processos de corrosão, trincamento por corrosão sob tensão e corrosão fadiga.	31
Fig. 3.3 – Corpos de prova antes do teste.	33
Fig. 3.4 – Corpos de prova em solução de água salgada à 3%.	34
Fig. 3.5 – Descontinuidades inseridas em tanque de armazenamento.	35
Fig. 3.6 – Gráfico sinais (<i>hits</i>) <i>versus</i> tempo de ensaio.	36
Fig. 3.7 – Gráfico amplitude <i>versus</i> tempo de ensaio.	36
Fig. 3.8 – Gráfico energia <i>versus</i> tempo de ensaio.	37
Fig. 3.9 – Formas de onda de sinais de emissão acústica detectados durante vazamento de gás nas pressões 0,10 MPa, 0,20 MPa e 0,30 MPa em furo com diâmetro 0,3 mm em espessura de parede 1,00 mm.	39
Fig. 3.10 – Gráficos pressão de vazamento <i>versus</i> amplitude: (a) diâmetro 0,3 mm; (b) diâmetro 0,5 mm; (c) furo em degrau diâmetro 0,2 mm; e (d) furo em degrau diâmetro 0,8 mm.	40
Fig. 3.11 – Espectro de frequência de formas de onda detectadas na pressão 0,30 MPa dos sinais da figura 3.10.	41
Fig. 3.12 – Gráfico de localização linear de monitoramento de ensaio de fadiga em cilindro de armazenamento de gases. Eixos: horizontal, localização linear; e, vertical, atividade de emissão acústica (quantidade de sinais).	43
Fig. 3.13 – Gráficos de somatório de contagens (atividade) e pressão <i>versus</i> tempo para monitoração de teste hidrostático de motor de foguete aeroespacial: (a) primeiro incremento de atividade, pressão 0,8 MPa; e, (b) segundo	44

incremento de atividade, pressão 2,9 MPa.

Fig. 3.14 – Trincas na pintura na superfície externa do vaso de pressão em escala reduzida. A linha curva delimita a extremidade de um dos agrupamentos de sinais encontrados na análise dos dados de emissão acústica. 46

Fig. 3.15 – Gráficos de acompanhamento de testes de emissão acústica. 50

Fig. 3.16 – Fluxograma básico de aplicação da norma API 579. 53

Fig. 3.17 – Energia do sinal de emissão acústica e fator de intensificação de tensão em função do ciclo de fadiga para corpo de prova com 12 mm de espessura, para ciclos de fadiga com 1, 2 e 4 Hz. 56

Fig. 3.18 – Exemplo típico de gráfico do critério MONPAC. 59

Fig. 3.19 – Fluxograma de avaliação de sinais de emissão acústica segundo a norma JIS Z 2342-2002. 61

Fig. 3.20 – Classificação do tipo de agrupamento de sinais segundo a norma JIS Z 2342-2002. 62

Fig. 3.21 – Matriz de definição da classe dos agrupamento de sinais. 63

Fig. 3.22 – Corpos de prova tubulares para teste hidrostático, diâmetro 20 polegadas e comprimento aproximado 3000 mm. 65

Fig. 3.23 – Técnica ultra-sônica para monitoração da propagação das descontinuidades inseridas nos corpos de prova, onde: α , ângulo do feixe ultra-sônico; d, distância projetada entre o ponto de saída do feixe ultra-sônico do transdutor e a descontinuidade; PS, percurso sônico entre o ponto de saída do feixe ultra-sônico do transdutor e a descontinuidade; e, p, profundidade da descontinuidade. 65

Fig. 3.24 – Gráfico de localização linear dos sinais de emissão acústica. Abcissa: eixo longitudinal do corpo de prova; ordenada: número de eventos. 67

Fig. 3.25 – Corpo de prova após falha catastrófica em uma das extremidades. 67

Fig. 3.26 – Gráfico profundidade da trinca *versus* pressão, para o corpo de prova com descontinuidade 7 mm x 140 mm. 68

Fig. 3.27 – Gráficos de J (pressão interna) e J aplicado (descontinuidades). 68

Fig. 3.28 – (a) Gráfico carga *versus* deflexão, e (b) gráfico energia de emissão acústica *versus* tempo; para corpos de prova de aço AS 508-1 com pré-trinca. 72

Fig. 3.29 – Gráfico comprimento da trinca e contagens acumuladas de emissão acústica <i>versus</i> número de ciclos para o corpo de prova AL1#1.	73
Fig. 3.30 – Gráfico comprimento da trinca e contagens acumuladas de emissão acústica <i>versus</i> número de ciclos para o corpo de prova AL2#2.	74
Fig. 3.31 – Gráfico comprimento da trinca e contagens acumuladas de emissão acústica <i>versus</i> número de ciclos para o corpo de prova ST#4.	74
Fig. 3.32 – Gráfico taxa de crescimento da trinca e taxa de contagens <i>versus</i> $K_{\max}$ para o corpo de prova AL1#1.	75
Fig. 3.33 – Gráfico taxa de crescimento da trinca e taxa de contagens <i>versus</i> $K_{\max}$ para o corpo de prova AL2#2.	75
Fig. 3.34 – Gráfico sinais acumulados de emissão acústica e $K_{\max}$ <i>versus</i> número de ciclos para o corpo de prova AL1#1.	76
Fig. 3.35 – Gráfico sinais acumulados de emissão acústica e $K_{\max}$ <i>versus</i> número de ciclos para o corpo de prova AL2#2.	76
Fig. 3.36 – Gráfico sinais acumulados de emissão acústica e $K_{\max}$ <i>versus</i> número de ciclos para o corpo de prova ST#4.	77
Fig. 3.37 – Gráfico energia acumulada de emissão acústica e energia acumulada de fratura <i>versus</i> número de ciclos para o corpo de prova AL1#1.	77
Fig. 3.38 – Gráfico energia acumulada de emissão acústica e energia acumulada de fratura <i>versus</i> número de ciclos para o corpo de prova AL2#2.	78
Fig. 3.39 – Gráfico energia acumulada de emissão acústica e energia acumulada de fratura <i>versus</i> número de ciclos para o corpo de prova ST#4.	78
Fig. 3.40 – Comparação entre os resultados do critério MONPAC e os resultados de mecânica da fratura.	83
Fig. 3.41 – Comparação entre os resultados do critério MONPAC e os resultados de mecânica da fratura para equipamentos do tipo vasos de pressão.	83

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

Fig. 4.1 – Corpo de prova preparado para a realização do teste hidrostático	89
Fig. 4.2 – Desenho esquemático da seção transversal das descontinuidades inseridas por eletroerosão	90

Fig. 4.3 – Carregamento imposto aos corpos de prova nas regiões contendo descontinuidades	96
Fig. 4.4 – Determinação do ângulo Φ	97
Fig. 4.5 – Gráfico de calibração de sensor	100
Fig. 4.6 – Princípios da técnica ToFD na inspeção de descontinuidades, formação dos sinais	101

V. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Fig. 5.1 – Localização das descontinuidades no corpo de prova “tubo 03”	109
Fig. 5.2 – Curva de pressurização aplicada ao corpo de prova “tubo 03”	110
Fig. 5.3 – Medição da propagação da descontinuidade MBTG inserida no corpo de prova tubo 03	112
Fig. 5.4 – Gráfico K_I <i>versus</i> tempo de ensaio para o corpo de prova tubo 03, descontinuidade MBTG	114
Fig. 5.5 – Diagrama FAD para as descontinuidades analisadas no corpo de prova Tubo 03.	116
Fig. 5.6 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> tempo de subida para os sinais detectados no tubo 03. A seta representa o início da propagação da descontinuidade MBTG	118
Fig. 5.7 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> contagem para os sinais detectados no tubo 03. A seta representa o início da propagação da descontinuidade MBTG	119
Fig. 5.8 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> energia para os sinais detectados no tubo 03. A seta indica o início da propagação da descontinuidade MBTG	120
Fig. 5.9 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> duração para os sinais detectados no tubo 03. A seta indica o início da propagação da descontinuidade MBTG	121
Fig. 5.10 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> amplitude para os sinais detectados no tubo 03. A seta indica o início da propagação da descontinuidade	122
Fig. 5.11 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> frequência média para os sinais detectados no tubo 03. A seta vertical indica o início da propagação da descontinuidade MBTG	123
Fig. 5.12 – Gráfico <i>Severity index versus</i> K_I , para o corpo de prova tubo 03	126

Fig. 5.13 – Gráfico do critério MONPAC para as descontinuidades analisadas no corpo de prova Tubo 03. Quadrado, descontinuidade MBTG, e; Círculo, descontinuidade MBTP.	127
Fig. 5.14 – Desenho do corpo de prova tubo 02 com a localização das descontinuidades	129
Fig. 5.15 – Curva de pressurização aplicada ao corpo de prova tubo 02	130
Fig. 5.16 – Diagrama FAD para as descontinuidades analisadas no corpo de prova Tubo 02.	133
Fig. 5.17 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> tempo de subida, detectado durante o teste hidrostático do corpo de prova tubo 02	134
Fig. 5.18 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> contagem, detectado durante o teste hidrostático do corpo de prova tubo 02	135
Fig. 5.19 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> energia, detectado durante o teste hidrostático do corpo de prova tubo 02	136
Fig. 5.20 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> duração, detectado durante o teste hidrostático do corpo de prova tubo 02	137
Fig. 5.21 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> amplitude, detectado durante o teste hidrostático do corpo de prova tubo 02	138
Fig. 5.22 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> frequência média, detectado durante o teste hidrostático do corpo de prova tubo 02	139
Fig. 5.23 – Gráfico <i>Severity index versus</i> K_I , para as descontinuidades inseridas no corpo de prova tubo 02	143
Fig. 5.24 – Gráfico do critério MONPAC para as descontinuidades analisadas no corpo de prova Tubo 02. Quadrado, descontinuidade MBTG, e; Círculo, descontinuidade MATG.	144
Fig. 5.25 – Desenho do corpo de prova tubo 01 com a localização das descontinuidades e sensores de emissão acústica	146
Fig. 5.26 – Curva de pressurização aplicada ao corpo de prova tubo 01	147
Fig. 5.27 – Diagrama FAD para as descontinuidades analisadas no corpo de prova Tubo 02.	150
Fig. 5.28 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> tempo de subida, para o corpo de	151

prova tubo 01	
Fig. 5.29 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> contagem, para o corpo de prova tubo 01	152
Fig. 5.30 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> energia, para o corpo de prova tubo 01	153
Fig. 5.31 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> duração, para o corpo de prova tubo 01	154
Fig. 5.32 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> amplitude, para o corpo de prova tubo 01	155
Fig. 5.33 – Gráfico tempo de ensaio <i>versus</i> frequência média, para o corpo de prova tubo 01	156
Fig. 5.34 – Gráfico <i>Severity index versus</i> K_I , para o corpo de prova tubo 01	159
Fig. 5.35 – Gráfico do critério MONPAC para as descontinuidades analisadas no corpo de prova Tubo 01. Quadrado, descontinuidade MBTG, e; Círculo, descontinuidade MATG, Cruz, descontinuidade MBTP.	160
Fig. 5.36 – Gráfico <i>Severity index versus</i> K_I , para os corpos de prova tubo 01, tubo 02 e tubo 03	161
Fig. 5.37 – Histograma dos valores de K_I calculados para os corpos de prova tubo 01, tubo 02 e tubo 03. K_I em MPa $\sqrt{m}$	162
Fig. 5.38 – Dados selecionados para o ajuste de equações considerando o histograma da figura 5.31 e utilizando dois dados não repetidos em cada bloco de K_I definido na tabela V.20.	163
Fig. 5.39 – Gráfico <i>Severity index versus</i> K_I , para os dados de todos os corpos de prova.	164
Fig. 5.40 – Gráfico tempo de subida (acumulado) <i>versus</i> K_I	166
Fig. 5.41 – Gráfico contagem (acumulado) <i>versus</i> K_I	168
Fig. 5.42 – Gráfico energia (acumulado) <i>versus</i> K_I	170
Fig. 5.43 – Gráfico duração (acumulado) <i>versus</i> K_I	171
Fig. 5.44 – Gráfico amplitude (acumulado) <i>versus</i> K_I	173
Fig. 5.45 – Gráfico frequência média (acumulado) <i>versus</i> K_I	174
Fig. 5.46 – Gráfico K_I calculado (equação IV.1) <i>versus</i> $K_{I(EA)}$ estimado por	177

emissão acústica (equação V.3).

Fig. 5.47 – Gráfico K_I aplicado, segundo a equação IV.1 [Anderson, 1995], 182
versus $K_{I(EA)}$, segundo a equação V.4. Parâmetros de emissão acústica utilizados:
tempo de subida, contagem, energia, duração, amplitude, frequência média e
contagem para pico.

Fig. 5.48 – Gráfico K_I aplicado, segundo a equação IV.1 [Anderson, 1995], 183
versus $K_{I(EA)}$, segundo a equação V.3. Parâmetros de emissão acústica utilizados:
tempo de subida, contagem, energia, duração, amplitude e frequência média.

Fig. 5.49 – Gráfico de correlação entre os valores estimados para $K_{I(EA)}$, no 190
conjunto de dados 01, pelas equações V.1 e V.3. Valores de $K_{I(EA)}$ em $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

Fig. 5.50 – Gráfico de correlação entre os valores estimados de $K_{I(EA)}$, no 193
conjunto de dados 02, pelas equações V.1 e V.3. Valores de K_I em $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

Fig. 5.51 – Gráfico de correlação entre os valores estimados de $K_{I(EA)}$, no 199
conjunto de dados 04, pelas equações V.1 e V.3. Valores de K_I em $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

Fig. 5.52 – Gráfico de correlação entre os valores estimados de $K_{I(EA)}$, no 202
conjunto de dados 05, pelas equações V.1 e V.3. Valores de K_I em $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

Fig. 5.53 – Gráfico de correlação entre os valores estimados de $K_{I(EA)}$, no 204
conjunto de dados 06, pelas equações V.1 e V.3. Valores de K_I em $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

Fig. 5.54 – Gráfico de correlação entre os valores estimados de $K_{I(EA)}$, no 208
conjunto de dados 07, pelas equações V.1 e V.3. Valores de K_I em $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

Fig. 5.55 – Gráfico de correlação entre os valores estimados de $K_{I(EA)}$, no 211
conjunto de dados 08, pelas equações V.1 e V.3. Valores de K_I em $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

Fig. 5.56 – Gráfico de correlação entre os valores estimados de $K_{I(EA)}$, no 215
conjunto de dados 09, pelas equações V.1 e V.3. Valores de K_I em $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

Índice de tabelas

II. REVISÃO TEÓRICA

Tabela II.1 - Velocidade relativa em emissão acústica	12
Tabela II.2 - Velocidades de onda (c) e impedâncias acústicas (Z) de materiais para ondas longitudinais (l), transversais (s) e Rayleigh (r)	13
Tabela II.3 – Escala de dB _{AE}	15
Tabela II.4 – Definições das características do sinal de emissão acústica de acordo com a NBR – 15181 - Ensaio não destrutivo - Emissão Acústica - Terminologia. (ABNT, 2004)	18
Tabela II.5 - Características do sinal de emissão acústica apresentado na figura 2.16.	23

III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela III.1 - Classificação dos resultados de EA em fundos de tanque.	32
Tabela III.2 – Relação entre diâmetro do furo e amplitude do sinal de emissão acústica.	37
Tabela III.3 - Relação entre picos de amplitude e fontes de emissão acústica.	48
Tabela III.4 – Gráficos para acompanhamento de ensaios de CTOD monitorados com emissão acústica.	49
Tabela III.5 – Classificação das áreas ativas.	59
Tabela III.6 – Tabela de ordenamento e criticidade de agrupamento de sinais segundo a norma JIS Z 2342-2002.	64
Tabela III.7 - Equipamentos classificados como “E” no ensaio de emissão acústica.	80
Tabela III.8 - Equipamentos avaliados pela mecânica da fratura.	81
Tabela III.9 - Resultados do diagrama FAD para os equipamentos da tabela III.8.	82

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

Tabela IV.1 – Composição química do aço API XL 60, amostra e especificado.	90
--	----

Valores percentuais em peso.

Tabela IV.2 – Descontinuidades inseridas.	91
Tabela IV.3 – Propriedades mecânicas do aço API XL 60.	92
Tabela IV.4 – Valores experimentais para obtenção da curva de resistência do corpo de prova tubo 03, segundo o parâmetro de mecânica da fratura Integral J.	93
Tabela IV.5 – Valores experimentais para determinação de J aplicado ao corpo de prova tubo 02. Pressão em bar e J em kJ/m^2 . MBTG, metal base trinca grande; MBTP, metal base trinca pequena; MATG, zona termicamente afetada trinca grande; e, MATP, zona termicamente afetada trinca pequena.	94
Tabela IV.6 – Valores experimentais para obtenção da curva de resistência do corpo de prova tubo 01, segundo o parâmetro de mecânica da fratura Integral J.	95
Tabela IV.7 – Estimativa da tensão de colapso dos corpo de prova considerando o fator de Folias.	105

V. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Tabela V.1 – Dimensões previstas para as descontinuidades inseridas no corpo de prova tubo 03.	109
Tabela V.2 – Profundidade da descontinuidade MBTG e pressão interna aplicada ao corpo de prova tubo 03.	111
Tabela V.3 – Valores de K_I , L_r e K_{II} para as profundidades e pressões da descontinuidade MBTG descritas na tabela V.2.	113
Tabela V.4 – Valores de K_I para a descontinuidade MBTP, que não apresentou propagação durante o teste hidrostático do corpo de prova tubo 03.	115
Tabela V.5 – Resultados do critério MONPAC para o corpo de prova tubo 03. Profundidade em mm, pressão em bar e tempo em s.	125
Tabela V.6 – Eventos de emissão acústica detectados nas regiões das descontinuidades inseridas no corpo de prova tubo 03.	128
Tabela V.7 – Valores dos parâmetros de emissão acústica e valores de mecânica da fratura para a obtenção de equações de correlação.	128
Tabela V.8 – Descontinuidades inseridas no corpo de prova tubo 02.	130
Tabela V.9 – Curva de pressurização aplicada ao corpo de prova tubo 02,	131

descrita na figura 5.15.

Tabela V.10– Valores de K_I , L_r e K_r , para as profundidades e pressões descritas na tabelas V.8 e V.9. Pressão em bar; tensão de membrana em MPa e K_I em MPa√m. 132

Tabela V.11 – Resultados do critério MONPAC, para os dados coletados no corpo de prova tubo 02. Pressão em bar, tempo em s. 141

Tabela V.12 – Valores de K_I sincronizados com os resultados do critério MONPAC para as descontinuidades MBTG e MATG. 142

Tabela V.13 – Eventos de emissão acústica detectados na região da descontinuidade MATG do corpo de prova tubo 02. 145

Tabela V.14 – Somatório dos valores dos parâmetros de emissão acústica e valores de mecânica da fratura para a obtenção de equações de correlação. 145

Tabela V.15 – Descontinuidades inseridas no corpo de prova tubo 01. 146

Tabela V.16 - Pressão interna aplicada ao corpo de prova tubo 01. 148

Tabela V.17 – Valores de K_I , L_r e K_r , para as pressões descritas na tabela V.16. Pressão em bar; tensão de membrana em MPa; e, K_I em MPa√m. 148

Tabela V.18 – Resultados do critério MONPAC para o corpo de prova tubo 01. 157

Tabela V.19 – Valores de K_I sincronizados com os resultados do critério MONPAC para o corpo de prova tubo 01. Tensão de membrana em MPa e K_I em MPa√m. 158

Tabela V.20 – Histograma dos valores de K_I para os corpos de prova tubo 01, tubo 02 e tubo 03. K_I em MPa√m. 162

Tabela V.21 – Média e desvio padrão por parâmetro de emissão acústica e corpo de prova. 178

Tabela V.22 – Média por descontinuidade e parâmetro de emissão acústica. 178

Tabela V.23 - Desvio padrão por descontinuidade e parâmetro de emissão acústica. 179

Tabela V.24 – Valores estimados de $K_{I(EA)}$ em MPa√m utilizando o somatório dos valores dos parâmetros de emissão acústica. Para a equação V.4 foram utilizados os parâmetros tempo de subida, contagem, energia, duração, amplitude, frequência média e contagem para pico; para a equação V.3 foram 186

utilizados os parâmetros tempo de subida, contagem, energia, duração, amplitude e frequência média.

Tabela V.25 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o 189 conjunto de dados 01 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

Tabela V.26 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o 192 conjunto de dados 02 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

Tabela V.27 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o 195 conjunto de dados 03, no regime elástico, utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

Tabela V.28 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o 196 conjunto de dados 03, até o colapso, utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

Tabela V.29 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o 198 conjunto de dados 04 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

Tabela V.30 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o 200 conjunto de dados 05 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

Tabela V.31 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o 203 conjunto de dados 06 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

Tabela V.32 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o 206 conjunto de dados 07 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

Tabela V.33 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o 209 conjunto de dados 08 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

Tabela V.34 – Descontinuidades internas detectadas no equipamento do 209 conjunto de dados 08 após a realização de ensaios não destrutivos e valores de K_I aplicado, calculado pela equação IV.1, nas descontinuidades para o carregamento com pressão interna de 105 kgf/cm².

Tabela V.35 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o 212 conjunto de dados 09 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

Tabela V.36 – Descontinuidades internas detectadas no equipamento do 213 conjunto de dados 09 após a realização de ensaios não destrutivos e valores de K_I aplicado, calculado segundo a equação IV.1, nas descontinuidades para o

carregamento com pressão interna de $18,6 \text{ kgf/cm}^2$.

I. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da civilização humana o ser humano tem se utilizado de acontecimentos e/ou fenômenos naturais para adaptar e melhorar o ambiente à sua volta. O fogo, inicialmente utilizado apenas como consequência de raios provenientes de chuvas ou de combustão espontânea, propiciou um enorme desenvolvimento no preparo de alimentos e também na questão da sobrevivência. Outro fenômeno natural muito utilizado pelo ser humano, e também utilizado por outros seres vivos, são ondas sonoras, conhecido como “som”. Com o crescente desenvolvimento da sociedade e com o surgimento das questões de disputa por territórios e controle de outras etnias pode-se supor a ocorrência da primeira junção destes dois fenômenos para a construção de artefatos com o controle da qualidade do produto. Esta ocorrência, divulgada na literatura como “choro do estanho”, estava associada ao uso do fogo para o beneficiamento do material (estanho) e transformá-lo em produto (espada), o método de controle da qualidade estava associado ao som emitido pelo impacto do martelo na espada. Neste caso existia uma grande dependência em relação à experiência do ferreiro, pois o método de controle era bastante rudimentar. Esta pode ser a primeira utilização do método de inspeção com a técnica de emissão acústica registrada.

Em meados do século XX o mesmo princípio físico utilizado no “choro do estanho” foi estudado cientificamente por Joseph Kaiser e passou a figurar como um dos ensaios não destrutivos aplicados a avaliação da integridade de materiais industriais. A descoberta de que materiais sob o efeito de uma carga emitem ruídos quando estão em processo de falha abriu um campo de aplicação para a emergente técnica, agora chamada de emissão acústica.

O crescimento contínuo da demanda por produtos industrializados exigiu e exige a maior disponibilidade possível dos equipamentos que processam os insumos. Os equipamentos de processo necessitam de acompanhamento durante a sua operação para a manutenção de sua operacionalidade. A atividade de Manutenção e Inspeção inicia então o desenvolvimento de métodos de monitoração contínua e de estratégias de paradas de manutenção. Inicialmente são desenvolvidos métodos de inspeção não destrutiva para detecção de descontinuidades. Após a detecção das descontinuidades, reparos eram feitos

para a eliminação das descontinuidades. A metodologia de eliminação de todas as descontinuidades rapidamente se mostrou desvantajosa economicamente. Esta desvantagem encorajou o desenvolvimento e a aplicação de algoritmos de cálculo, baseados nas propriedades de tenacidade à fratura de materiais, para definição da criticidade das descontinuidades e, conseqüentemente, a manutenção ou não das descontinuidades nos equipamentos de operação. Ainda hoje, no início do século XXI, esta metodologia de inspeção é empregada: inspeção, detecção de descontinuidades, cálculos de mecânica da fratura, reparo ou não das descontinuidades e continuidade operacional. O próximo avanço da disciplina Engenharia de Equipamentos poderá advir da monitoração em tempo real das estruturas com relações diretas com a criticidade das descontinuidades. Para a obtenção destes objetivos, busca-se não mais inspecionar para detectar descontinuidades, muda-se foco para inspecionar para dimensionar as descontinuidades críticas para a operação de forma segura do componente.

O método de inspeção com a técnica de emissão acústica está baseado na detecção de fontes de sinais acústicos que são emitidos durante a propagação de descontinuidades e deformações plásticas acentuadas, ou seja, os resultados obtidos com método de inspeção por emissão acústica são, em princípio, os desejados para a monitoração em tempo real das estruturas. Por ser um método qualitativo o ensaio de emissão acústica não fornece as dimensões das descontinuidades, parâmetro fundamental para a disciplina Mecânica da Fratura, uma vez que só fornece indicações de descontinuidades ativas durante o carregamento das estruturas. As dimensões das descontinuidades são fornecidas por outros métodos de ensaios não destrutivos.

Uma vez que a emissão acústica está relacionada com a liberação de energia ocorrida durante o rearranjo do campo de tensões na ponta das descontinuidades, vários pesquisadores buscam a possível relação entre emissão acústica e dimensão das descontinuidades e, como conseqüência, a criticidade das descontinuidades. O estudo proposto neste trabalho busca, caso exista, esta relação que pode oferecer uma alternativa para a Engenharia de Equipamentos na inspeção em serviço. Nos vários ramos de pesquisa desenvolvidos não se intenciona o abandono dos outros métodos de ensaios não destrutivos

como ferramenta de inspeção de equipamentos. A definição desta possível relação só será obtida com a utilização de outros métodos de ensaios não destrutivos para a definição precisa das dimensões, com a Engenharia de Materiais para o fornecimento das propriedades mecânicas dos materiais e com a área de Mecânica da Fratura para a determinação das equações e comportamentos dos materiais quando submetidos aos esforços típicos das condições operacionais. Pode-se notar que o estabelecimento desta relação, por usar uma grande quantidade de variáveis, não irá fornecer um valor preciso das descontinuidades e, em função destas incertezas, para resultados críticos será necessário uma verificação das dimensões reais para o refinamento dos cálculos de mecânica da fratura.

Para atingir esses objetivos foram confeccionados corpos de prova utilizando segmentos de dutos. Nestes corpos de prova foram introduzidas descontinuidades para simulação de defeitos. As descontinuidades foram estimuladas em testes hidrostáticos pela aplicação de pressão interna. Durante os testes hidrostáticos foram coletados sinais de emissão acústica e sinais de ultra-som utilizando o método ToFD. Os sinais de ultra-som oriundos da propagação ou não das descontinuidades inseridas foram sincronizados com a pressão interna aplicada para cálculo do parâmetro de mecânica da fratura K_I . Os sinais de emissão acústica, após processamento, foram sincronizados com os valores obtidos para K_I para o estabelecimento de equações que permitissem estimar os valores de K_I utilizando sinais de emissão acústica. As equações obtidas apresentaram índices de correlação próximos 0,90 e em função disto considerou-se possível a estimativa de K_I utilizando sinais de emissão acústica, nas condições experimentais utilizadas. Esta estimativa foi denominada $K_{I(EA)}$.

II. REVISÃO TEÓRICA

II.1 Introdução ao método de inspeção com a técnica de emissão acústica

Emissão acústica foi definida como um fenômeno onde ondas elásticas transientes são geradas por rápida liberação de energia mecânica a partir de fontes localizadas em um material ensaiado (ABNT, 2004). Fontes de emissão acústica incluem os mecanismos de deformação e fratura, tais como: crescimento de trincas, movimento de discordâncias, maclação, deslocamento de contornos de grão, fratura e decoesão de inclusões (Miller, 1987). Vazamentos oriundos de recipientes pressurizados tais como vasos de pressão e tanques de armazenamento também geram sinais detectados e classificados como emissão acústica.

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

Em contraste com a maioria dos métodos complementares de ensaios não-destrutivos os sinais detectados de emissão acústica são gerados pelo objeto em teste, mediante a aplicação de um estímulo, conforme a figura 2.1, detectando-se as descontinuidades durante o processo de degradação da integridade da estrutura (Miller, 1987).

Instabilidades locais são desenvolvidas nas estruturas antes do colapso. Estas instabilidades podem se manifestar na forma de deformação plástica, iniciação e/ou propagação de trincas, bandas de deslizamento, etc (Miller, 1987). As tensões desenvolvidas nas regiões que contém descontinuidades podem assumir valores superiores às tensões limites de escoamento em função dos concentradores de tensão. Nesta situação, a propagação das descontinuidades atua como uma fonte de sinais de emissão acústica. Conforme apresentado no desenho esquemático da figura 2.1 a fonte de emissão acústica emite a onda mecânica em todas as direções, caracterizando o sinal de emissão acústica

como uma frente de onda de forma esférica. A propagação da onda de emissão acústica pode ser explicada utilizando uma analogia com a propagação das ondas ultra-sônicas (Krautkrämer, 1977). Utilizando a regra que estabelece que “o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão” e a Lei de *Snell* para cálculo dos ângulos das ondas geradas a partir da reflexão (conversão de modo), pode-se estimar os grupos de ondas sônicas que estarão presentes após a geração de um sinal de emissão acústica. Os fenômenos de reflexão e refração estão presentes e, devido as características não direcionais da onda de emissão acústica ocorrem nas duas fronteiras do material gerador do sinal, como apresentado na figura 2.2.

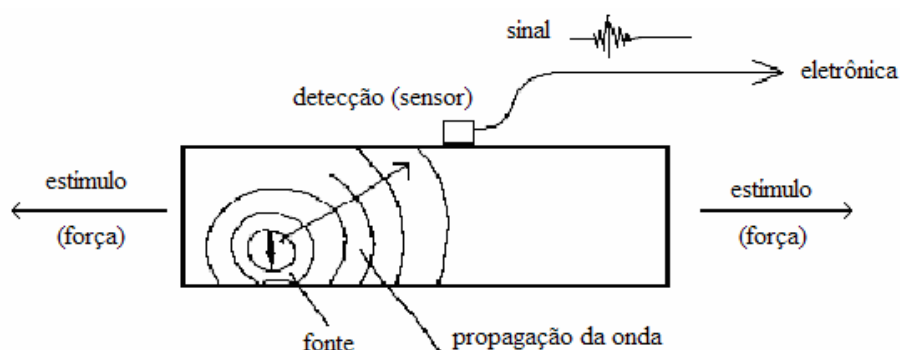


Fig. 2.1 – Características da emissão acústica (Soares, 2001).

A determinação da posição correta da fonte de emissão acústica é totalmente dependente da sua velocidade de propagação. A velocidade de propagação é dependente do material inspecionado e de sua geometria, principalmente espessura. Estes fatores (velocidade de propagação e espessura) variam de teste para teste, conferindo mais uma característica única ao ensaio de emissão acústica.

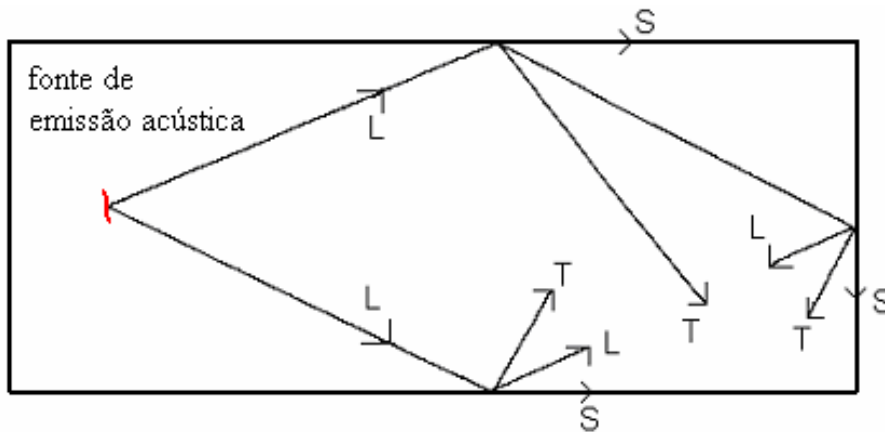


Fig. 2.2 – Fenômenos de reflexão nas fronteiras do material que contém a fonte de emissão acústica (L, onda longitudinal; T, onda transversal; e S, onda superficial). (Soares, 2001).

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

Uma extensa faixa de materiais pode ser inspecionada pela técnica de emissão acústica, incluindo: metais, materiais não metálicos e compostos, etc.

II.2 Características do método de inspeção com a técnica de emissão acústica

O ensaio de emissão acústica é um método passivo que monitora dinamicamente a redistribuição dos campos de tensão em componentes submetidos a esforços. Os carregamentos mais comuns na indústria de petróleo incluem pressão hidrostática e tensões térmicas.

Uma das características mais importantes da aplicação industrial do ensaio de emissão acústica é o comportamento apresentado pelos metais de emitirem ondas de emissão acústica somente acima do máximo carregamento aplicado previamente. Este

comportamento recebeu o nome de “efeito *Kaiser*” em homenagem ao Doutor Joseph Kaiser, pesquisador responsável pela identificação deste comportamento.

O efeito Kaiser, embora tido como um fenômeno irreversível, apresenta reversibilidade para materiais que possuem capacidade de recozimento em temperatura ambiente. (Miller, 1987)

A presença do efeito Kaiser, em materiais metálicos, não permite a repetição dos ensaios após a sua execução uma vez que novas emissões acústicas só ocorrem quando a máxima carga prévia aplicada tiver sido excedida. Esta característica de irreversibilidade no curto espaço de tempo é uma das principais desvantagens do método de inspeção com a técnica de emissão acústica, pois outros métodos de ensaios não destrutivos permitem a repetição contínua dos ensaios com a obtenção dos mesmos resultados. (Miller, 1987)

A presença do efeito Kaiser em materiais metálicos foi utilizada para o desenvolvimento de uma estratégia de inspeção de componentes estruturais e vasos de pressão para a detecção de danos. A estratégia consistia em fazer testes repetidos durante a campanha de serviço do componente. No teste consecutivo, para componentes sem a presença de dano estrutural não seriam gerados sinais de emissão acústica; a existência e a detecção de sinais de emissão acústica corresponderia a danos oriundos da operação do componente. Esta estratégia de teste ficou conhecida como “Corolário *Dunegan*”. (Miller, 1987)

II.3 Atenuação de sinais de emissão acústica

Atenuação é a perda da energia do sinal e consequente diminuição da amplitude da onda, com o aumento da distância de propagação, ou seja, a distancia da fonte. A atenuação é importante porque controla a detecção de fontes distantes, pela determinação da correta distância entre sensores que permite de forma segura a detecção de um sinal de uma fonte de emissão acústica.

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

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

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

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

II.4 Velocidade de propagação

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

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

$$y = A \cdot \text{sen} 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - f \cdot t \right) \quad (\text{II.1})$$

onde:

y , deslocamento (amplitude);

x , posição;

t , tempo;

λ , comprimento de onda; e,

f , frequência.

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

Por uma senóide pode-se estimar o movimento de uma partícula no material em função do tempo, ou pode-se obter a informação instantânea do meio onde a onda acústica está propagando. Teríamos um quadro congelado do material e veríamos qual é o movimento instantâneo (deslocamento) em diferentes posições. Nas figuras 2.3 e 2.4 são apresentadas as características de uma onda senoidal.

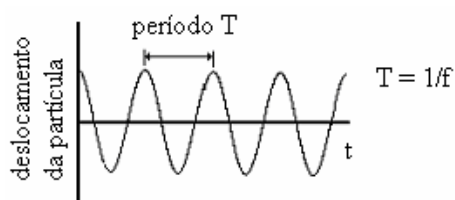


Fig. 2.3 - Movimento de uma partícula no material em função do tempo.

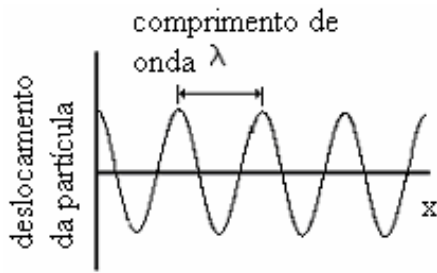


Fig. 2.4 - Movimento instantâneo.

Nas figuras 2.3 e 2.4 ambos os gráficos são senoidais e estão relacionados entre si pela equação II.2, onde g representa uma função, e pela equação II.3.

$$y = g(x - c \cdot t) \quad (\text{II.2})$$

$$c = f \cdot \lambda \quad (\text{II.3})$$

onde:

y , deslocamento (amplitude);

f , frequência;

x , posição;

c , velocidade de propagação da onda;

t , tempo; e,

λ , comprimento de onda.

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

II.5 Tipos de ondas acústicas nos materiais

Nas figuras 2.5, 2.6 e 2.7 apresentam-se os modos de vibração das ondas longitudinal, transversal e superficial, respectivamente.

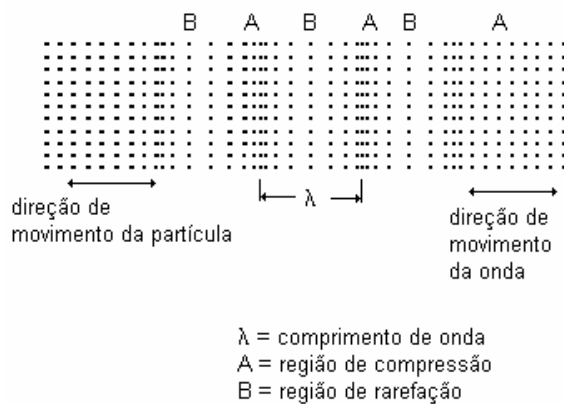


Fig. 2.5 - Onda longitudinal. (Kraukrämer, 1977)

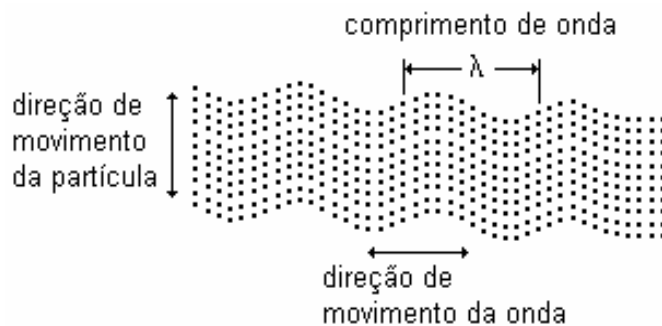


Fig. 2.6 - Onda transversal. (Kraukrämer, 1977)

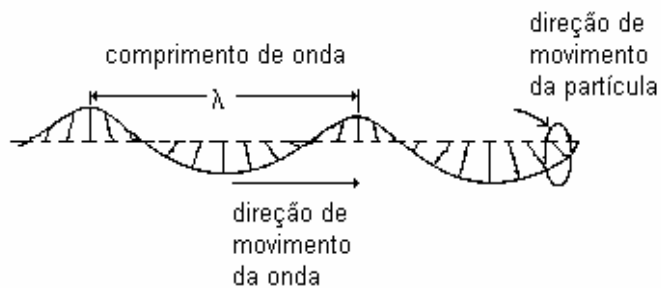
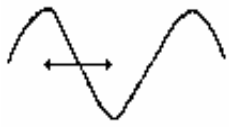
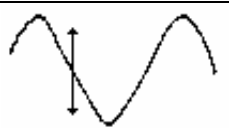
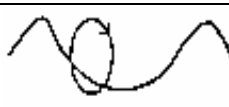


Fig. 2.7 - Onda superficial. (Kraukrämer, 1977)

Na tabela II.1 apresenta-se a relação entre as velocidade de propagação das ondas.

Tabela II.1 - Velocidade relativa em emissão acústica. (Kraukrämmer, 1977)

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

Na tabela II.2 apresentam-se as propriedades acústicas de diversos materiais.

Tabela II.2 - Velocidades de onda (c) e impedâncias acústicas (Z) de materiais para ondas longitudinais (l), transversais (s) e Rayleigh (r). (Miller, 1987)

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

Densidade em g/cm^3 , velocidade da onda em m/s , impedância acústica em milhões de $\text{kg/m}^2\text{s}$.

II.6 Sensores para detecção de sinais de emissão acústica

Os sensores utilizados industrialmente para a detecção de sinais de emissão acústica são do tipo piezoelétricos, e são os mais utilizados em função do custo de fabricação e facilidade de fabricação. O fenômeno da piezoelectricidade que confere o nome ao tipo de sensor permite a geração cargas elétricas como resultado de deformação mecânica e o efeito reverso (Krautkrämer, 1977). A frequência de ressonância de um sensor é identificada pela frequência onde ocorre a maior resposta em amplitude. No exemplo da

figura 2.8 a frequência de ressonância está assinalada dentro do círculo na cor vermelha. A banda em frequência é a descrição da faixa percentual da frequência de ressonância para uma resposta de até -3 dB, conforme descrito na figura 2.9. Sensores são identificados como banda estreita ou banda larga, para bandas de frequência de até 50% e acima de 50%, respectivamente. Os sensores mais utilizados no ensaio de emissão acústica em materiais metálicos são ressonantes em 150 kHz, com banda larga em frequência (100%), ou seja, apresentam uma extensa faixa útil de 75 kHz até 225 kHz.

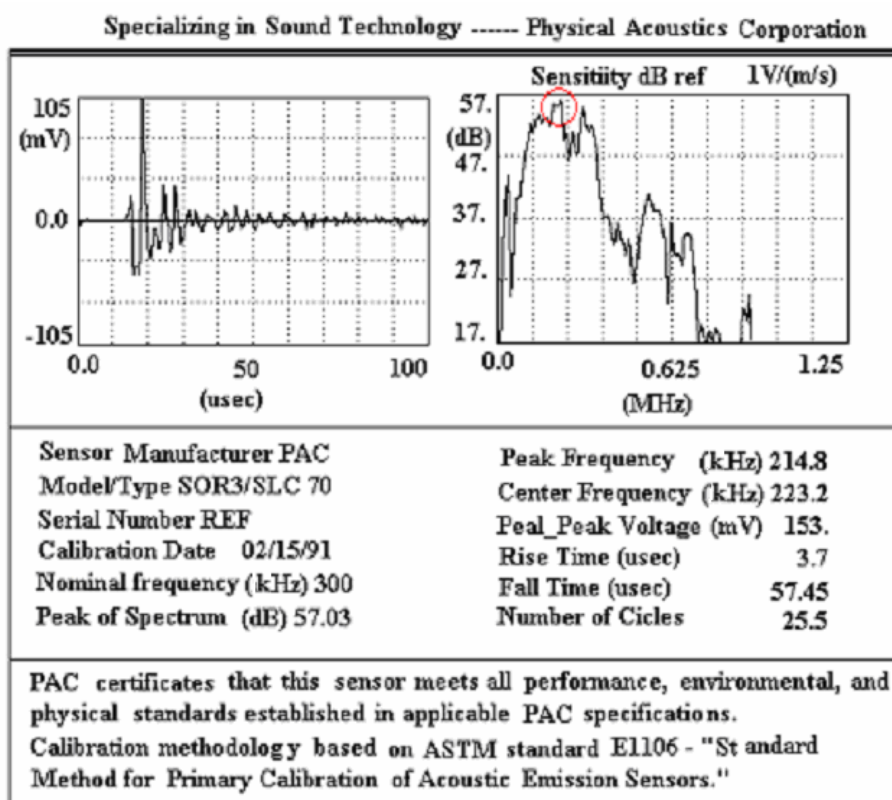


Fig. 2.8 – Curva de calibração de sensor de emissão acústica, cortesia da *Physical Acoustics South America*.

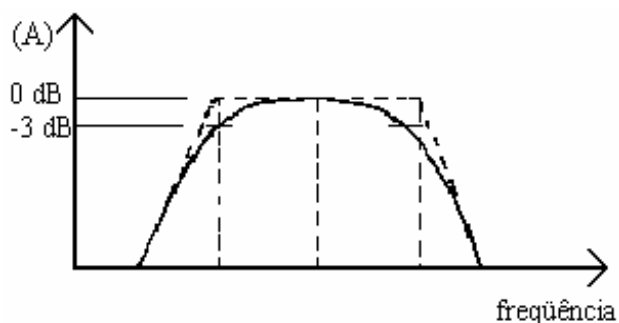


Fig. 2.9 – Comprimento de banda de frequência.

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

II.7 Unidade de medida de amplitude

Para descrever a extensa faixa de amplitudes dos sinais de emissão acústica, medida primariamente em volts, uniformemente, utiliza-se a escala especial de decibéis para emissão acústica (dB_{AE}), descrita na tabela II.3.

Tabela II.3 – Escala de dB_{AE} .

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

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

$$dB_V = 20 \cdot \log\left(\frac{V}{V^{ref}}\right) \quad (\text{II.4})$$

onde:

V , voltagem medida no sinal de emissão acústica;

V^{ref} , 1 microVolt na saída sensor.

II.8 Características da onda de emissão acústica

Um sinal ideal de emissão acústica pode ser descrito conforme a equação II.5. Um sinal gerado segundo a equação II.5 é apresentado na figura 2.10.

$$V = V_0 \cdot \exp(-B \cdot t) \sin(\omega \cdot t) \quad (\text{II.5})$$

onde,

V , sinal na saída do sensor, em Volts;

V_0 , voltagem inicial do sinal, em Volts;

B , constante de decaimento (maior que zero);

t , tempo; e,

ω , frequência angular.

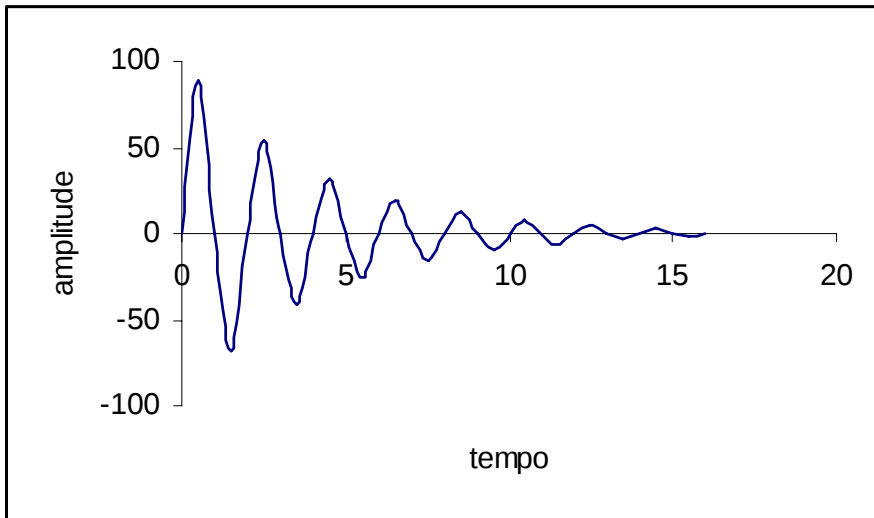


Fig. 2.10 – Sinal ideal de emissão acústica conforme a equação 4.4.

Para o estudo de sinais de emissão acústica convencionou-se algumas características da onda. Estas características estão normalizadas internacionalmente. As definições prescritas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (ABNT, 2004) para estas características estão descritas na tabela II.4.

Tabela II.4 – Definições das características do sinal de emissão acústica de acordo com a NBR – 15181 - Ensaios não destrutivos - Emissão Acústica - Terminologia. (ABNT, 2004)

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

Para a identificação das características do sinal de emissão acústica será utilizado o sinal descrito nas figuras de 2.11 a 2.17. As informações citadas no texto estão assinaladas nas figuras por setas. Quando a voltagem (amplitude) de um sinal ultrapassa a voltagem do limite de referencia do sistema inicia-se o processo de detecção de um sinal de emissão acústica (figura 2.11). Nestas figuras utilizou-se uma escala de tempo meramente informativa, não representando em hipótese alguma os tempos comumente encontrados em ensaios de emissão acústica.

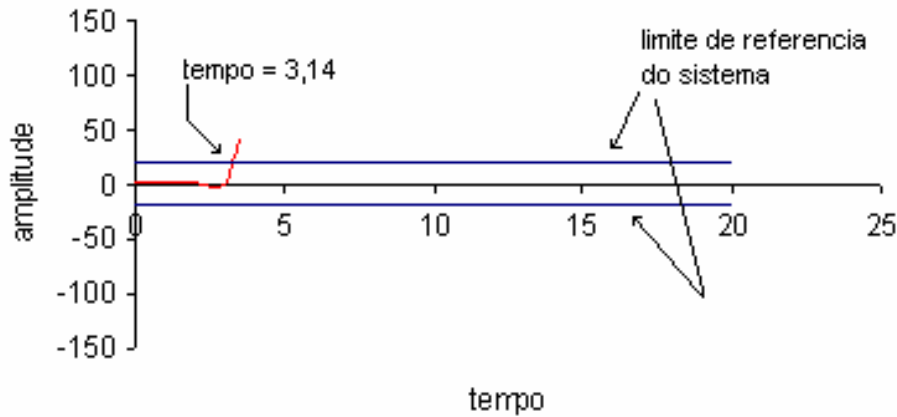


Fig.2.11 – Determinação do início de um sinal (tempo de chegada) de emissão acústica.
Tempo de chegada = 3,14.

O sinal atinge um valor máximo e decai até cruzar novamente o limite de referência do sistema (figura 2.12). O valor máximo de amplitude é registrado como a amplitude do sinal e, em função de ter ocorrido um cruzamento ascendente e um cruzamento descendente do limite de referência do sistema, tem-se a primeira contagem do sinal de emissão acústica.

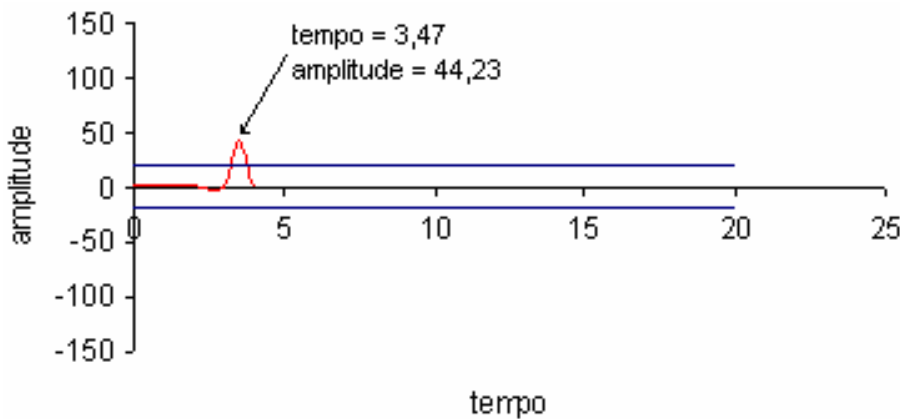


Fig. 2.12 – Determinação da máxima amplitude e do número de contagens de um sinal de emissão acústica. Amplitude = 44,23 dB, Contagens = 1.

O sinal oscila até a parte negativa da onda e cruza mais uma vez o limite de referência do sistema (figura 2.13), para facilitar a comparação dos sinais e o processamento dos dados, a instrumentação de emissão acústica trabalha com o módulo dos valores de voltagem (figura 2.14).

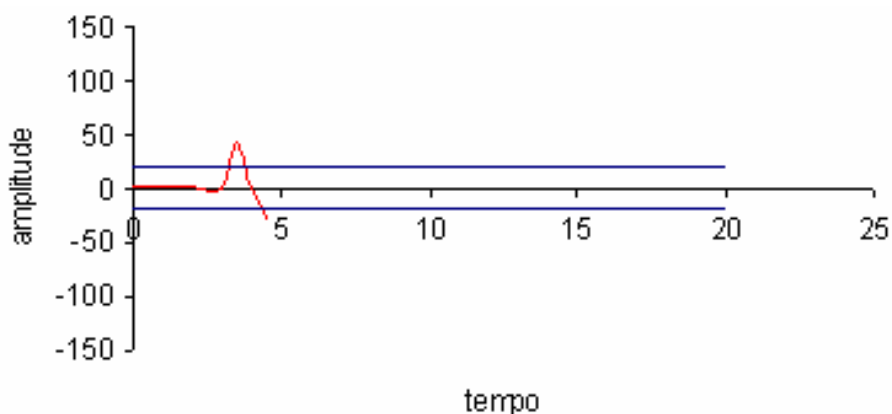


Fig. 2.13 – Detecção de um sinal de emissão acústica.

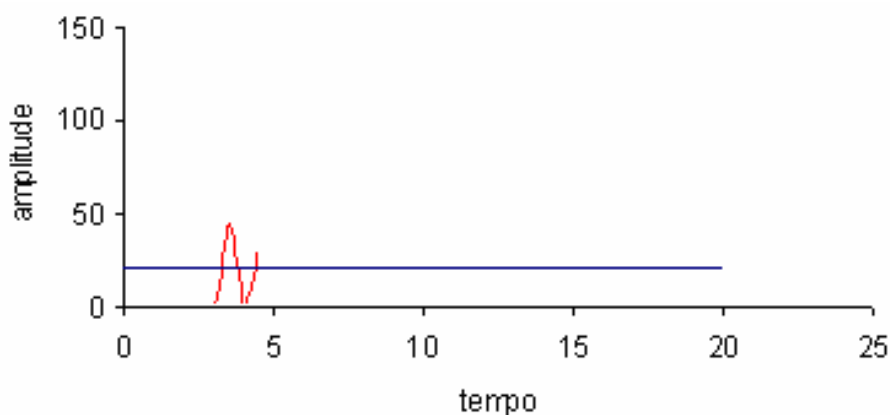


Fig. 2.14 – Detecção de um sinal de emissão acústica. Representação em módulo do sinal apresentado na figura 2.13.

A oscilação do sinal continua, apresentando valores de amplitude abaixo e acima do primeiro pico após a detecção do sinal (figura 2.15). Quando um novo valor de máxima amplitude é encontrado (118,85 dB no instante de tempo 5,49 na figura 2.15) calcula-se o tempo necessário para o sinal atingir o valor máximo de amplitude. Este tempo é denominado tempo de subida e no exemplo em questão corresponde a diferença entre 5,49 e 3,12, ou seja, 2,35. O sinal da figura 2.15 apresentou cinco cruzamentos ascendentes e cinco cruzamento descendentes, caracterizando 5 contagens.

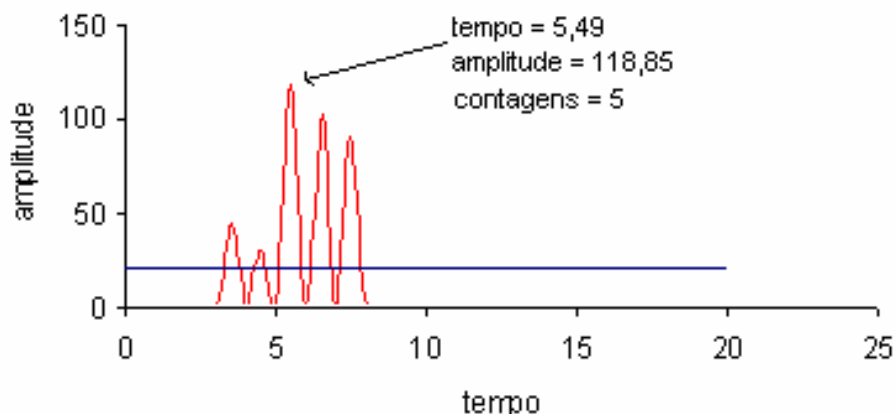


Fig. 2.15 – Detecção de um sinal de emissão acústica. Tempo de chegada (figura 2.11) = 3,14, amplitude = 118,85 dB, contagens = 5, tempo de subida = 2,35.

Quando o sinal de emissão acústica não mais cortar o limite de referência do sistema, temos o final do sinal de detecção acústica (figura 2.16). Em função de não ter sido medida amplitude superior ao valor anteriormente medido (118,85 dB), o valor anteriormente medido é registrado como a máxima amplitude deste sinal. O tempo de subida é medido simultaneamente com a máxima amplitude, sendo assim, o valor anteriormente medido é registrado. As contagens são novamente medidas e encontra-se um valor de 12 para este sinal. A diferença de tempo entre o tempo de chegada (3,12, figura 2.11) e o instante do término da detecção do sinal é denominada duração e apresenta o valor de 11,69 para este sinal ($14,83 - 3,12 = 11,69$). O processo de detecção e medição do sinal de emissão acústica poderia prosseguir indefinidamente sempre que um novo sinal fosse detectado, ou seja, cortasse o limite de referência do sistema, porém, isto não ocorre em função de parâmetros para identificação de sinais de emissão acústica.

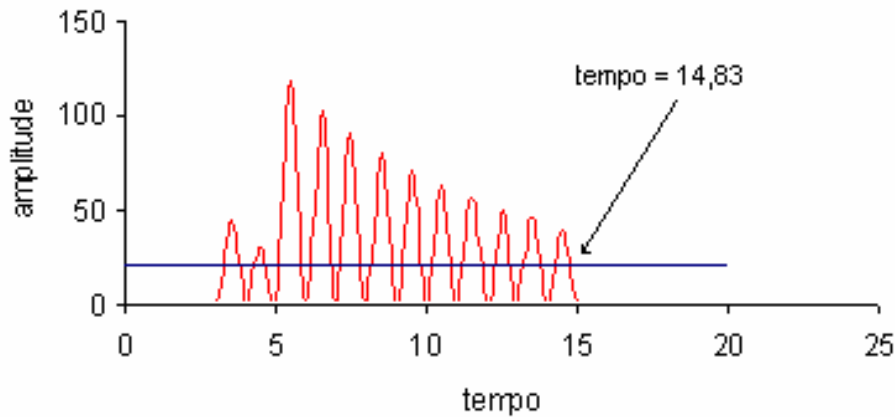


Fig. 2.16 – Término da detecção de um sinal de emissão acústica. Tempo de chegada (figura 2.11) = 3,14, amplitude (figura 2.15) = 118,85 dB, contagens = 12, tempo de subida (figura 2.15) = 2,35, duração do sinal = 11,69.

Para a correta identificação do sinal de emissão acústica são estabelecidos três tempos máximos para a instrumentação coletar e processar o sinal. O primeiro parâmetro está relacionado ao tempo necessário para o sinal atingir o seu maior valor de amplitude, geralmente este parâmetro é identificado como “tempo de definição do pico”. O segundo parâmetro estipula a máxima duração possível para um sinal de emissão acústica, sendo identificado como “tempo de duração do sinal”. O terceiro parâmetro está relacionado com o tempo necessário para a instrumentação de emissão acústica coletar, medir as características e armazenar o sinal de emissão acústica, sendo identificado como “tempo morto do sistema”. Os nomes dados aos três parâmetros de tempo variam entre os fabricantes de equipamentos de emissão acústica. Os valores destes parâmetros são determinados laboratorialmente para cada classe de material ensaiado, geralmente o “tempo de duração do sinal” é o dobro do “tempo de definição do pico” e o “tempo morto do sistema” é o menor valor que não ocasiona a saturação da capacidade de processamento da instrumentação de emissão acústica.

O sinal de emissão acústica apresentado na figura 2.16 apresenta as características descritas na tabela II.5.

Tabela II.5 - Características do sinal de emissão acústica apresentado na figura 2.16.

Característica	Valor
Tempo de subida	$5,49 - 3,14 = 2,35$
Amplitude	118,85
Duração	$14,83 - 3,14 = 11,69$
Contagens	12
Energia	719 (ver figura 2.17)

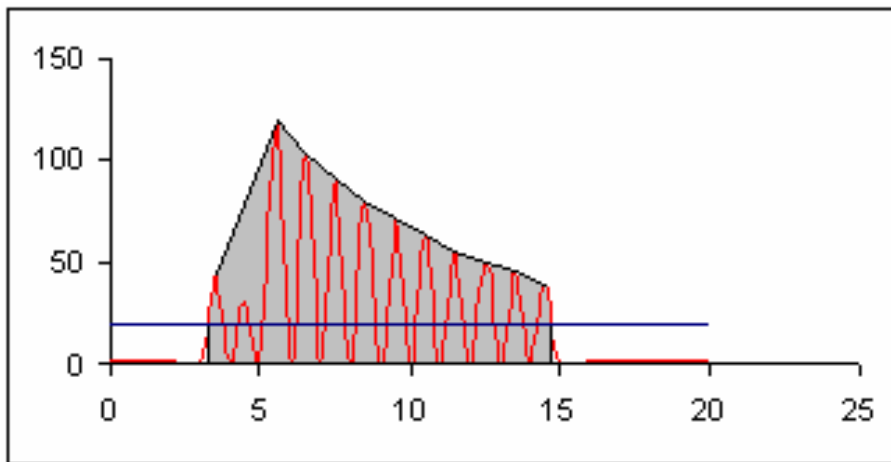


Fig. 2.17 – Energia do sinal acústica apresentado na figura 2.17.

II.9 Técnicas de localização de fontes de emissão acústica

A localização de fontes de sinais de emissão acústica segue o princípio geométrico de que dois pontos definem uma reta, três pontos um plano e quatro pontos um volume. Sendo assim, para efetuar a localização de uma fonte de emissão acústica em uma linha reta será necessário, no mínimo, a instalação de dois sensores; para definir uma fonte em uma superfície, três sensores; e para definir uma fonte na seção transversal de um componente, quatro sensores.

O algoritmo de localização linear foi estabelecido com base nas premissas descritas na figura 2.18. Para uma dada distância entre sensores L , uma fonte de emissão acústica posicionada na distância desconhecida x ao emitir um sinal irá percorrer a mesma distância

em todas as direções. O sensor 1 da figura 2.18 irá detectar um sinal e, neste instante, a frente de onda estará na distância x da fonte em direção ao sensor 2. O sinal de emissão acústica será detectado pelo sensor 2 no tempo necessário para percorrer a distância $L - 2x$. A posição da fonte de emissão acústica será fornecida pela equação II.6.

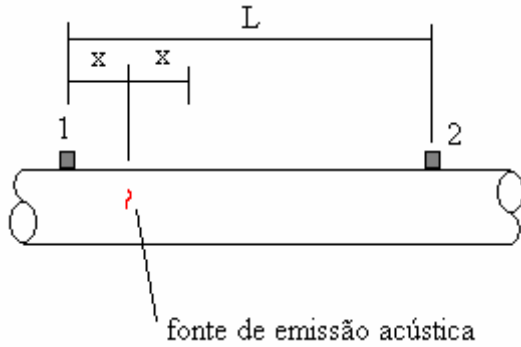


Fig. 2.18 – Localização linear de fontes de emissão acústica.

$$c = \frac{L - 2x}{\Delta t} \quad (\text{II.6})$$

onde,

c , velocidade de propagação da onda;

Δt , diferença de tempo de detecção do sinal entre os sensores 1 e 2, no exemplo da figura 2.18.

Para a definição da localização da fonte em um plano a utilização da equação II.6 não pode ser utilizada pois esta aproximação fornece um ponto entre os dois sensores que satisfaz a posição da fonte. Para a definição da posição da fonte em um plano devemos considerar primeiramente a condição apresentada na figura 2.19, onde dois sensores estão posicionados em um plano infinito (Miller, 1987). A posição da fonte será obtida por interações entre as possíveis posições e os tempos de chegada nos sensores, posição esta melhor descrita por uma curva hiperbólica cujo desenvolvimento é apresentado nas equações de II.7 a II.12, conforme as notações da figura 2.19.

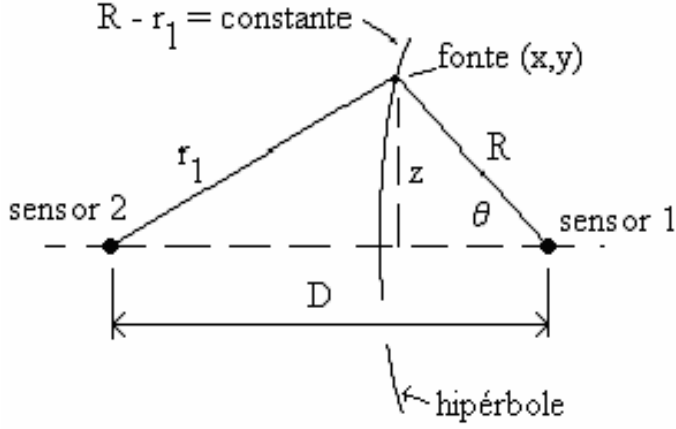


Fig. 2.19 – Localização de fonte de emissão acústica com dois sensores em um plano infinito. (Miller, 1987)

$$\Delta t \cdot c = r_1 - R \quad (\text{II.7})$$

$$z = R \cdot \sin \theta \quad (\text{II.8})$$

$$z^2 = r_1^2 - (D - R \cdot \cos \theta)^2 \quad (\text{II.9})$$

substituindo as equações II.8 em II.9:

$$R^2 \sin^2 \theta = r_1^2 - (D - R \cdot \cos \theta)^2 \quad (\text{II.10})$$

$$R^2 \sin^2 \theta + R^2 \cos^2 \theta = r_1^2 - D^2 + 2 \cdot D \cdot R \cdot \cos \theta$$

$$R^2 = r_1^2 - D^2 + 2 \cdot D \cdot R \cdot \cos \theta \quad (\text{II.11})$$

substituindo a equação II.7 na equação II.11:

$$R^2 = (\Delta t \cdot c + R)^2 - D^2 + 2 \cdot D \cdot R \cdot \cos \theta$$

$$R^2 = (\Delta t \cdot c)^2 + 2 \cdot \Delta t \cdot c \cdot R + R^2 - D^2 + 2 \cdot D \cdot R \cdot \cos \theta$$

$$2 \cdot \Delta t \cdot c \cdot R + 2 \cdot D \cdot R \cdot \cos \theta = D^2 - (\Delta t \cdot c)^2$$

$$R(2 \cdot \Delta t \cdot c + 2 \cdot D \cdot \cos \theta) = D^2 - (\Delta t \cdot c)^2$$

$$R = \frac{D^2 - (\Delta t \cdot c)^2}{2 \cdot \Delta t \cdot c + 2 \cdot D \cdot \cos \theta} \quad (\text{II.12})$$

A equação II.12 define a hipérbole que passa pela fonte de emissão acústica descrita na figura 2.19. Para uma distância entre sensores D em um material com velocidade de propagação c , sinais com diferença de tempo de detecção Δt são localizados sobre a curva descrita pela equação II.12. Esta solução de localização não fornece a posição exata da fonte por definir uma órbita hiperbólica a partir de um determinado sensor. A instalação de um terceiro sensor, com a consequente medição de sua posição e intervalo de tempo de chegada para o sinal oriundo da mesma fonte adiciona mais algumas equações que solucionam a questão da localização da fonte. Na figura 2.20 apresenta-se o novo arranjo de sensores para a definição exata da posição da fonte de emissão acústica. Para a solução da localização da fonte utilizamos o mesmo raciocínio descrito para a questão envolvendo dois sensores, precisando definir inicialmente apenas as equações II.13 e II.14.

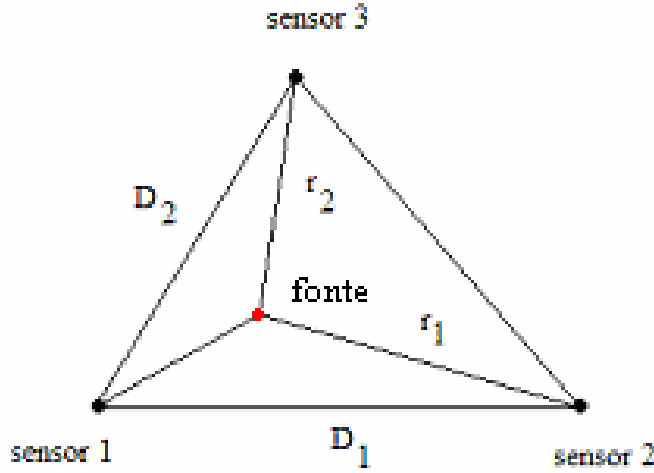


Fig. 2.20 – Determinação da localização da fonte de emissão acústica com três sensores em um plano infinito. (Miller, 1987)

$$\Delta t_1 \cdot c = r_1 - R \quad (\text{II.13})$$

$$\Delta t_2 \cdot c = r_2 - R \quad (\text{II.14})$$

utilizando o mesmo desenvolvimento obtemos as equações II.15 e II.16:

$$R = \frac{D_1^2 - (\Delta t_1 \cdot c)^2}{2(\Delta t_1 \cdot c + D_1 \cdot \cos(\theta - \theta_1))} \quad (\text{II.15})$$

$$R = \frac{D_2^2 - (\Delta t_2 \cdot c)^2}{2(\Delta t_2 \cdot c + D_2 \cdot \cos(\theta_3 - \theta))} \quad (\text{II.16})$$

As equações II.15 e II.16 devem ser resolvidas simultaneamente e, por meio de interações, o valor de R é determinado. Pode-se supor que quanto maior for o número de interações, melhor será a precisão da localização da fonte de emissão acústica, porém, o tempo necessário para o processamento do sinal também será maior. O ponto de equilíbrio entre precisão da localização e o tempo de processamento apresenta-se como uma grande questão para ensaios de emissão acústica em escala real.

III. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

III.1 Introdução

Neste capítulo serão abordados os temas:

- item III.2, garantia da sensibilidade em testes de emissão acústica;
- item III.3, emissão acústica aplicada a problemas de corrosão;
- item III.4, emissão acústica aplicada à detecção de descontinuidades em equipamentos submetidos a carregamentos com pressão interna, e;
- item III.5, emissão acústica aplicada à integridade estrutural.

No item III.6 apresentam-se as considerações finais em relação a revisão bibliográfica efetuada.

III.2 Garantia da sensibilidade em testes de emissão acústica

Por se tratar de um método de inspeção passivo onde apenas as descontinuidades tornadas acusticamente ativas por solicitação mecânica emitem sinais, o método de calibração para o teste difere dos ensaios não destrutivos convencionais.

Nos métodos convencionais de ensaios não destrutivos as calibrações são realizadas observando-se a resposta dos instrumentos utilizados após a introdução do meio físico de ensaio (onda ultra-sônica, campo magnético, raios X, etc.) em um bloco padrão.

No método de emissão acústica, em função do efeito *Kaiser*, não é possível proceder da mesma forma. Para a calibração dos sensores, que representam o meio de contato entre a instrumentação e o componente em teste, faz-se necessário a introdução de um sinal padrão e a observação da resposta na instrumentação. Várias formas de sinal padrão foram testadas [Hsu, 1977] e a que apresentou maior praticidade para utilização nas inspeções de campo foi a utilização do sinal gerado pela quebra de um comprimento de 2 mm a 3 mm de uma barra de grafite 2H com diâmetro 0,3 mm [NBR 15194]. Este método denominado “quebra

de grafite” é normalizado mundialmente e permite a comparação de sinais de emissão acústica oriundos de todos os testes, mantidos os mesmos ajustes da instrumentação. A verificação da calibração é feita pela leitura das amplitudes das ondas ultra-sônicas obtidas com a quebra de grafite. Todos os sensores devem fornecer valores de amplitude para a quebra de grafite dentro de uma variação de 4 dB ou 6 dB, dependendo do procedimento de teste.

III.3 Emissão acústica aplicada a problemas de corrosão

Allevato e Ramos [Allevato, 1980] apresentaram um estudo bibliográfico relatando a potencialidade da técnica de emissão acústica para o estudo de fenômenos de corrosão. Os resultados citados por Allevato relacionavam, separadamente, perda de massa, hidrogênio coletado e efeito galvânico, com emissão acústica. A relação entre emissão acústica e perda de massa foi obtida entre a quantidade de sinais de emissão acústica e ensaios de laboratório em meios corrosivos para simular a campanha operacional de um equipamento (estes ensaios também são conhecidos como ensaios de corrosão acelerada), onde os corpos de prova tinham seu peso medido em intervalos regulares de 20 minutos. A evolução da formação e liberação de moléculas de hidrogênio em materiais metálicos apresentou uma relação proporcional com a quantidade de sinais de emissão acústica. O efeito galvânico foi estudado medindo-se a contagem acumulada de sinais de emissão acústica em corpos de prova, isolados e em contato elétrico, confeccionados em aço e alumínio. A atividade de emissão acústica foi medida pela quantidade de sinais (*hits*) de emissão acústica detectada. Quando os materiais estavam isolados eletricamente a atividade de emissão acústica foi inferior à atividade para a condição de conexão elétrica, demonstrando o efeito galvânico na geração de sinais de emissão acústica. Para o início dos testes de emissão acústica para estudo de fenômenos de corrosão foi proposto, pelos autores, o dispositivo de teste apresentado na figura 3.1. A análise dos dados foi feita com o auxílio de gráficos apresentando: (a) contagem acumulada de eventos para avaliar qualitativamente o fenômeno de corrosão em função da formação de moléculas de gases desprendendo-se dos corpos de prova; (b) voltagem RMS dos sinais para medir a intensidade média do sinal e ajudar na caracterização dos sinais; e, (c) taxa de atividade para medir a quantidade de

sinais por unidade de tempo. Allevato e Ramos [Allevato, 1980] concluíram que o método de emissão acústica poderia ser utilizado para acompanhamento dos processos corrosivos em equipamentos da indústria de petróleo. [Allevato, 1980]

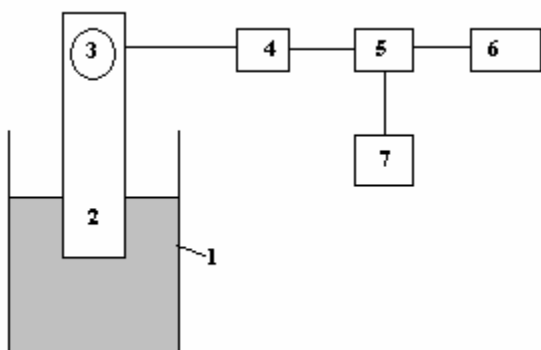


Fig. 3.1 – Dispositivo para estudo de fenômenos de corrosão com a técnica de emissão acústica onde: (1) becher; (2) corpo de prova; (3) sensor); (4) pré-amplificador; (5) analisador; (6) tubo de raios catódicos; e, (7) registrador. [Allevato, 1980]

Dutos de transporte de derivados de petróleo geralmente apresentam comprimentos superiores à 100 km, e geralmente encontram-se enterrados. Durante a operação destes dutos, a atividade de inspeção torna-se extremamente complicada pela impossibilidade de realizar a inspeção em 100% do comprimento do duto sem o auxílio de *pigs* instrumentados. Pela experiência do autor a inspeção de pequenos trechos do duto, em torno de 1000 metros, para a identificação de discontinuidades oriundas da operação do duto pode ser efetuada pela técnica de emissão acústica em função do comprimento máximo de cabo de sinal de emissão acústica estar situada na faixa de 500 m para sensores com frequência de 30 kHz. As discontinuidades tornam-se ativas acusticamente pelo incremento da pressão interna de operação do duto.

Yuyama [Yuyama, 1986] descreveu uma série de trabalhos realizados com a finalidade de estudar a capacidade do método de emissão acústica para a detecção e monitoração da corrosão, do trincamento por corrosão-sob-tensão e da corrosão-fadiga. As fontes de emissão acústica presentes durante estes processos de degradação do material, segundo a pesquisa realizada por Yuyama, estão descritas na figura 3.2. Em ligas de alumínio e

magnésio os testes laboratoriais demonstraram a existência de uma relação entre contagens e a quantidade de trincas de corrosão-sob-tensão.

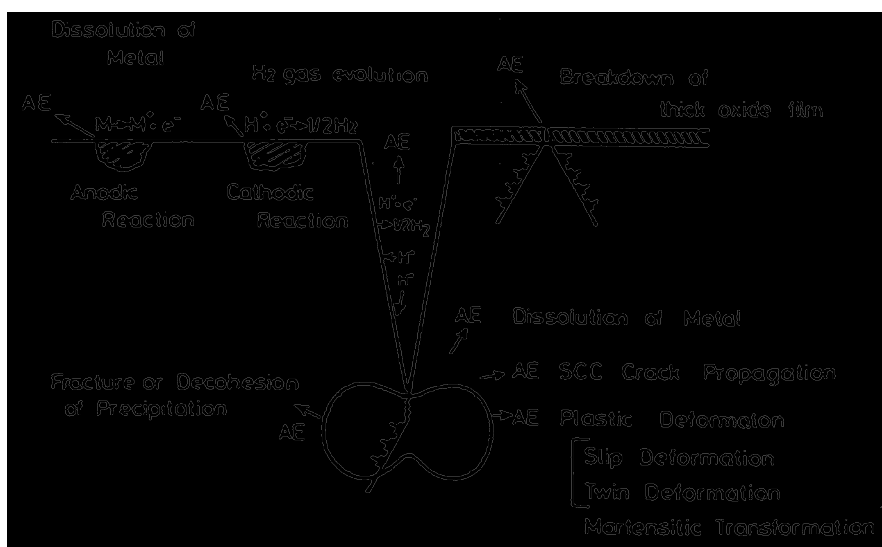


Fig. 3.2 – Fontes de emissão acústica durante os processos de corrosão, trincamento por corrosão sob tensão e corrosão fadiga. [Yuyama, 1986]

O ensaio de emissão acústica têm sido cada vez mais utilizado na inspeção de tanques de armazenamento óleos e derivados [van de Loo, 1988]. Em função desta grande utilização, as empresas Shell e Dow estudaram os resultados obtidos com o emprego de emissão acústica e publicaram em 1998, na 7ª Conferência Européia de Ensaio Não Destrutivos, um breve resumo do estudo da confiabilidade da inspeção de fundo de tanque com emissão acústica, visando a detecção de regiões onde esteja ocorrendo processo corrosivo. A metodologia do ensaio de emissão acústica em tanques de armazenamento consiste em instalar os sensores de emissão acústica no costado do tanque e após um período de 24 horas de interrupção da operação do tanque (fechamento de todos os dutos de carga e descarga do tanque) coletar os sinais provenientes dos processos corrosivos em andamento, caso existam. Os resultados de emissão acústica em fundos de tanque são fornecidos, geralmente, graduados em faixas conforme a tabela III.1. A classificação fornecida na tabela III.1 é obtida de forma semelhante a classificação do critério MONPAC, que será explicada no item III.5. A prioridade de manutenção recai sobre os tanques classificados como “E” enquanto que os tanques classificados como “A” não

necessitam de manutenção. As classificações “B”, “C” e “D” representam a diferença de priorização para manutenção entre as classes “A” e “E”. Para justificar a estratégia de manutenção com EA, foi realizado um estudo comparativo, para obter uma correlação entre emissão acústica e condição operacional, em uma população de 150 tanques. Ao final do estudo foi obtida uma ótima correlação para os casos extremos da tabela III.1 em função dos tanques classificados como “A” não necessitarem de reparo e os classificados como “E” necessitarem. [van de Loo, 1988]

Tabela III.1 - Classificação dos resultados de EA em fundos de tanque. [van de Loo, 1988]

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

A possibilidade de utilização do método de inspeção com a técnica de emissão acústica para avaliar os processos corrosivos em dutos enterrados foi estudada por Yuyuma [Yuyuma, 2003] em testes de laboratório e em testes de campo. Para a realização dos testes foram confeccionados corpos de prova com 270 mm de comprimento, 35 mm de largura e 2 mm de espessura (figura 3.3), retirados de chapa de teto de tanque de armazenamento. O corpo de prova identificado com o número “1” foi testado sem o filme de óxido resultante do processo corrosivo enquanto que os corpos de prova identificados com os números “2”, “3” e “4” não foram preparados superficialmente, ou seja, continham o filme de óxido resultante do processo corrosivo.

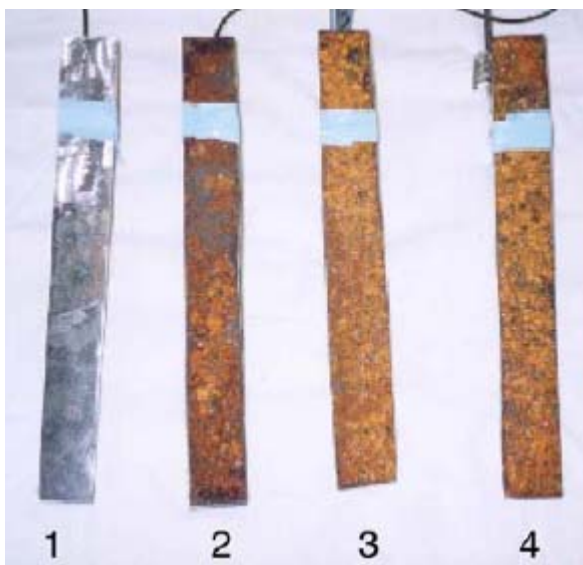


Fig. 3.3 – Corpos de prova antes do teste. [Yuyuma, 2003]

Os corpos de prova foram expostos à uma solução de água salgada à 3% para geração e coleta de sinais de emissão acústica (figura 3.4). Para a coleta dos sinais de emissão acústica foram utilizados ressonantes nas frequências 30 kHz, 60 kHz e 150 kHz. Durante os testes realizados foi constatado que os corpos de prova “2”, “3” e “4”, que continham o produto de corrosão, apresentaram sinais de emissão acústica de maior amplitude e que a atividade de emissão acústica medida pela quantidade de sinais detectada pelos sensores com centro de frequência em 30 kHz e 60 kHz foi superior a atividade detectada com o sensor com centro de frequência em 150 kHz. Yuyuma [Yuyuma, 2003] conclui que o processo corrosivo gerava sinais na banda de frequência entre 20 kHz e 80 kHz.



Fig. 3.4 – Corpos de prova em solução de água salgada à 3%. [Yuyuma, 2003]

A utilização da técnica de emissão acústica para a inspeção de tanques de armazenamento foi estudada por um grupo de pesquisadores japoneses, [Morofuji, 2003] para identificar as características principais dos sinais de emissão acústica oriundos de fenômenos de corrosão quando comparados aos sinais de outras fontes de emissão acústica, tais como trincas. Para este estudo foi utilizado um tanque de armazenamento de água de incêndio que esteve em serviço por 24 anos. Este tanque com 6 m de altura e 6,7 m de diâmetro tem uma capacidade de armazenamento de 200000 litros. Em uma região denominada *leak section* foram usinados furos com diâmetros 1 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm e 9 mm, conforme descrito na figura 3.5.

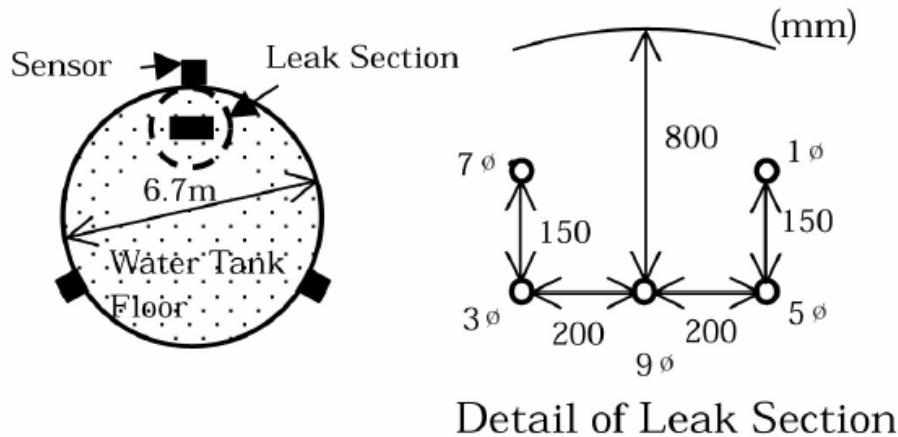


Fig. 3.5 – Descontinuidades inseridas em tanque de armazenamento. [Morofuji, 2003]

Os furos usinados foram tamponados e abertos em diferentes instantes durante o teste para poder simular diversos vazamentos. Nas figuras de 3.6 a 3.8 pode-se visualizar a diferença na quantidade de sinais, no valor de amplitude do sinal e no valor de energia do sinal para cada furo inserido no tanque, respectivamente, no momento do vazamento. Na figura 3.6 pode-se ver uma incongruência na quantidade de sinais para os furos usinados. A quantidade de sinais gerada pelo vazamento no furo de 3 mm, embora superior a quantidade de sinais do furo de 1 mm, é superior a quantidade de sinais do vazamento no furo de 5 mm. A quantidade de sinais dos vazamentos nos furos de 5 mm e 7 mm é semelhante embora superior a quantidade de sinais do vazamento do furo de 9 mm. Ao analisarmos a figura 3.6 pode-se notar uma tendência decrescente na quantidade de sinais entre os furos de 3 mm, 5 mm, 7 mm e 9 mm, porém a quantidade de sinais do vazamento para o furo de 1 mm é inferior. Em função destes resultados a identificação da dimensão do vazamento pela quantidade de sinais de emissão acústica não foi possível. Na figura 3.7 nota-se uma tendência do aumento da amplitude do sinal de emissão acústica com o incremento do furo do vazamento simulado. Na figura 3.8 nota-se que o aumento da energia dos sinais de emissão acústica com o aumento do diâmetro do furo do vazamento. O eixo vertical do gráfico da figura 3.6 varia de 0 a 50 para as condições sem vazamento e para os furos com diâmetros 1 mm, 3 mm, 5 mm e 7 mm. Para o furo de diâmetro 9 mm o eixo varia de 0 a 500. [Morofuji, 2003]

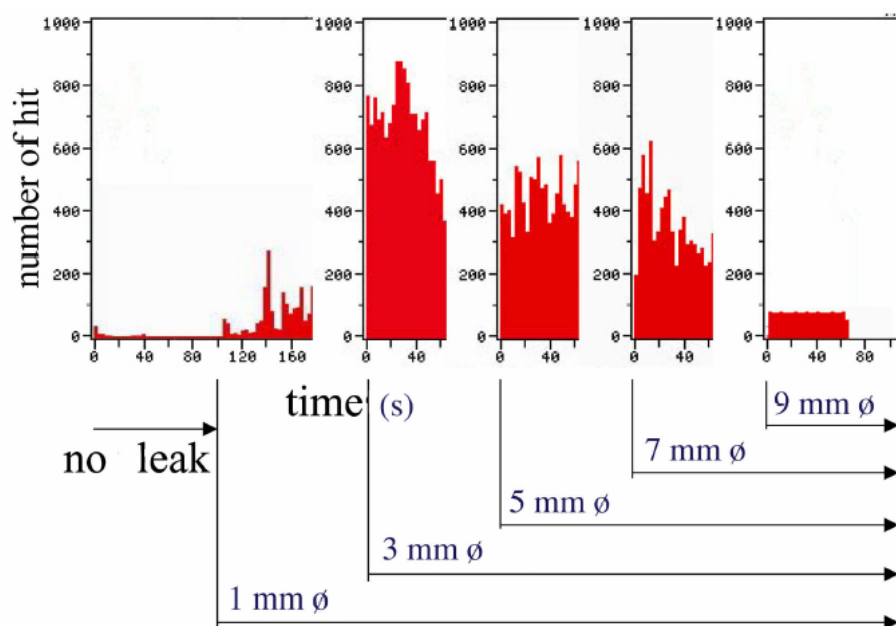


Fig. 3.6 – Gráfico sinais (*hits*) *versus* tempo de ensaio. [Morofuji, 2003]

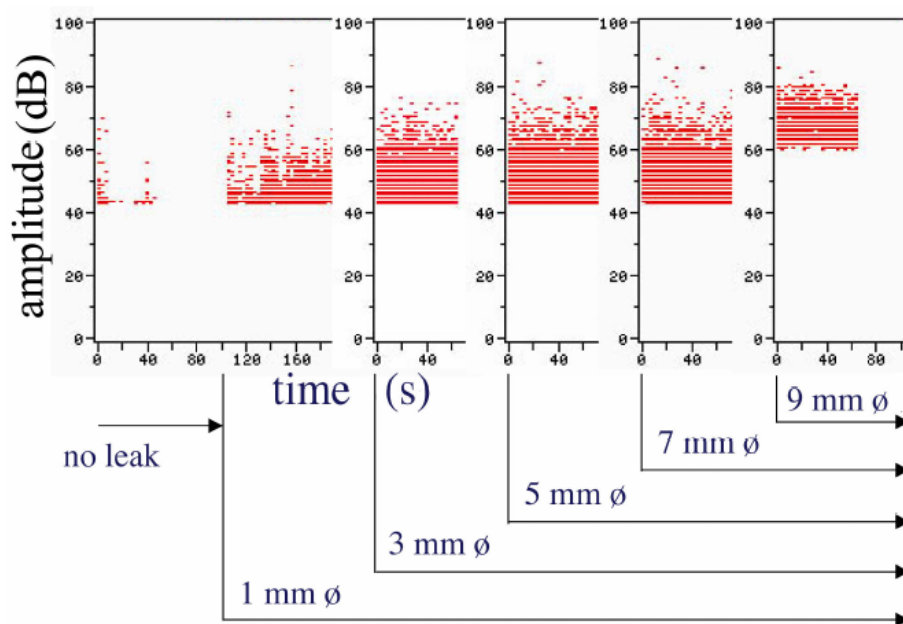


Fig. 3.7 – Gráfico amplitude *versus* tempo de ensaio. [Morofuji, 2003]

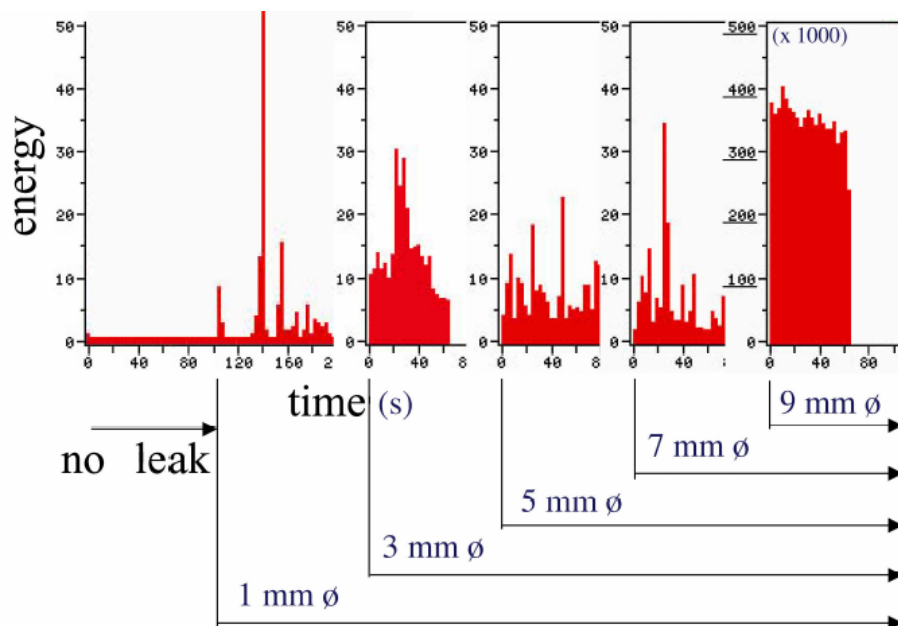


Fig. 3.8 – Gráfico energia *versus* tempo de ensaio. [Morofuji, 2003]

Analisando-se os valores de amplitude apresentados no gráfico da figura 3.7 até o instante 80 segundos pode-se afirmar que os sinais de emissão acústica oriundos de processos corrosivos são diferentes dos sinais provenientes de vazamentos (após 100 segundos). Esta análise permitiu a construção da tabela III.2 onde apresenta-se a relação entre o diâmetro do furo e a amplitude do sinal do vazamento para as condições de 2,0 m e 5,7 m de nível de água. Em função do nível de fluido e da amplitude dos sinais de emissão acústica pode ser feita uma estimativa do diâmetro do furo existente no tanque.

Tabela III.2 – Relação entre diâmetro do furo e amplitude do sinal de emissão acústica.
[Morofuji, 2003]

Diâmetro do furo com vazamento (mm)	Amplitude (dB)	
	Nível de água 2,0 m	Nível de água 5,7 m
1	43 – 48	43 – 48
3	43 – 50	43 – 60
5	43 – 55	43 – 70
7	43 – 60	43 – 70
9	43 – 60	Máximo 90

Sinais de emissão acústica oriundos de vazamentos de gás são proporcionais ao estímulo aplicado (pressão interna dos recipientes sob pressão) e a forma da fonte (dimensões do furo onde está ocorrendo o vazamento). Na figura 3.9 são apresentados sinais de emissão acústica provenientes de vazamentos em trechos de dutos de gás submetidos à pressão interna. A amplitude dos sinais apresenta uma variação diretamente proporcional a variação do carregamento com pressão interna, no intervalo de 0,10 MPa a 0,30 MPa. Na figura 3.10 são apresentados os valores de amplitude detectados em diferentes diâmetros e formas de furos com o incremento da pressão interna. A amplitude dos sinais aumenta com o diâmetro dos furos (figura 3.10a e figura 3.10b). A alteração no formato do furo (figura 3.10c e figura 3.10d) provoca o aumento da amplitude em função do furo de vazamento ser mais agudo. Na figura 3.11 são apresentados os espectros de frequência para sinais coletados nos furos com dimensões e formas descritas na figura 3.9. Pode-se notar o maior pico de frequência próximo à 400 kHz para os diâmetros 0,3 e 0,5 mm e o pico de frequência de 150 kHz para os furos em degrau com diâmetros 0,2 e 0,8 mm. [Yoshida, 2003]

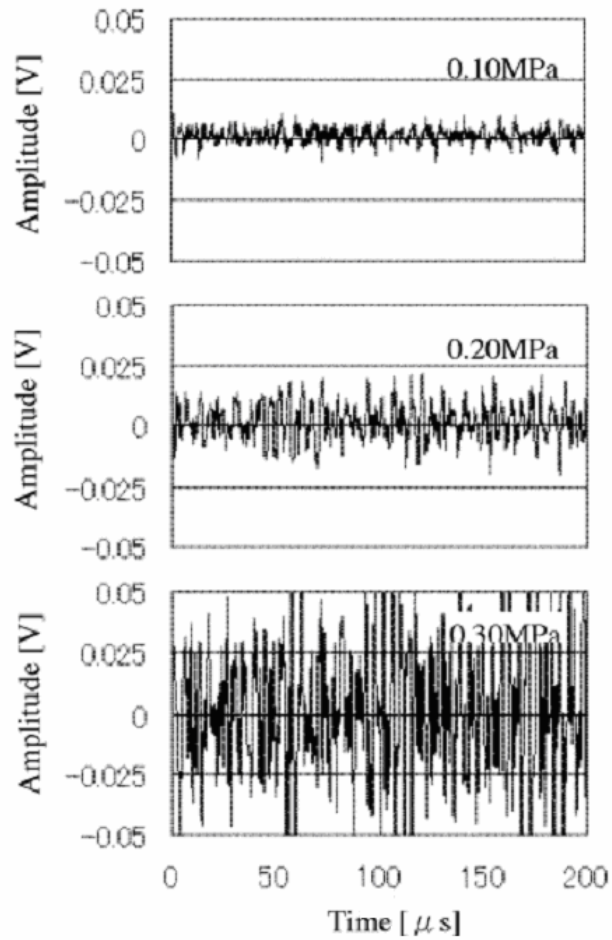


Fig. 3.9 – Formas de onda de sinais de emissão acústica detectados durante vazamento de gás nas pressões 0,10 MPa, 0,20 MPa e 0,30 MPa em furo com diâmetro 0,3 mm em espessura de parede 1,00 mm. [Yoshida, 2003]

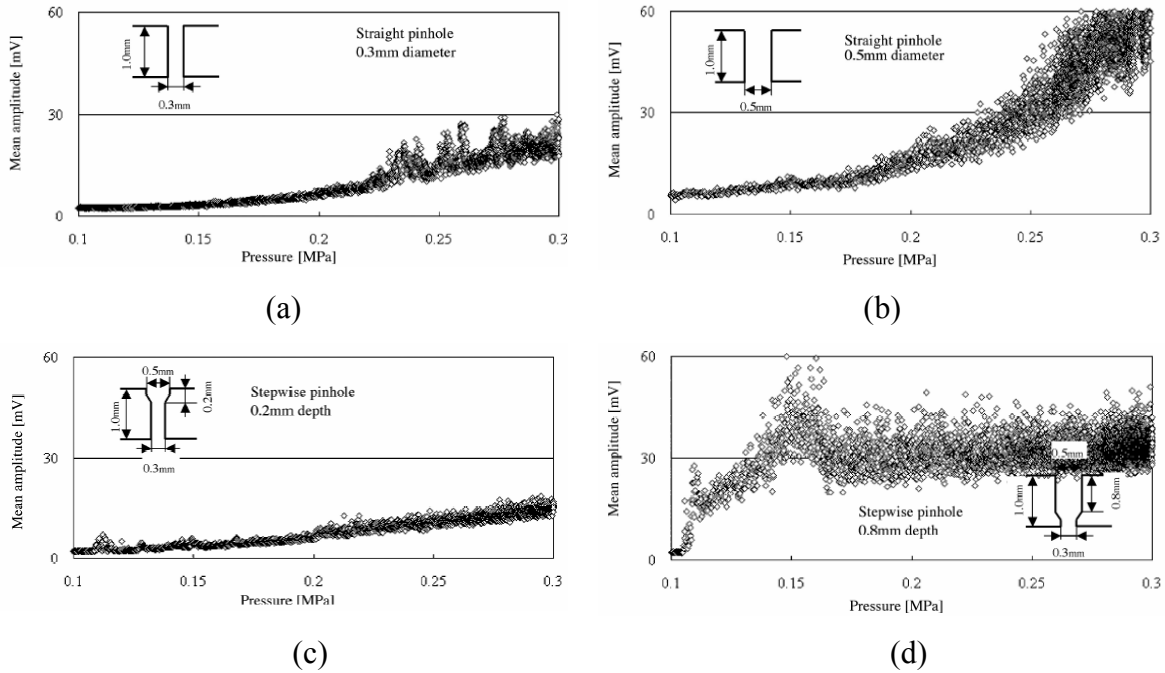


Fig. 3.10 – Gráficos pressão de vazamento *versus* amplitude: (a) diâmetro 0,3 mm; (b) diâmetro 0,5 mm; (c) furo em degrau diâmetro 0,2 mm; e (d) furo em degrau diâmetro 0,8 mm. [Yoshida, 2003]

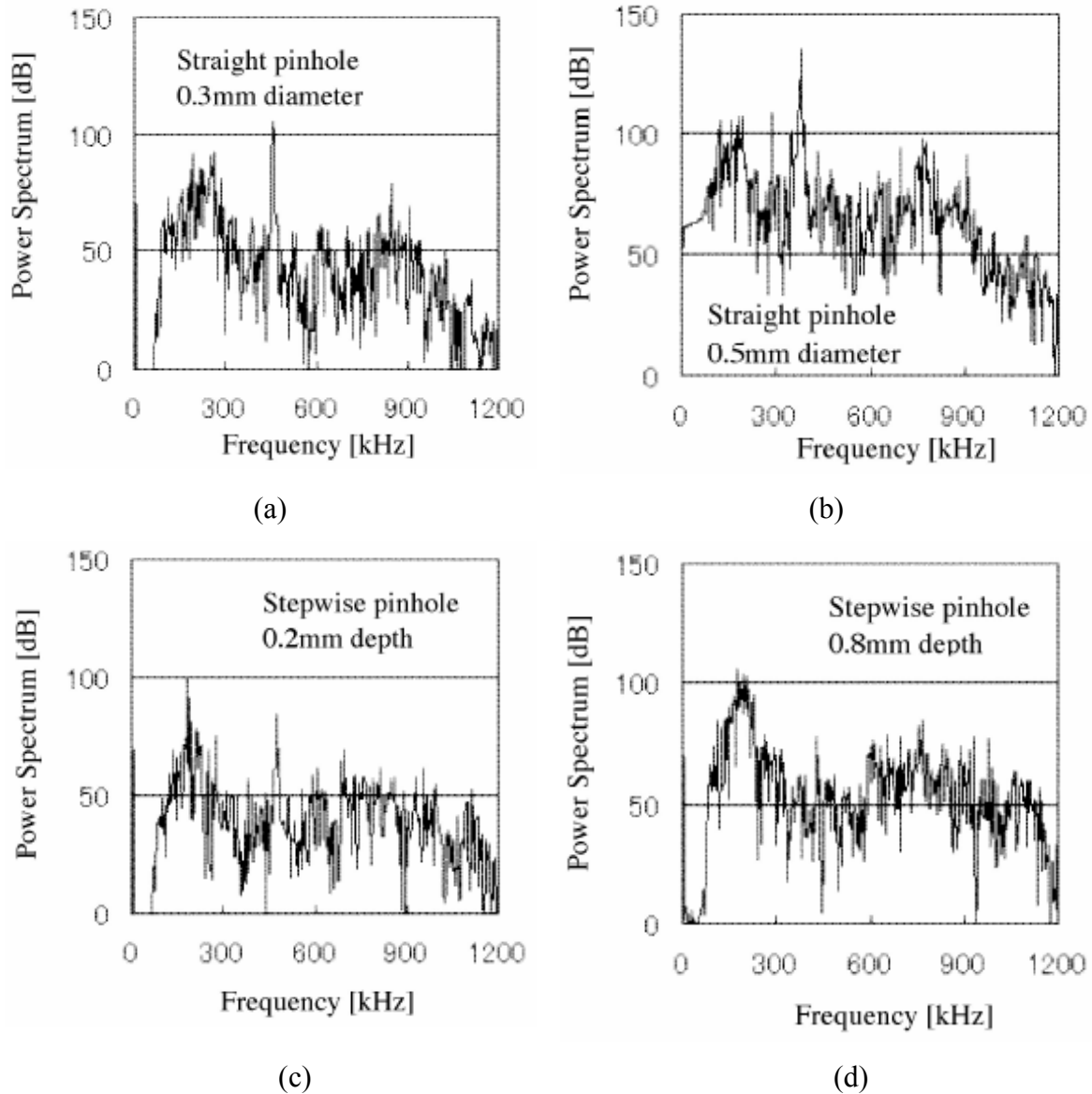


Fig. 3.11 – Espectro de frequência de formas de onda detectadas na pressão 0,30 MPa dos sinais da figura 3.10. [Yoshida, 2003]

III.4 Emissão acústica aplicada à detecção de descontinuidades em equipamentos submetidos à carregamentos com pressão interna

Pela experiência prática do autor a mais importante aplicação do método de inspeção com a técnica de emissão acústica consiste na inspeção de recipientes que contenham fluidos pressurizados, por exemplo, vasos de pressão.

Cilindros de armazenamento de gás podem ser inspecionados, no Brasil, utilizando-se os requisitos descritos na norma ABNT NBR 13199. O método de falha previsto para estes cilindros consiste no vazamento antes da ruptura, pois a profundidade do tamanho crítico do defeito é a maior que a espessura da parede do cilindro. Relata-se aqui, o resultado de uma inspeção onde a técnica de emissão acústica foi utilizada durante o monitoramento de carregamento cíclico de um cilindro com pressões internas na faixa de 0 a 300 Bar, com seis ciclos por minuto, para detectar, com antecedência, regiões que poderiam levar os cilindros a falha em serviço [Feres, 1996]. Na figura 3.12 apresenta-se a localização linear dos dados coletados em um monitoramento de um ensaio de fadiga. No eixo horizontal apresenta-se o cilindro como uma linha e no eixo vertical são apresentados os sinais de emissão acústica detectados. A região onde o vaso falhou no teste hidrostático pela presença de uma trinca foi identificada pelo método de emissão acústica e localizada próximo a 880 mm de uma das extremidades do cilindro. Esta região foi identificada no início do teste, aproximadamente 2% dos ciclos de carregamentos planejados. Outra forma de se obter a detecção prematura de danos em estruturas é o acompanhamento do somatório de contagens durante o ensaio. Na figura 3.13 são apresentados gráficos de somatório de contagens e a pressão ao longo do tempo de ensaio para um teste hidrostático realizado em um vaso de pressão destinado a aplicação como motor de um veículo lançador de satélites. Rápidos incrementos de atividade de emissão acústica durante testes reais são encarados como alarmes e sinalizam a necessidade de investigação acurada da sua origem. Durante o teste do motor de veículo lançador de satélite ocorreram dois momentos de rápido incremento de atividade, 60 segundos e 0,8 MPa e 540 segundos e 2,9 MPa, provocando a interrupção do teste hidrostático. Estes dois momentos de rápido incremento de atividade estão identificados nas figuras 3.13a e 3.13b. Ensaio não destrutivo após o teste hidrostático detectaram a presença de uma trinca com 30 mm de comprimento na superfície externa do motor. Nos dois casos apresentados houve a detecção antecipada da falha, 2% para o cilindro de armazenamento de gases e aproximadamente 30% para o motor de foguete. [Feres, 1996]

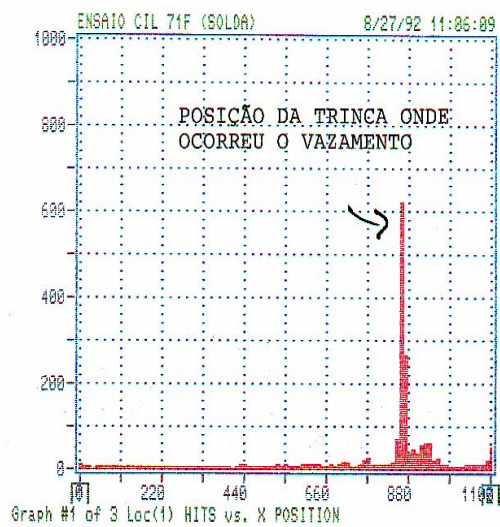
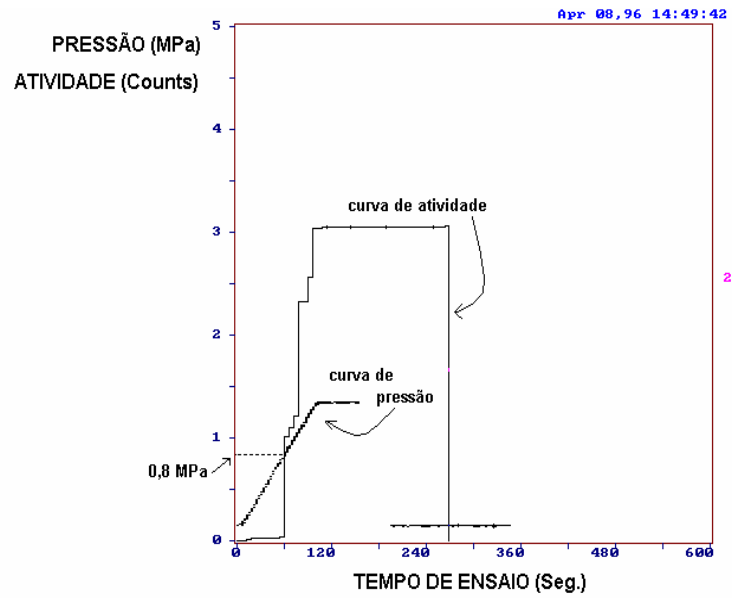
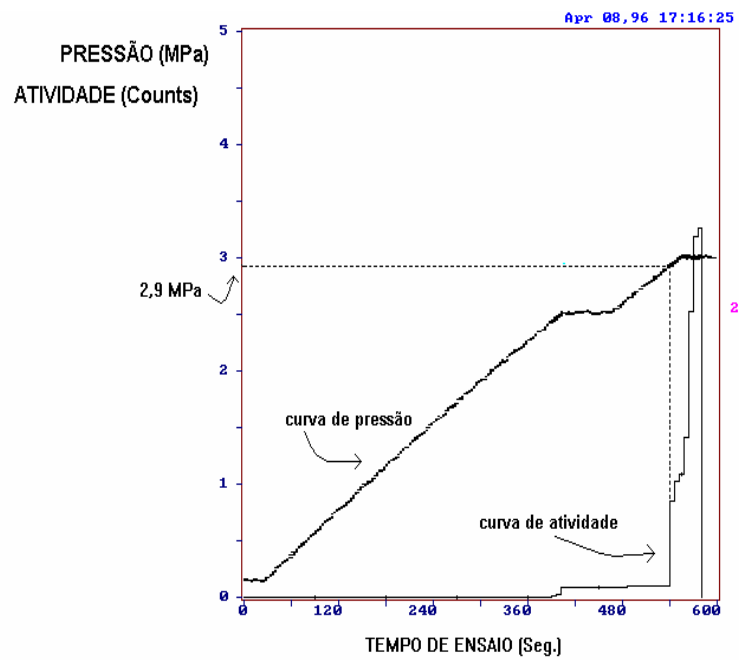


Fig. 3.12 – Gráfico de localização linear de monitoramento de ensaio de fadiga em cilindro de armazenamento de gases. Eixos: horizontal, localização linear; e, vertical, atividade de emissão acústica (quantidade de sinais). [Feres, 1996]



(a)



(b)

Fig. 3.13 – Gráficos de somatório de contagens (atividade) e pressão *versus* tempo para monitoração de teste hidrostático de motor de foguete aeroespacial: (a) primeiro incremento de atividade, pressão 0,8 MPa; e, (b) segundo incremento de atividade, pressão 2,9 MPa. [Feres, 1996]

A técnica de emissão acústica foi aplicada em uma fábrica de fertilizantes com a premissa de eficiência e rapidez para inspeção de sistemas de tubulação. A possibilidade de detecção prévia de possíveis áreas de falha aliada a redução do volume de serviço em parada programada de manutenção fez com que a técnica de emissão acústica fosse utilizada em conjunto com a técnica de líquidos penetrantes. A técnica de líquidos penetrantes forneceria a localização exata e as dimensões superficiais de discontinuidades detectadas pelo método de emissão acústica. A maior quantidade de falhas no sistema de tubulação inspecionado teve como causa o fenômeno de corrosão-sob-tensão. Foram inspecionadas 10 tubulações com diâmetros entre 4 e 20 polegadas sob temperatura na faixa de 40°C a 120°C, totalizando aproximadamente 220 metros. Foram identificadas, por emissão acústica, 40 regiões para avaliação complementar com líquidos penetrantes, sendo que desses 40 pontos apenas três apresentavam discontinuidades do tipo corrosão-sob-tensão. Constatou-se, também, a existência de mais 10 pontos com indícios de corrosão-sob-tensão dentro desta região que não foram detectados pelo método de emissão acústica, e outras três áreas fora da região inspecionada por emissão acústica. Concluiu-se que o método de emissão acústica não era apropriado para a detecção de danos do tipo corrosão-sob-tensão em sistemas de tubulação. [Evangelista, 2001]

Um vaso de pressão construído em escala geométrica 1:10 foi testado hidrostaticamente até a falha em dezembro de 1996 no *Sandia National Laboratories* [Beattie, 2003]. O teste foi monitorado por emissão acústica com o objetivo de detectar e localizar, em tempo real, aproximadamente, fontes de emissão acústica que poderiam acontecer no costado do vaso durante o teste. A instrumentação utilizada durante o teste consistiu de um equipamento *Spartan AT* (fabricado pela *Physical Acoustic Corp - PAC*) com 24 canais e sensores *PAC R15I* com pico de frequência em 150 kHz. Em ensaios convencionais de emissão acústica, eventos são localizados após pelo menos três sinais serem detectados em três sensores adjacentes (um sinal em cada sensor). No trabalho desenvolvido no *Sandia National Laboratories* este conceito foi modificado para seis sinais em seis sensores. Foram considerados 446 eventos de emissão acústica neste teste com este novo critério. Os eventos foram agrupados quando a posição entre dois eventos estava contida em um círculo de 100 mm de diâmetro. Na figura 3.14 apresenta-se o resultado

encontrado em um dos agrupamentos de sinais do teste realizado no vaso de pressão em escala reduzida. A região onde ocorreu a falha no vaso de pressão em escala reduzida foi detectada com a pressão em torno de 3,5 MPa, para uma falha com pressão de 4,62 MPa [Beattie, 2003]. A detecção antecipada da região de falha, 75% da máxima pressão (3,5 MPa em relação a 4,62 MPa) demonstrou a capacidade do método de emissão acústica para a avaliação da integridade estrutural do equipamento ensaiado.



Fig. 3.14 – Trincas na pintura na superfície externa do vaso de pressão em escala reduzida. A linha curva delimita a extremidade de um dos agrupamentos de sinais encontrados na análise dos dados de emissão acústica. [Beattie, 2003]

III.5 Emissão acústica aplicada à integridade estrutural

A manutenção da integridade estrutural, por intermédio da detecção de trincas de fadiga em plataformas *off-shore*, poderia ser obtida com o a utilização do método de inspeção com a técnica de emissão acústica, segundo Allevato e Carneval [Allevato, 1982]. O obstáculo principal para a correta implantação do ensaio de emissão acústica era a pequena capacidade de armazenamento nos computadores no início da década de 80. 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. [Allevato, 1982]

Blackburn [Blackburn, 1988] desenvolveu em 1988 um procedimento de teste de cilindros de distribuição de gases industriais montados em caminhões utilizando as técnicas de emissão acústica e ultra-som, para o mercado norte-americano. Os cilindros são fabricados com tubos de aço Cr - Mo, com 558,8 mm de diâmetro, 12,7 mm de espessura e 10,4 m de comprimento conforme a especificação do Departamento de Transporte (DOT) dos Estados Unidos da América. O DOT, antes do procedimento proposto por Blackburn, requeria um teste hidrostático a cada cinco anos para manter o cilindro em operação. Inicialmente foi determinada, com o auxílio da mecânica da fratura, a profundidade mínima de defeito que deveria ser detectada para o cilindro não falhar durante o serviço, ou seja, nas etapas de carga, transporte e descarga de gases (ciclo de três dias). A profundidade mínima de defeito foi considerada como a dimensão da descontinuidade que após cinco de anos de serviço faria com que o cilindro falhasse em serviço. Com base em corpos de prova laboratoriais do tipo CT foram estimados os valores dos parâmetros de emissão acústica (eventos e amplitude) que caracterizavam as descontinuidades que deveriam ser detectadas. As regiões indicadas pelo ensaio de emissão acústica eram inspecionadas pelo método ultra-sônico para determinação das dimensões das descontinuidades. Após a determinação das dimensões das descontinuidades analisa-se a possibilidade de manutenção ou não do cilindro em operação. Durante os testes realizados foi possível identificar, para os cilindros de distribuição de gases, uma relação entre picos de amplitude e tipos de descontinuidade, conforme descrito na tabela III.3. [Blackburn, 1988] Os sinais de emissão acústica provenientes de contatos mecânicos e crescimento de trincas de fadiga, segundo Blackburn, apresentam praticamente a mesma faixa de valores de amplitude. Os sinais de escamas desbastadas (óxidos não aderidos à parede dos equipamentos inspecionados) apresentam uma extensa faixa de amplitude que abrange os sinais de corrosão externa, contato mecânico e crescimento de trinca de fadiga. A utilização somente do parâmetro amplitude não permite a identificação da natureza da fonte de emissão acústica nos cilindros inspecionados.

Tabela III.3 - Relação entre picos de amplitude e fontes de emissão acústica. [Blackburn, 1988]

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

O ensaio de emissão acústica seria conduzido para indicar regiões ativas acusticamente. As regiões indicadas deveriam ser inspecionadas por métodos pontuais de ensaios não destrutivos para detectar, dimensionar e definir a morfologia das descontinuidades. Após a caracterização da descontinuidade cálculos de mecânica da fratura eram realizados para a definição da manutenção ou não da carreta em serviço. Aliado ao fato do teste ser conduzido em serviço, durante o carregamento da carreta, o cilindro de armazenamento não era contaminado com fluido diferente do fluido de serviço, retirando de serviço apenas as carretas que apresentassem sinais de danos durante a inspeção com emissão acústica. Os parâmetros utilizados para a identificação de descontinuidades nas carretas foram identificados em testes laboratoriais conduzidos em corpos de prova do tipo tensão compacto. [Blackburn, 1988]

Para o estabelecimento de correlações envolvendo resultados de emissão acústica e criticidade de descontinuidades estudos devem ser realizados para verificar os níveis de emissão e os valores correspondentes obtidos para as propriedades de tenacidade dos materiais. Testes de CTOD (*crack tip opening displacement*) foram realizados em 1990 acompanhados por emissão acústica [Camerini, 1990] com o objetivo de verificar a existência ou não de um comportamento padrão e repetitivo para propagação de trincas em aços estruturais. Os resultados obtidos indicaram a capacidade de detecção de trincas antes do valor do CTOD de iniciação ser obtido, embora os sinais gerados pelas trincas fossem de baixa intensidade. Neste estudo foi utilizado o aço ASTM A 516 Grau 60, material típico para a construção de vasos de pressão, nesta época, por apresentar alta tenacidade. Corpos

de prova foram confeccionados para o ensaio de CTOD em quatro pontos. A instrumentação de emissão acústica utilizada consistia de um equipamento PAC 3004 com sensores R15 (frequência de ressonância 150 kHz). Os testes foram acompanhados por meio dos gráficos descritos na tabela III.4. Na figura 3.15 apresenta-se um exemplo dos gráficos citados na tabela III.4

Tabela III.4 – Gráficos para acompanhamento de ensaios de CTOD monitorados com emissão acústica. [Camerini, 1990]

Gráfico	Objetivo
Eventos <i>versus</i> localização linear	Identificar a quantidade de sinais localizados de emissão acústica no corpo de prova
Eventos <i>versus</i> tempo	Identificação dos momentos de maior atividade durante o ensaio
Eventos acumulativo <i>versus</i> tempo	Identificar a atividade acústica total em função do tempo
Eventos <i>versus</i> energia	Verificar a distribuição de eventos em função do parâmetro energia
Amplitude <i>versus</i> tempo	Identificação dos momentos de maior amplitude durante o ensaio
Eventos <i>versus</i> amplitude	Verificar a distribuição de eventos em função do parâmetro amplitude
Eventos <i>versus</i> tempo de subida	Verificar a distribuição de eventos em função do parâmetro tempo de subida
Eventos <i>versus</i> duração	Verificar a distribuição de eventos em função do parâmetro duração

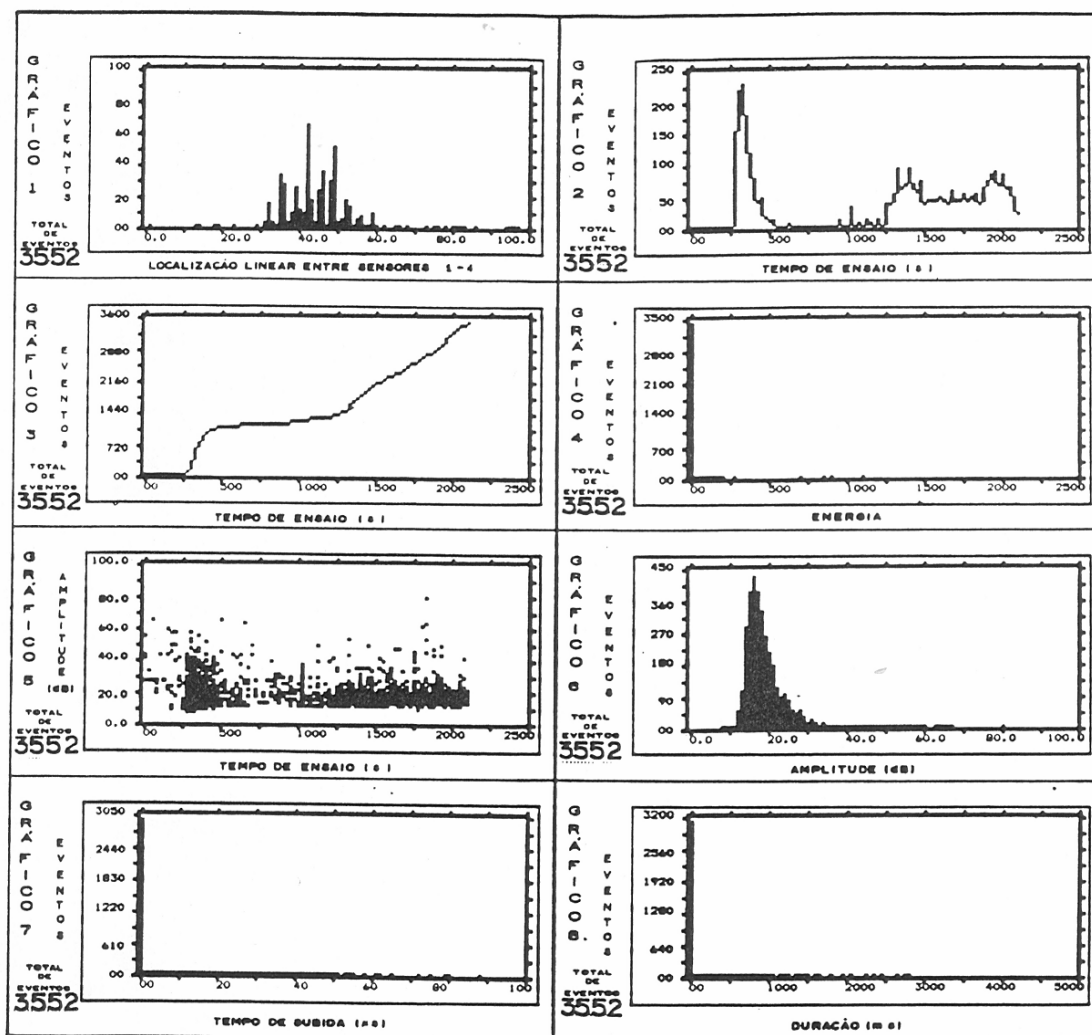


Fig. 3.15 – Gráficos de acompanhamento de testes de emissão acústica. [Camerini, 1990]

Os primeiros dois testes realizados por Camerini [Camerini, 1990] detectaram poucos sinais de emissão acústica e apenas um evento na região da trinca inserida no corpo de prova. Após um incremento de 15 dB no ganho de amplificação o terceiro teste foi realizado, com este novo ajuste foi possível detectar sinais na região do entalhe que continha a trinca no corpo de prova. O limite de referência do sistema foi alterado de 40 dB para 12 dB e a maioria dos sinais detectados estava entre 19 dB e 20 dB.

Foram realizados testes para a comprovação do efeito *Kaiser* e determinação do correto funcionamento da instrumentação. Testes com carregamento cíclico na região elástica de

carregamento comprovaram a baixa atividade acústica em cargas inferiores às anteriormente aplicadas.

Nos corpos de prova testados com a metodologia do ensaio de CTOD foram detectados dois momentos de forte atividade acústica além do comportamento de queda da amplitude com o decorrer do ensaio (incremento de carga). Os dois momentos de intensa atividade acústica identificados por Camerini [Camerini, 1990] aconteciam um com grande antecedência ao colapso do corpo de prova e outro no colapso do corpo de prova. Buscou-se a relação entre o primeiro momento de intensa atividade acústica e o valor de CTOD de iniciação (CTOD de início de propagação da descontinuidade inserida). Identificou-se que o maior instante de atividade acústica acontece com valores de CTOD muito inferiores ao CTOD de iniciação e quando a carga do CTOD de iniciação era alcançada a atividade acústica estava em acentuado declínio. Camerini levantou dúvidas em relação aos procedimentos utilizados em escala industrial que utilizam limiar de referência do sistema ajustado para 40 dB em função da grande maioria dos sinais detectados estarem na faixa de 20 dB. Outra consideração importante feita por Camerini diz respeito ao uso do parâmetro energia como critério de rejeição, uma vez que os sinais detectados oriundos da região da trinca nos corpos de prova apresentavam baixa energia. Nos testes realizados foi possível detectar emissão acústica nos corpos de prova com origem microscópica. Dentre as conclusões apresentadas por Camerini, destacam-se: a) os sinais gerados pela trinca em propagação eram de baixa amplitude, tendo valor médio 20 dB; b) parâmetros do tipo energia, tempo de subida, duração e contagem não se mostraram eficientes na detecção do defeito em propagação; c) era necessário fazer uma revisão dos equipamentos eletrônicos para permitir a detecção dos sinais; d) o valor de CTOD aplicado quando iniciava-se a detecção de forte atividade acústica era no mínimo três vezes menor que o valor do CTOD de iniciação; e e) a técnica de emissão acústica detectava defeitos estruturalmente relevantes.

A detecção de sinais de emissão acústica antes do valor de CTOD de iniciação ser atingido pode significar que a metodologia empregada permite a detecção da propagação de descontinuidades antes das descontinuidades serem detectadas pela metodologia de

determinação do CTOD de iniciação. Este fato comprovaria relatos bibliográficos [Miller, 1987] da possibilidade de detecção de movimentos de discordâncias e outros mecanismos microscópicos de deformação.

Long, Cai e Svensson [1999] utilizaram o método de emissão acústica na determinação do início de propagação de trincas em aços 9Cr-1Mo. Para realização deste estudo foram confeccionados corpos de prova para dobramento com três apoios. Os ensaios realizados permitiram concluir que a técnica de emissão acústica pode ser usada para determinar a tenacidade à fratura e monitorar o processo de fratura neste tipo de material. [Long, 1999]

Após a entrada em serviço os equipamentos apresentam, invariavelmente, com o tempo o fenômeno da degradação, descontinuidades são nucleadas e propagadas. Os códigos de projeto não são mais adequados para a definição dos métodos de inspeção e dos respectivos critérios de aceitação/rejeição de descontinuidades. Avaliações usando conceitos de engenharia devem ser feitas para garantir ou não a operação de equipamentos na presença de descontinuidades. A prática recomendada *API 579* publicada pelo *American Petroleum Institute (API)* foi desenvolvida para fornecer as diretrizes para a condução destas análises de engenharia que são necessárias na indústria de refino e petroquímica em equipamentos tais como vasos de pressão, tubulações e tanques. Uma visão geral do procedimento proposto pela *API 579* é apresentada na figura 3.16 [Anderson, 2000]. O gráfico da figura 3.16, chamado de diagrama FAD (*Failure Analysis Diagram*) é composto de dois eixos: *load ratio* e *toughness ratio*, abcissa e ordenada, respectivamente. Após a detecção e dimensionamento das descontinuidades, faz-se uma análise das tensões aplicadas na região da descontinuidade e calcula-se o parâmetro L_r , uma razão entre tensão aplicada na descontinuidade e a tensão limite de escoamento do material. A tensão aplicada na descontinuidade é calculada por equações pré-determinadas para as geometrias de descontinuidades existentes. O fator de intensidade de tensões K_I é calculado em função das tensões aplicadas na região da descontinuidade e das dimensões das descontinuidades. Após a determinação de K_I calcula-se o parâmetro K_r , uma razão entre o parâmetro K_I e a tenacidade à fratura do material em teste. O lugar geométrico no diagrama FAD determinado pelo par (L_r, K_r) define a criticidade da descontinuidade em análise e está

identificado na figura 3.16 como *assessment point*. As descontinuidades são consideradas aceitáveis se o lugar geométrico definido pelos parâmetros L_r e K_r estiver contido dentro do diagrama, caso contrário a descontinuidade é considerada inaceitável e ações devem ser empreendidas para reparo ou alteração das condições de operação que permitam a manutenção da descontinuidade sem prejuízo da segurança operacional. A região inferior direita do diagrama, altos valores de L_R , indica a possibilidade de colapso plástico da estrutura. A região superior esquerda do diagrama, altos valores de K_R , indica a possibilidade de fratura frágil da estrutura analisada.

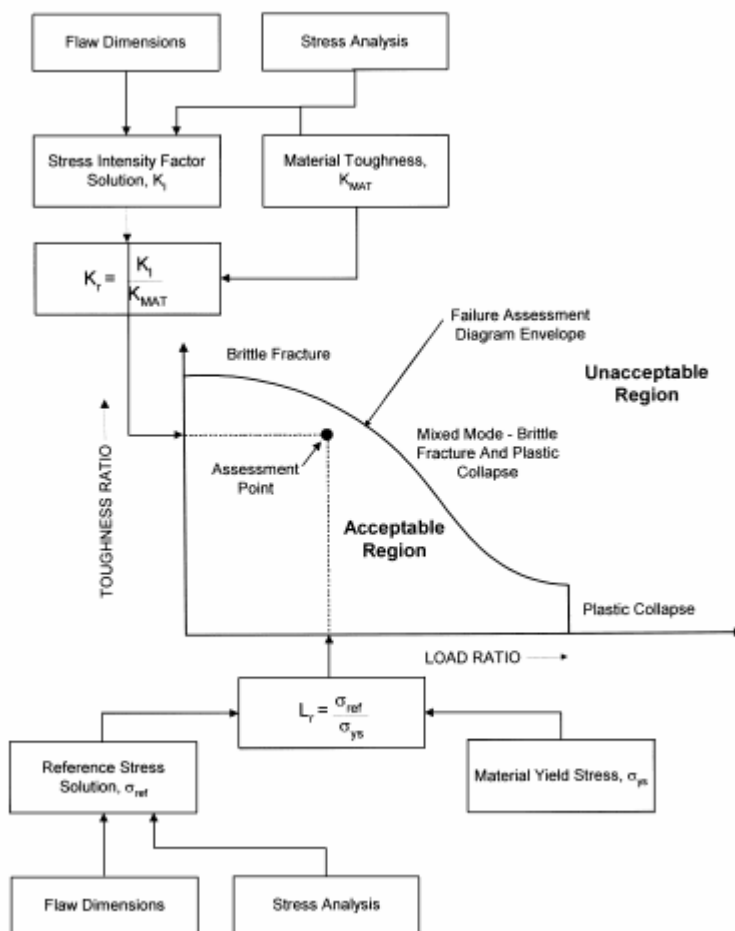


Fig. 3.16 – Fluxograma básico de aplicação da norma API 579. [Anderson, 2000]

As análises conduzidas em acordo com a *API 579* podem ser efetuadas em três níveis. No primeiro nível de análise a quantidade de informações do componente em questão e a quantidade de dados de inspeção são mínimos, e como resultado tem-se uma análise

conservadora. Para o segundo nível de análise são necessárias as mesmas informações utilizadas no primeiro nível, porém, os métodos de cálculo são mais detalhados, como resultado tem-se uma análise menos conservadora. Para o terceiro e último nível de análise são necessárias informações mais detalhadas do componente em análise e os métodos de cálculo são baseados em técnicas numéricas, por exemplo, elementos finitos. No apêndice F do *API 579* podem ser encontradas as propriedades mecânicas e as propriedades de resistência à fratura (tenacidade) de vários materiais. Quando estes valores não estão presentes, são fornecidas relações adaptadas do código *ASME* para estimar os valores mínimos destas propriedades. Por exemplo, para carregamentos estáticos sem a presença de hidrogênio, o valor de tenacidade à fratura K_{IC} para uma dada temperatura T pode ser estimado pela equação III.1:

$$K_{IC} = 36,5 + 3,084^{0,036(T - T_{ref} + 56)} \quad (III.1)$$

onde T_{ref} é a temperatura de transição, no caso de aços carbono. Para análises probabilísticas de mecânica da fratura, o documento *API 579* recomenda o uso da curva Mestra implementada pela norma *ASTM E 1921-97* [Anderson, 2000] e descrita por Rosinski e Server [Rosinski, 2000]. A curva Mestra permite a estimativa do valor de K_{IC} a partir de dados de ensaios *Charpy* realizados no mesmo material. Em função da temperatura de trabalho pretendida estima-se o parâmetro de tenacidade à fratura.

Testes realizados em vasos de pressão construídos com fibras de *Kevlar* e resina epóxi, [Chelladurai, 2000] revestido com titânio, para aplicações aeroespaciais, demonstraram a capacidade de detecção da falha com 30% da pressão de ruptura. Os parâmetros de emissão acústica que permitiram esta predição foram a razão *Felicity* e amplitude do sinal. Os valores característicos destes parâmetros que permitiram a estimativa da integridade estrutural foram 66 dB e 0,9, para amplitude e razão *Felicity*, respectivamente. As regiões identificadas por emissão acústica foram inspecionadas com o método radiográfico e foi encontrada uma correlação entre os métodos. Os extensômetros instalados nas regiões críticas dos vasos ensaiados não permitiram o estabelecimento de relação entre as medidas de deformação e os parâmetros de emissão acústica.

Corpos de prova tensão compacto foram confeccionados em aço típico de construção de pontes metálicas para coletar dados de resistência à fadiga e emissão acústica com o objetivo de estudar e propor uma relação entre esses parâmetros. Sinais de emissão acústica foram coletados usando sensores de 300 kHz e 550 kHz. A amplitude do sinal de emissão acústica não apresentou proporcionalidade com o fator de intensidade de tensão, sendo assim, o parâmetro amplitude foi descartado para a avaliação e predição das dimensões de trincas. O parâmetro energia apresenta um incremento correlacionado com o incremento dos ciclos de fadiga, como pode ser visto na figura 3.17 para os ciclos de fadiga com frequências 1, 2 e 4 Hz. Análises estatísticas com a metodologia de componentes principais demonstraram que o parâmetro energia apresenta a maior contribuição na estimativa do fator de intensidade de tensão [Yoon, 2000]. Embora Yoon tenha citado dois tipos de sensores (com frequências centrais 300 kHz e 550 kHz), o artigo escrito não explicita qual sensor foi utilizado para a apresentação dos dados da figura 3.17. O grande desvio padrão dos valores de energia coletados com o ciclo de fadiga com frequência 1 Hz foi explicado por Yoon [Yoon, 2000] como sinais de baixa amplitude gerados pela baixa frequência do carregamento de fadiga que ultrapassaram o limite de detecção proporcionando a detecção pelo sensor de emissão acústica, ou seja, sinais espúrios.

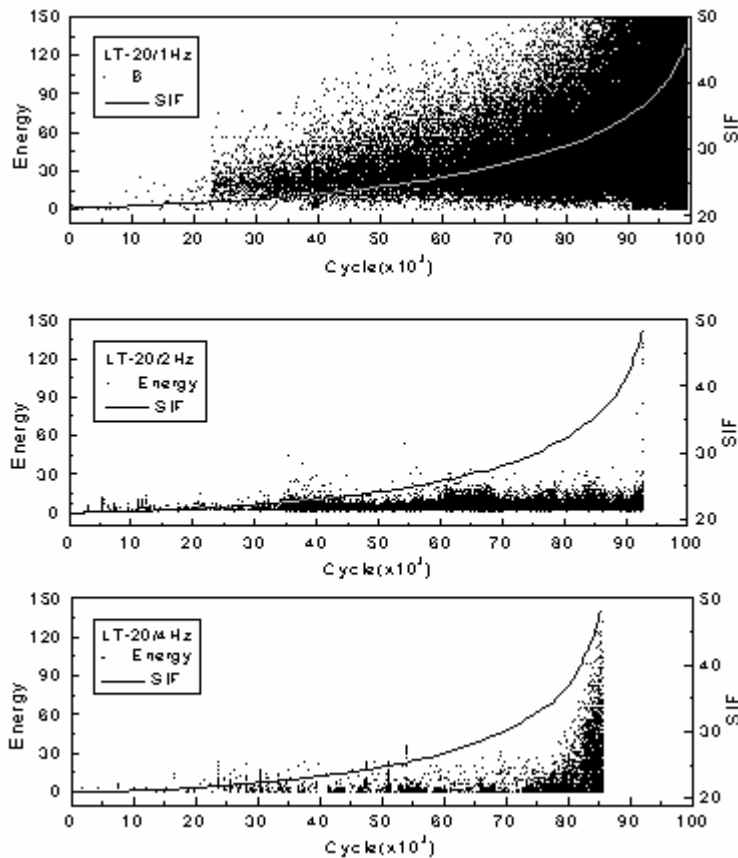


Fig. 3.17 – Energia do sinal de emissão acústica e fator de intensidade de tensão em função do ciclo de fadiga para corpo de prova com 12 mm de espessura, para ciclos de fadiga com 1, 2 e 4 Hz. [Yoon, 2000]

Quando um processo dinâmico ocorre em um dado material, uma parcela da energia que é liberada sob a forma de ondas de tensão elástica atinge a superfície do material. A proporção de energia que é liberada nas ondas de tensão elástica depende da natureza da fonte, de sua localização e dimensão e o tempo de emissão do sinal. Nos materiais de uso corrente em engenharia as ondas de tensão propagam sob a forma longitudinal e transversal. O contato com a superfície externa propicia as conversões de modo e conseqüente geração de outras formas de propagação, as ondas superficiais. Em função do exposto pode-se admitir uma relação entre a tensão local, a abertura da trinca na sua extremidade e a área da descontinuidade. A identificação e caracterização da fonte de emissão acústica podem ser obtidas utilizando diversos métodos, dentre os quais: análise da

forma de onda no domínio do tempo e no domínio da frequência, correlações com o ciclo de carregamento, padrões de irradiação da fonte. [Scruby, 2001]

Embora o método de inspeção com a técnica de emissão acústica seja empregado, industrialmente, há mais de 30 anos, os critérios de avaliação de resultados são baseados empiricamente em relações envolvendo os parâmetros básicos coletados durante o teste (energia, contagens, amplitude, etc.). A normalização dos procedimentos de teste fornece os critérios de aceitação de forma generalista, sem citar numericamente os valores para aceitação ou não de uma região ensaiada.

Em um trabalho conduzido pela *Vienna University of Technology* [Bayray, 2001] para estudar as formas de onda de sinais de emissão acústica em vasos de pressão foram coletados sinais de fontes simuladas de emissão acústica (quebra de barra de grafite) durante carregamento cíclico com pressão interna. O vaso de pressão com comprimento 2000 mm, diâmetro 600 mm, espessura 5 mm e construído em aço foi instrumentado com cinco sensores e instrumentação alemã fornecida pela *Vallen Systeme*. Durante a coleta de dados foram identificadas diversos ruídos que posteriormente foram atribuídos a: partida e parada do sistema hidráulico de pressurização; vibração mecânica da entrada do fluido de pressurização no vaso; fricção do selo de borracha utilizado para vedação de uma janela de inspeção. Para a eliminação dos ruídos foram utilizados: filtros de tempo para a partida do sistema hidráulico; filtros de localização para eliminar os sinais provenientes da região do selo; e, filtros de amplitude para eliminar sinais com amplitude igual ou inferior a 40 dB que não representariam nenhuma localização de sinais de emissão acústica. A utilização dos filtros proporcionou uma redução de aproximadamente 20% na quantidade total de dados. O estudo realizado indicou, como conclusão, a necessidade de utilização de técnicas de transformada de *Fourier* com variação do espaço de tempo de transformação como uma possível ferramenta para automatização da análise das formas de onda de sinais de emissão acústica.

Durante o teste hidrostático [Feres, 2001] de uma autoclave instalada na Refinaria Gabriel Passos ocorreu uma fratura na parte superior de sua região cilíndrica. A

consequência desta falha foi a parada de produção por 30 dias e perda de 40% da capacidade de produção da refinaria. Em função do ocorrido, cuidados adicionais foram considerados com o objetivo de evitar maiores prejuízos e adição de danos. As principais medidas foram: adicionar monitoramentos através do ensaio de emissão acústica durante provas de cargas e partidas do equipamento e a análise de criticidade nas regiões identificadas pelo ensaio de emissão acústica. Durante os monitoramentos executados na autoclave foi identificado que em função da condição de teste, temperatura ambiente (entre 15°C e 25°C) ou condição de serviço (temperatura próxima a 80°C), a criticidade das regiões indicadas pelo critério MONPAC variava de “D” ou “E” para “C”, respectivamente. A classificação dos dados de emissão acústica é efetuada considerando dois parâmetros: *historic index* e *severity*. O parâmetro *historic index* está relacionado com a evolução da atividade durante o ensaio de emissão acústica e o parâmetro *severity* está relacionado com a energia dos sinais de emissão acústica. Estes parâmetros são estimados em intervalos de tempo definidos pelo programa de análise de dados MONPAC e em função de sua combinação fornecem um resultado conforme a tabela III.5. O critério MONPAC, desenvolvido pela associação das empresas MONSANTO e *Physical Acoustics Corporation* – PAC, envolve a coleta e análise de dados de emissão acústica em condições controladas de pressurização e ajustes da instrumentação utilizada. Para facilitar a interpretação dos resultados, os parâmetros *historic index* e *severity* são apresentados em gráficos com cinco regiões distintas que representam a ação que o proprietário do equipamento ensaiado deve empreender. A figura 3.18 apresenta um resultado típico da análise de dados com o critério MONPAC. Neste gráfico os valores obtidos para os parâmetros *historic index* e *severity* por cada sensor utilizado são apresentados. O gráfico é dividido em seis regiões: *no significant emissions*, A, B, C, D e E. Em função da classificação obtida por cada canal, o critério MONPAC estabelece ações conforme a tabela III.5. Os ensaios de emissão acústica classificados como “D” e “E” requerem a realização de ensaios não destrutivos para a detecção e o dimensionamento das descontinuidades porventura existentes. As regiões indicadas por emissão acústica foram inspecionadas por ultra-som e as descontinuidades detectadas dimensionadas para a realização de cálculos de mecânica da fratura conforme o nível 2 de análise da norma BS 7910:1999. Verificou-se com esta análise que os momentos de partida e resfriamento da autoclave eram mais

críticos do ponto de vista estrutural que próprio regime de operação. Em função disto foi proposta a operação da autoclave na temperatura de 80°C e a recomendado reduzir ao máximo as paradas do equipamento, para não comprometer a vida útil do mesmo. Estas conclusões foram possíveis em função do resultado do ensaio de emissão acústica suportado pela análise da mecânica da fratura. [Feres, 2001]

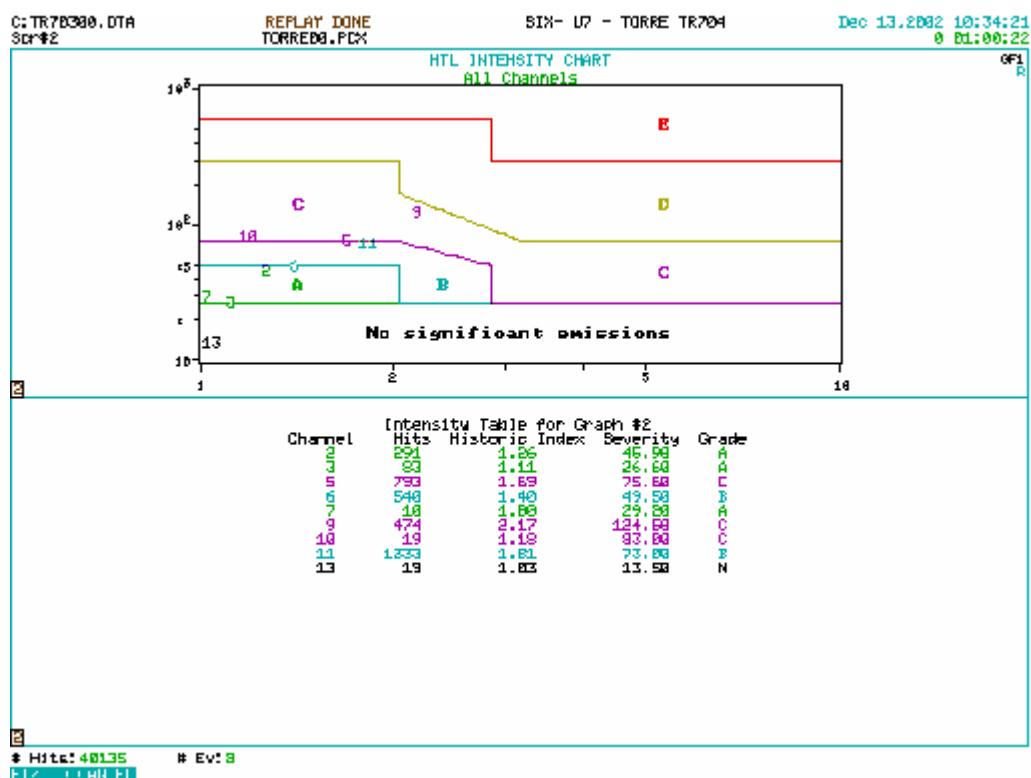


Fig. 3.18 – Exemplo típico de gráfico do critério MONPAC. [Soares, 2004]

Tabela III.5 – Classificação das áreas ativas. [Feres, 2001]

Intensidade	Ação recomendada
A	Nenhuma ação recomendada.
B	Registrar para referências em futuros monitoramentos.
C	Nível de atenção, recomendado diminuir intervalo entre inspeções.
D	Indicação da presença de defeitos. Aplicar ensaios não destrutivos.
E	Presença de defeitos significativos, aplicar ensaios não destrutivos.

A norma japonesa *JIS Z 2342-2002 Method for acoustic emission testing of pressure vessels during pressure tests and classification of test results* [opus cit Mori, 2003] propõe um método de análise dos dados de emissão acústica baseado em concentração de eventos e somatórios de energia e contagens, relacionados com a pressão de teste. Na figura 3.19 apresenta-se, de forma resumida, o fluxograma para análise de dados segundo a norma *JIS Z 2342-2002*. Na primeira etapa, que consiste na localização das fontes de emissão acústica, dois métodos podem ser utilizados: a localização zonal, que consiste em identificar as regiões que contenham a maior atividade, ou seja, o maior número de sinais ou valores acumulados dos parâmetros de emissão acústica por canal; e, a localização com a técnica de agrupamentos de sinais, que consiste em verificar se um ou mais sinais são provenientes da mesma fonte de emissão acústica. Para a identificação de um agrupamento de sinais deve-se determinar a máxima distância que será utilizada para considerar que dois sinais de emissão acústica pertencem a mesma fonte. Geralmente esta distância, por exemplo R é ajustada inicialmente entre 5% e 10% do espaçamento máximo entre sensores. Quando um evento de emissão acústica é identificado na posição P_1 , uma circunferência de raio R é formada em torno da posição P_1 . Quando um segundo sinal de emissão acústica for detectado em uma posição P_2 que esteja compreendida dentro da circunferência de raio R centrada em P_1 têm-se a formação de um agrupamento de sinais. Uma nova circunferência de raio R é formada em torno da posição P_2 , incrementando a distância do agrupamento de sinais. Este processo continua sucessivamente enquanto ocorrerem localizações de eventos de emissão acústica. Em função da faixa de pressão imposta ao equipamento e da energia acumulada nos eventos detectados, o tipo de agrupamento de eventos é classificado. A combinação entre a energia e contagens acumuladas nos eventos detectados fornece a classe do agrupamento de sinais. De posse do tipo e da classe dos agrupamentos, os agrupamentos são dispostos em quatro faixas de resultados que indicam a criticidade da região identificada pelo ensaio de emissão acústica. O sinal de emissão acústica gerado por uma fonte pode ser detectado em mais de um sensor. Quando esta detecção ocorre estes sinais podem ser localizados na superfície do objeto em exame e, neste instante, têm a identificação de um evento de emissão acústica (a localização de um sinal detectado em mais de um sensor). Agrupamentos de eventos são definidos por uma distância máxima que circunscreva diversos eventos e por uma quantidade mínima circunscrita de eventos. Na

norma JIS Z 2342-2002 [opus cit Mori, 2003] a distância máxima entre eventos está definida pela faixa de 5 % a 10 % do maior espaçamento entre sensores, a quantidade mínima de eventos está definida como um, ou seja, qualquer evento é considerado como um agrupamento de eventos. [Mori, 2003]

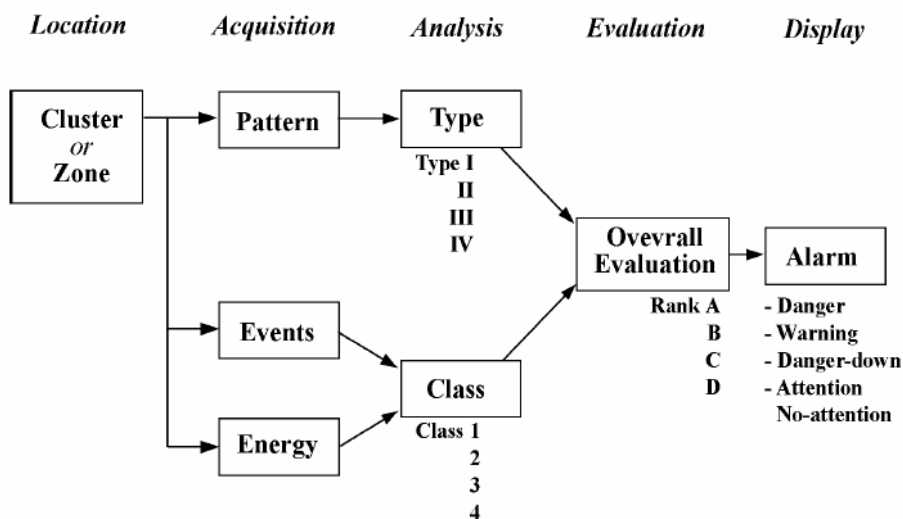


Fig. 3.19 – Fluxograma de avaliação de sinais de emissão acústica segundo a norma JIS Z 2342-2002. [opus cit Mori, 2003]

O tipo do agrupamento de sinais é definido pelo somatório de energia dos sinais de emissão acústica e a pressão aplicada. O agrupamento do tipo I corresponde a sinais de emissão acústica esparsamente detectados em vários níveis de pressurização sem grande intensidade. O agrupamento tipo II é identificado por sinais de intensidade baixa ou moderada e ocorrem em baixas ou médias pressões. Quando são detectados sinais de emissão acústica com incremento exponencial de atividade em pressões elevadas caracteriza-se o agrupamento tipo III. O agrupamento tipo IV é caracterizado quando os sinais de emissão acústica acontecem durante todo o ciclo de pressurização. Para a classificação dos agrupamentos deve-se proceder conforme a figura 3.20, que apresenta a relação entre a energia acumulada do sinal de emissão acústica, ΣE , e a pressão aplicada, P . A primeira etapa da análise consiste em dividir a faixa de pressão máxima aplicada P_i em cinco regiões iguais. A diferença de energia acumulada de emissão acústica em cada faixa de pressão, $\Delta \Sigma E$, é calculada e identificada de $\Delta \Sigma E_1$ a $\Delta \Sigma E_5$. A pressão onde a avaliação é

iniciada é denominada P_0 , a energia de emissão acústica utilizada como referência para a avaliação, E_0 , é o valor da energia acumulada nos agrupamentos do tipo II e III. O valor de energia para o agrupamento do tipo IV é identificado como E_l . [opus cit Mori, 2003]

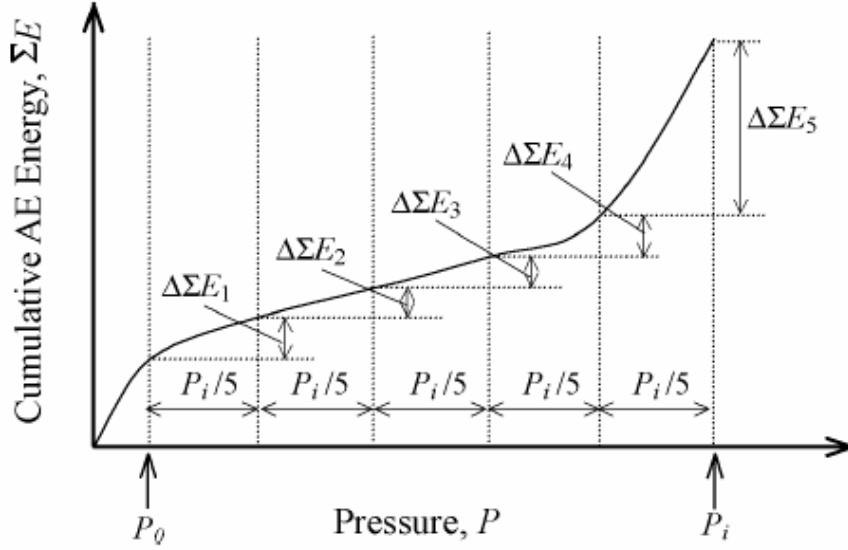


Fig. 3.20 – Classificação do tipo de agrupamento de sinais segundo a norma JIS Z 2342-2002. [opus cit Mori, 2003]

A classificação do tipo dos agrupamentos de sinais é realizada conforme as equações de III.2 a III.6. [opus cit Mori, 2003]

$$\sum E = \Delta\Sigma E_1 + \Delta\Sigma E_2 + \Delta\Sigma E_3 + \Delta\Sigma E_4 + \Delta\Sigma E_5 \quad (\text{III.2})$$

$$\text{Tipo IV,} \quad \Delta\Sigma E \geq E_l \quad (\text{III.3})$$

$$\text{Tipo III,} \quad (\Delta\Sigma E_4 + \Delta\Sigma E_5) / \Sigma E \geq 70\% \quad e \quad \Sigma E \geq E_0 \quad (\text{III.4})$$

$$\text{Tipo II,} \quad (\Delta\Sigma E_2 + \Delta\Sigma E_3 + \Delta\Sigma E_4) / \Sigma E \geq 70\% \quad e \quad \Sigma E \geq E_0 \quad (\text{III.5})$$

$$\text{Tipo II,} \quad (\Delta\Sigma E_1 + \Delta\Sigma E_2) / \Sigma E \geq 70\% \quad e \quad \Sigma E \geq E_0 \quad (\text{III.6})$$

O agrupamento que não for enquadrado como IV, III ou II é classificado como tipo I. [opus cit Mori, 2003]

A classe do agrupamento de sinais é definida por uma matriz conforme a figura 3.21. Na figura 3.21, os valores de eventos de emissão acústica $N_1, N_2, N_3, \dots, N_k$; e, os valores de energia acumulada de emissão acústica $E_1, E_2, E_3, \dots, E_k$, são definidos pelo usuário que está realizando a análise por meio de ensaios mecânicos em corpos de prova ou pela experiência prévia do analista em ensaios de emissão acústica. [opus cit Mori, 2003]

Located Cumulative AE Energy, ΣE	E_R				
	$\uparrow$				
	E_3	2	3	4	4
	E_2	1	2	3	4
E_1		1	1	2	3
		1	1	1	2
		N_1	N_2	N_3	$\rightarrow N_R$
Located Cumulative AE Events, N					

Fig. 3.21 – Matriz de definição da classe dos agrupamentos de sinais. [opus cit Mori, 2003]

A ordenação e a criticidade dos agrupamentos de sinais é obtida pela matriz apresentada na tabela III.6. Na tabela III.6 são correlacionados o tipo e a classe do agrupamento de sinais. Segundo a norma JIS Z 2342-2002 [opus cit Mori, 2003] os agrupamentos “D” e “C” não necessitam de inspeção complementar para a detecção e dimensionamento de descontinuidades, porém, os agrupamentos “B” e “A” devem ser inspecionados para a confirmação da existência e dimensionamento das descontinuidades. [opus cit Mori, 2003]

Tabela III.6 – Tabela de ordenamento e criticidade de agrupamento de sinais segundo a norma *JIS Z 2342-2002* [opus cit Mori, 2003]

Classe	1	2	3	4
Tipo				
I	D	D	C	B
II	D	C	C	B
III	D	C	B	A
IV	C	B	A	A

A normalização da utilização de agrupamentos de eventos como método de análise de ensaios de emissão acústica permite o estabelecimento de novos critérios de aceitação de dados com base na quantidade de emissão acústica gerada localizadamente, em contraste com os critérios de aceitação anteriores baseados em localização zonal, onde as regiões ativas de emissão acústica são definidas pela atividade detectada por sensor instalado na estrutura em teste. A utilização de somatórios de energia e contagem para a classificação dos agrupamentos de eventos pode ser entendida como a utilização dos melhores parâmetros para a definição da criticidade dos eventos localizados.

Testes hidrostáticos até a falha em corpos de prova construídos com trechos de dutos foram conduzidos como parte de um programa para propor novas metodologias de teste hidrostáticos de dutos [Soares, 2003a]. Para a execução destes testes descontinuidades semi-elípticas simulando trincas foram introduzidas nos corpos de prova com dimensões: 3 x 60 mm, 7 x 140 mm e 20 x 200 mm, profundidade e comprimento, respectivamente. Os corpos de prova foram monitorados com emissão acústica durante o ciclo de pressurização. Na figura 3.22 apresentam-se dois dos corpos de prova utilizados. Os corpos de prova foram confeccionados em aço API XL 60 com 20 polegadas de diâmetro, 14,5 mm de espessura e 3000 mm de comprimento. A propagação das descontinuidades inseridas foi monitorada com sistema de ultra-som. Os sensores de emissão acústica foram instalados na parte cilíndrica dos corpos de prova, próximos aos tampos de fechamento, com uma distância entre sensores de aproximadamente 2800 mm. [Soares, 2003a] A técnica ultra-sônica utilizada para a monitoração da propagação das descontinuidades consistiu na medição do percurso sônico entre o ponto de saída do feixe sônico do transdutor e a

extremidade da descontinuidade, conforme pode ser visto no desenho esquemático da figura 3.23. Em função de ser conhecida a posição da descontinuidade e o ponto de saída do feixe ultra-sônico do transdutor, pode-se determinar a distância projetada “d”. O ângulo de saída do feixe ultra-sônico, α , é uma característica construtiva do transdutor. Ao medir-se o percurso sônico “PS” determina-se a profundidade “p” da descontinuidade.



Fig. 3.22 – Corpos de prova tubulares para teste hidrostático, diâmetro 20 polegadas e comprimento aproximado 3000 mm. [Soares, 2003a]

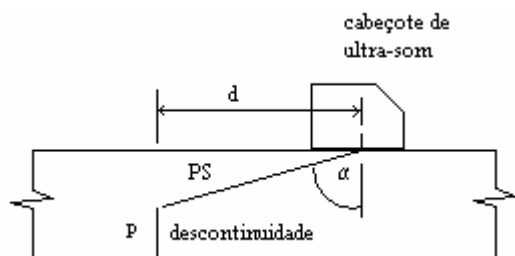


Fig. 3.23 – Técnica ultra-sônica para monitoração da propagação das descontinuidades inseridas nos corpos de prova, onde: α , ângulo do feixe ultra-sônico; d, distância projetada entre o ponto de saída do feixe ultra-sônico do transdutor e a descontinuidade; PS, percurso sônico entre o ponto de saída do feixe ultra-sônico do transdutor e a descontinuidade; e, p, profundidade da descontinuidade.

As figuras 3.24 e 3.25 mostram, respectivamente, o gráfico de localização linear (ver item II.9) de fontes de emissão acústica e a região da falha de um dos corpos de prova. No gráfico de localização linear da figura 3.24 pode ser visualizada a grande atividade de

emissão acústica próxima aos sensores para coleta de dados, instalados nas extremidades do corpo de prova. Neste gráfico o eixo horizontal representa o eixo longitudinal do corpo de prova e o eixo vertical representa o número de eventos localizados ao longo do eixo longitudinal do corpo de prova. Esta atividade pode ser identificada pela grande número de eventos nas extremidades dos corpos de prova quando comparado com a atividade de emissão acústica no restante do corpo de prova. As medições de profundidade das trincas realizadas com ultra-som durante o teste hidrostático foram utilizadas para cálculo do parâmetro de mecânica da fratura “J” aplicado ao corpo de prova. Os valores de propagação da trinca (incremento de profundidade) em função da pressão aplicada são apresentados, para o corpo de prova com descontinuidade 7 mm x 140 mm, na figura 3.26. Com os valores da propagação da descontinuidade foi calculado o parâmetro de mecânica da fratura J aplicado ao corpo de prova, o gráfico de J aplicado em função da profundidade da trinca é apresentado na figura 3.27. No gráfico da figura 3.27 são apresentadas quatro curvas. As curvas identificadas como “250” e “300” kgf/cm^2 (linhas sem marcadores) apresentam o cálculo teórico de J em função da profundidade da descontinuidade. As curvas identificadas como tubo “3x60” e “tubo 7x140” apresentam os resultados do parâmetro J em função da pressão aplicada e da profundidade da descontinuidade medida com o método ultra-sônico, estas curvas são chamadas de curva de resistência do material.

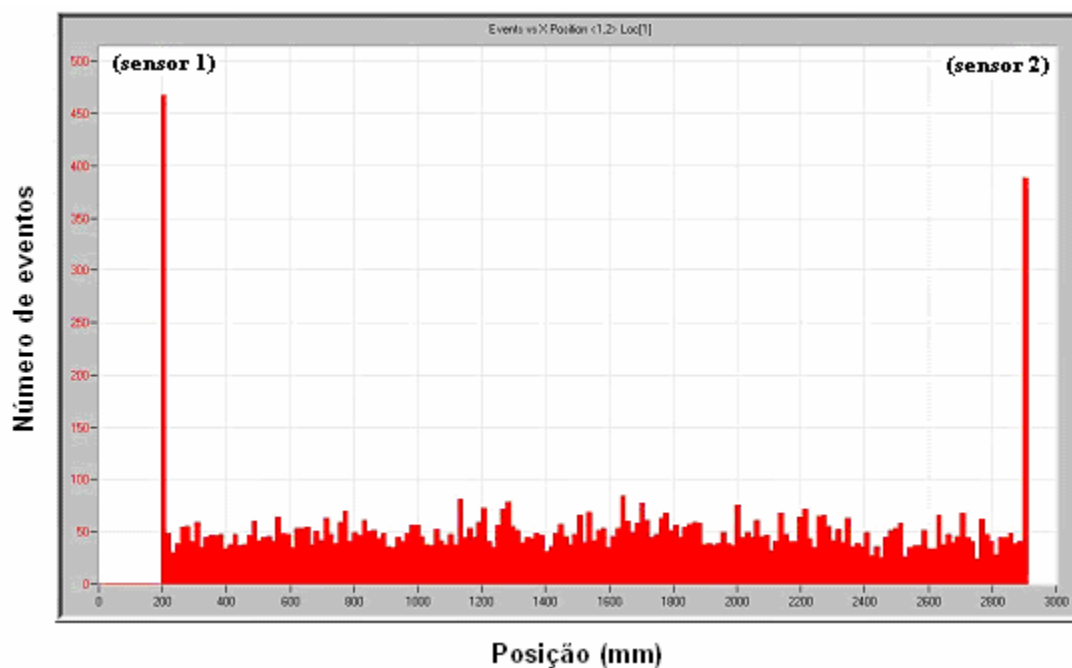


Fig. 3.24 – Gráfico de localização linear dos sinais de emissão acústica. Abcissa: eixo longitudinal do corpo de prova; ordenada: número de eventos. [Soares, 2003a]

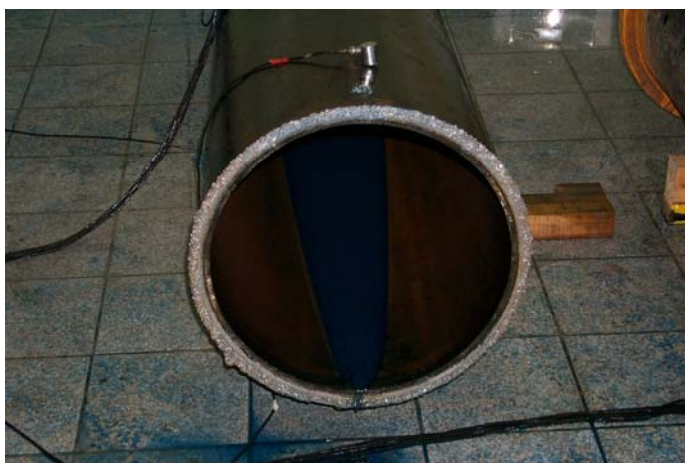


Fig. 3.25 – Corpo de prova após falha catastrófica em uma das extremidades. [Soares, 2003a]

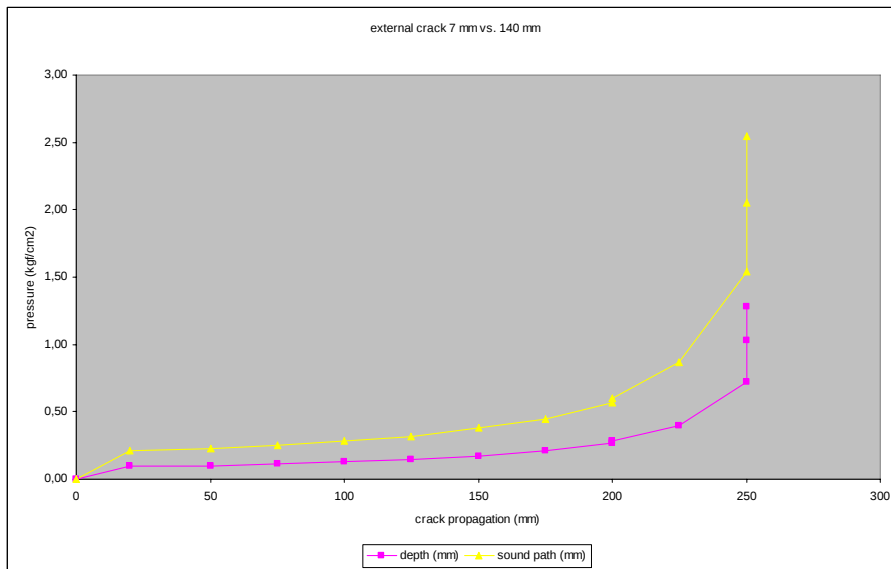


Fig. 3.26 – Gráfico profundidade da trinca *versus* pressão, para o corpo de prova com descontinuidade 7 mm x 140 mm. [Soares, 2003a]

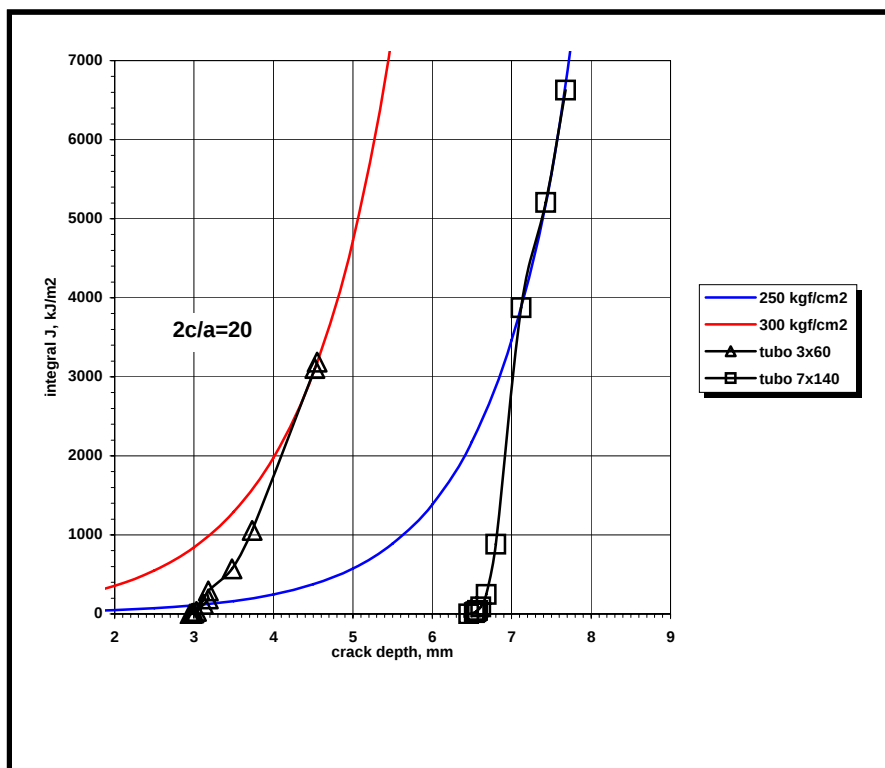


Fig. 3.27 – Gráficos de J (pressão interna) e J aplicado (descontinuidades). [Soares, 2003a]

No caso particular dos materiais empregados na fabricação de tubos para oleodutos ou gasodutos, que não falham de forma catastrófica, a tenacidade pode ser medida pelos parâmetros CTOD ou integral J. O parâmetro J foi escolhido por Teixeira [Teixeira, 2003] em função da disponibilidade de equações para cálculo de J aplicado, além de ser um parâmetro recomendável para materiais de elevada tenacidade. O parâmetro J pode ser calculado utilizando os requisitos da norma *ASTM E 1820 - Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness* [ASTM, 2001]. Esses materiais não falham ao ser alcançado um valor de J crítico, mas apresentam uma curva de resistência (curva R), padronizada no anexo 8 da norma ASTM E 1820, cujo J aumenta com o crescimento da trinca. Um dos valores extraídos de ensaios padronizados em corpos de prova geometricamente diferentes da estrutura sob estudo é o chamado J de iniciação, J_{Ic} , definido próximo da iniciação de crescimento estável da trinca. Devido à dificuldade em precisar o exato momento da iniciação e, portanto, determinar o J_{Ic} , seu valor é determinado arbitrariamente, da mesma forma que é feito na determinação do limite de escoamento, onde a tensão é obtida a partir de um certo grau de deformação (0,2% ou 0,5%). Embora o valor de J_{Ic} já forneça alguma informação sobre o comportamento a fratura de materiais dúcteis, a curva R completa é que descreve de forma mais precisa o comportamento a fratura. A inclinação da curva R para um certo valor de extensão de trinca é indicativa da estabilidade relativa desta propagação. Um material com uma curva R próxima da vertical significa uma maior propensão de propagação instável de trinca em função de pequenos incrementos da profundidade da trinca significarem grandes incrementos do valor de J aplicado proporcionando o atingimento do valor de J crítico e, conseqüentemente, a propagação instável da trinca.

A instabilidade de materiais elasto-plásticos ocorre quando a curva de força motriz é tangente à curva R. A condição de propagação instável é preenchida quando o J aplicado à estrutura é maior do que J_{Ic} . [Teixeira, 2003]

Em resumo, a iniciação da propagação da trinca ocorre quando $J_{aplicado} \geq J_{Ic}$, onde J_{Ic} é o valor de tenacidade correspondente a iniciação. Gráficamente o rasgamento estável compreende o ponto de tangência entre as curvas de resistência e de J aplicado.

A determinação de J_{Ic} em geral, é feita empregando corpos de prova tipo CT. Entretanto, o uso de valores de tenacidade à fratura determinados em corpos-de-prova reduzidos de laboratório resulta muito conservador quando aplicados a tubos, gerando avaliações mais rigorosas. Alternativas têm sido estudadas por diversos pesquisadores, Ruggeri em trabalho ainda não publicado, porém apresentado para pesquisadores do Centro de Pesquisas da PETROBRAS em 2007, realizou uma análise com elementos finitos dos campos de tensão impostos nas diversas formas de carregamento e corpos de prova concluindo que os corpos de prova na forma SE(t) apresentavam a melhor relação entre o campo de tensões imposto na extremidade de um trinca real em um segmento de tubo e o campo de tensão imposto no corpo de prova.

As curvas de propagação das descontinuidades 3x60 e 7x140, ambas externas, superpostas as curvas de J aplicado para diversos valores de pressão interna informa no ponto de tangência, onde os valores de dJ/da são iguais, a condição de instabilidade, conforme mostra a figura 3.27. Nota-se que a precisão da curva de propagação foi muito reduzida pelo sistema discreto de aquisição das medidas de ultra-som. Apesar da imprecisão das curvas R, é possível observar que a condição de instabilidade ocorre para pressões entorno de 304 kgf/cm², no tubo com defeito externo 3x60 mm, e de 250 kgf/cm², no tubo com defeito externo de 7x140 mm. Os resultados de ultra-som revelam que momentos antes da falha os defeitos propagaram cerca de 1,60 mm e 1,28 mm em profundidade, para os tubos com defeitos 3x60 e 7x140mm, respectivamente. Observa-se que o tubo com defeito original 3x60 mm propaga-se estavelmente até pelo menos 3,73 mm, correspondente a um $J_{aplicado}$ igual a 1420,8 kJ/m². Já no tubo com defeito 7x140 mm nota-se uma propagação estável até pelo menos 6,8 mm, que corresponde a um $J_{aplicado}$ de 1406,6 kJ/m².

As curvas teóricas da figura 3.27 foram obtidas para as pressões de 250 e 300 kgf/cm², sendo assim, o ponto de tangência entre a curva de resistência do material e a curva teórica apresentado na figura 3.27 deve ser analisado com ressalvas pois não exprime a real posição de tangenciamento. Esta tangência deveria ser apresentada com uma curva teórica

de 275 kgf/cm²; admite-se porém que o erro induzido por este procedimento seja desprezível. Os ensaios realizados mostraram a ocorrência de falha instável do corpo de prova testado hidrosticamente nas situações de tangência entre a curva teórica e a curva de resistência do material. Os testes mostraram que a técnica de emissão acústica indica antecipadamente a presença de descontinuidades críticas no objeto ensaiado antes do valor crítico de J ser atingido.

Ju, Jang e Kwon [Ju, 2003] estudaram a tenacidade à fratura de aços, AS 508 Classe3, usados em centrais nucleares da China utilizando técnicas de impacto. O início da propagação da descontinuidade inserida em corpos de prova com entalhe foi determinado com a utilização da técnica de emissão acústica. Picos de energia foram observados no início do teste (região elástica), na região de dobramento plástico e na região de máxima carga, como pode ser visto na figura 3.28. Os picos do início do teste foram atribuídos a formação de bandas de deslizamento durante a deformação e os picos da região de máxima carga atribuídos a fratura final do corpo de prova. Os testes conduzidos permitiram concluir que os picos de energia associados a região de dobramento plástico eram devidos ao crescimento de descontinuidades (trincas) e que o início da detecção destes sinais podia ser atribuído ao início de propagação da trinca. Os valores de energia associados ao início de propagação apresentaram magnitude variada nos testes realizados, embora o mesmo comportamento tenha se reproduzido. [Ju, 2003]

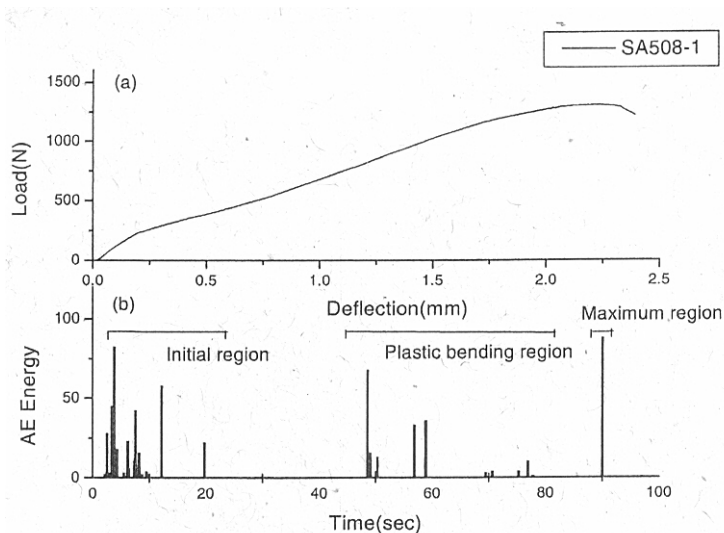


Fig. 3.28 – (a) Gráfico carga versus deflexão, e (b) gráfico energia de emissão acústica versus tempo; para corpos de prova de aço AS 508-1 com pré-trinca. [Ju, 2003]

Corpos de prova do tipo CT foram confeccionados em alumínio (2014-T6 e 7050-T76511) e aço A36, e foram ensaiados para determinação de suas propriedades de resistência à fadiga [Chen, 2004]. Durante estes testes foram coletados sinais de emissão acústica para o estudo de uma possível relação com o parâmetro K de mecânica da fratura. Os sensores de emissão acústica utilizados nestes testes possuíam banda de frequência de 200 kHz a 750 kHz. O limite de referência do sistema de emissão acústica foi ajustado em 30 dB, pois este valor proporcionou a eliminação e conseqüente não detecção de ruídos. Os sinais coletados nos corpos de prova de material A-36 foram em pequena quantidade e não permitiram o estudo para estabelecimento de relação entre emissão acústica e mecânica da fratura. Nas figuras 3.29, 3.30 e 3.31 pode-se notar que o crescimento da descontinuidade no corpo de prova é acompanhado por um crescimento do total de contagens durante o andamento do teste. Para o corpo de prova confeccionado em aço, figura 3.31, embora exista a mesma tendência de crescimento entre comprimento da trinca e contagens, a relação não apresenta a mesma consistência. Nas figuras 3.32 e 3.33 são apresentados os gráficos de correlação, utilizando o parâmetro K_{max} para sincronizar os valores, entre taxa de crescimento da trinca inserida nos corpos de prova e a taxa de contagens de sinais de emissão acústica. Pode-se notar a proporcionalidade existente entre estes dois parâmetros. A quantidade de sinais gerados durante o ensaio mecânico do corpo de prova também

apresenta relação proporcional com o fator de intensidade de tensões K_{max} como apresentado nas figuras 3.34, 3.35 e 3.36. A relação entre a energia do sinal de emissão acústica e a energia necessária para a fratura do corpo de prova foi estudada e apresentou o comportamento de proporcionalidade exibido pelo parâmetro de emissão acústica contagens e pela quantidade de sinais. A relação entre a energia de emissão acústica e a energia de fratura pode ser visualizada nas figuras 3.37, 3.38 e 3.39.

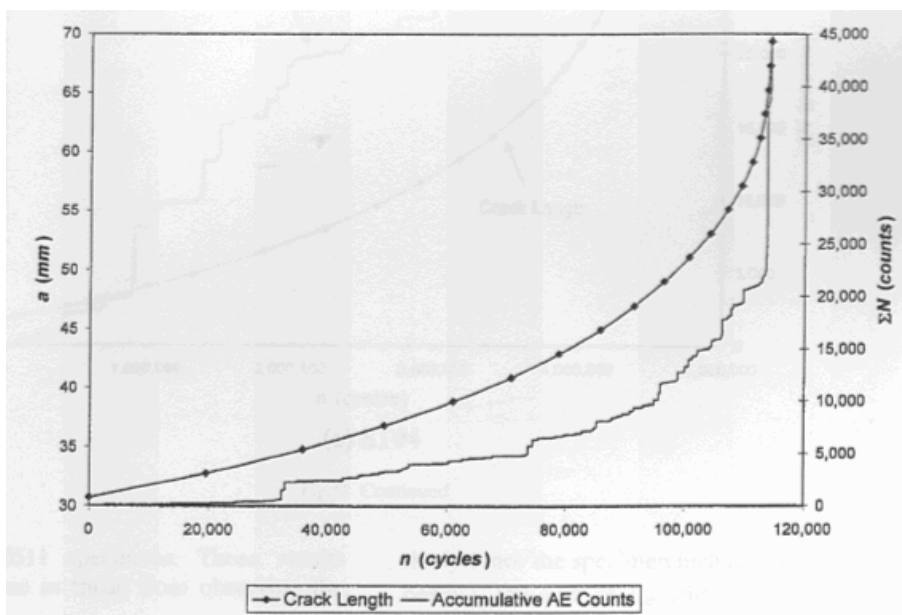


Fig. 3.29 – Gráfico comprimento da trinca e contagens acumuladas de emissão acústica *versus* número de ciclos para o corpo de prova AL1#1. [Chen, 2004]

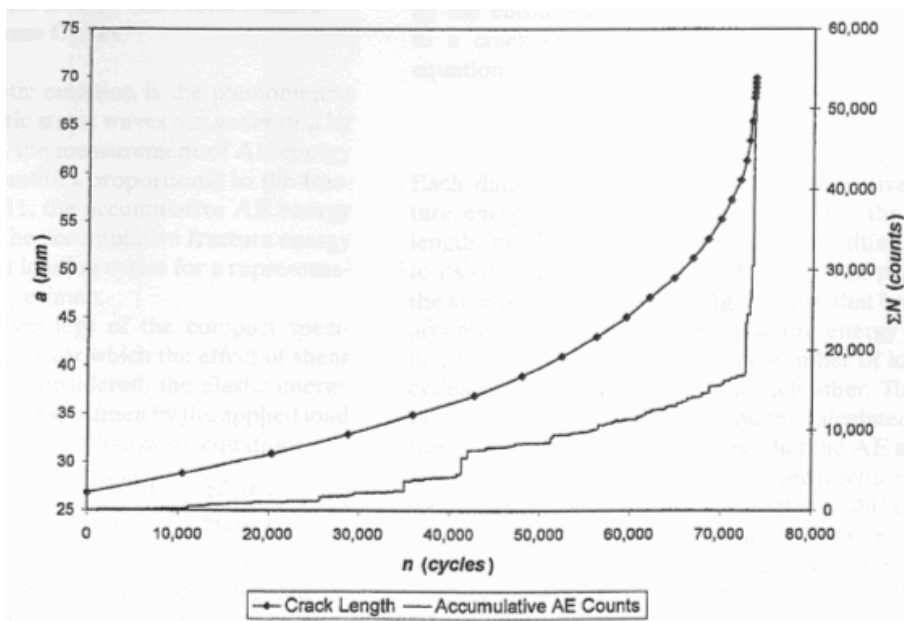


Fig. 3.30 – Gráfico comprimento da trinca e contagens acumuladas de emissão acústica *versus* número de ciclos para o corpo de prova AL2#2. [Chen, 2004]

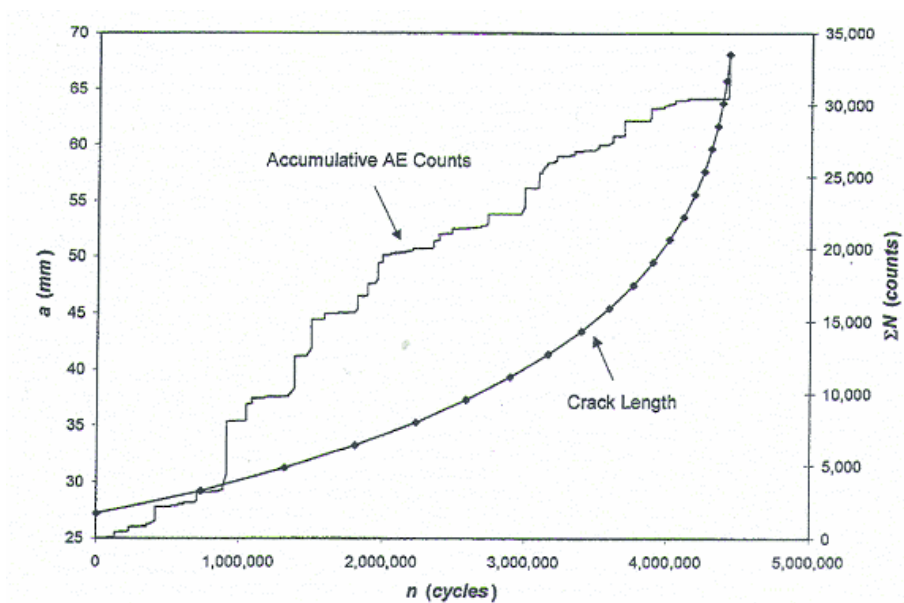


Fig. 3.31 – Gráfico comprimento da trinca e contagens acumuladas de emissão acústica *versus* número de ciclos para o corpo de prova ST#4. [Chen, 2004]

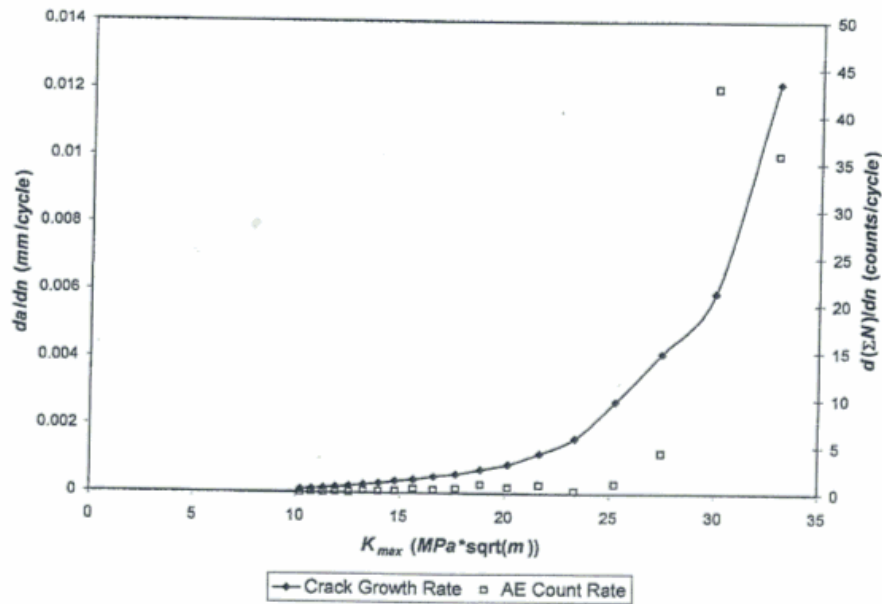


Fig. 3.32 – Gráfico taxa de crescimento da trinca e taxa de contagens *versus* K_{max} para o corpo de prova AL1#1. [Chen, 2004]

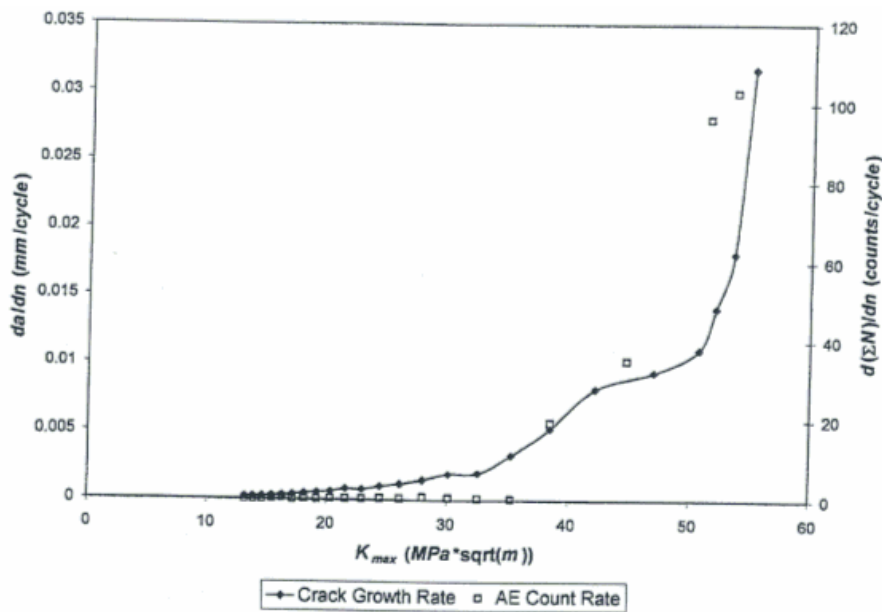


Fig. 3.33 – Gráfico taxa de crescimento da trinca e taxa de contagens *versus* K_{max} para o corpo de prova AL2#2. [Chen, 2004]

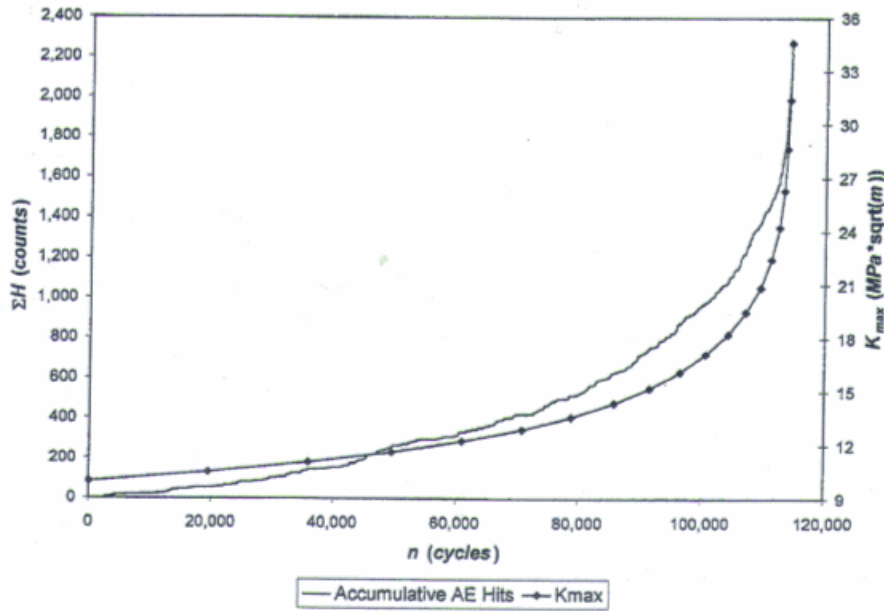


Fig. 3.34 – Gráfico sinais acumulados de emissão acústica e K_{max} *versus* número de ciclos para o corpo de prova AL1#1. [Chen, 2004]

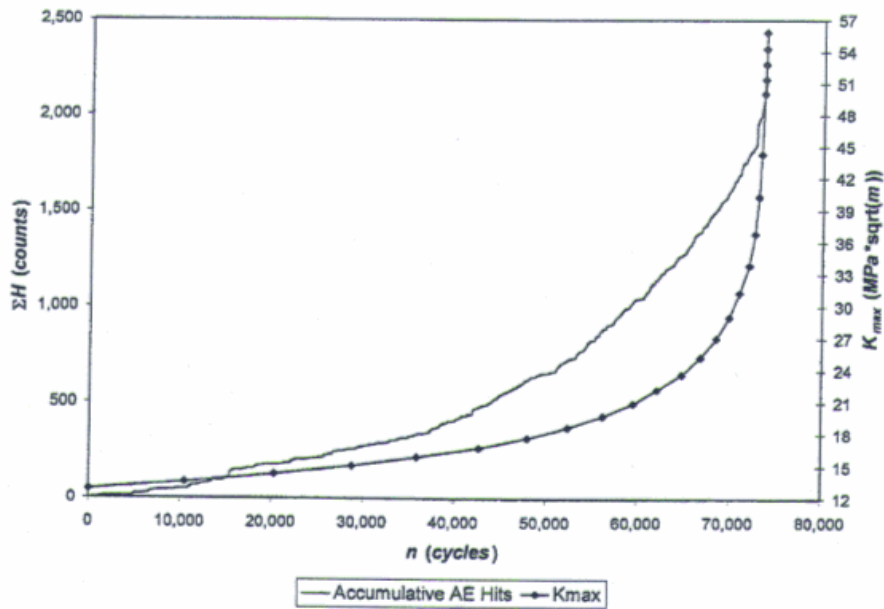


Fig. 3.35 – Gráfico sinais acumulados de emissão acústica e K_{max} *versus* número de ciclos para o corpo de prova AL2#2. [Chen, 2004]

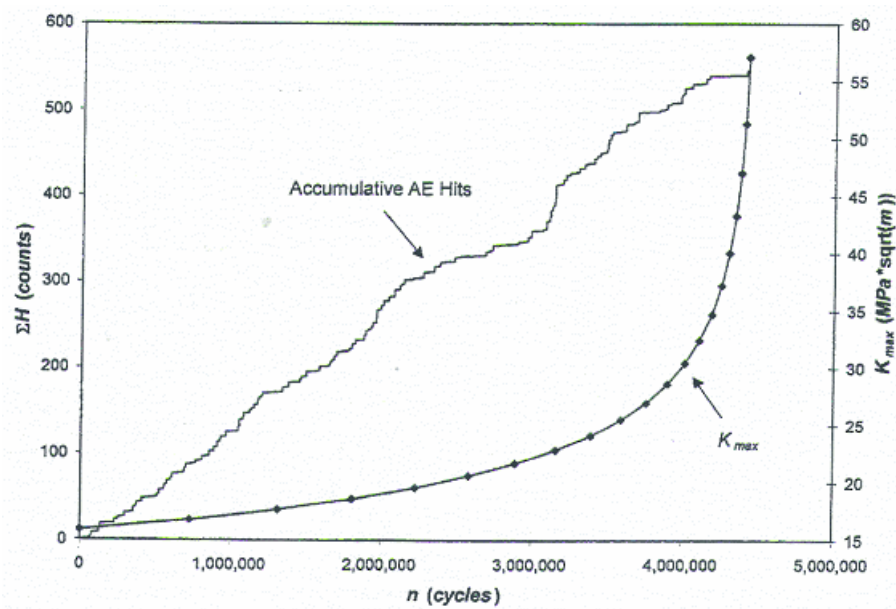


Fig. 3.36 – Gráfico sinais acumulados de emissão acústica e K_{max} *versus* número de ciclos para o corpo de prova ST#4. [Chen, 2004]

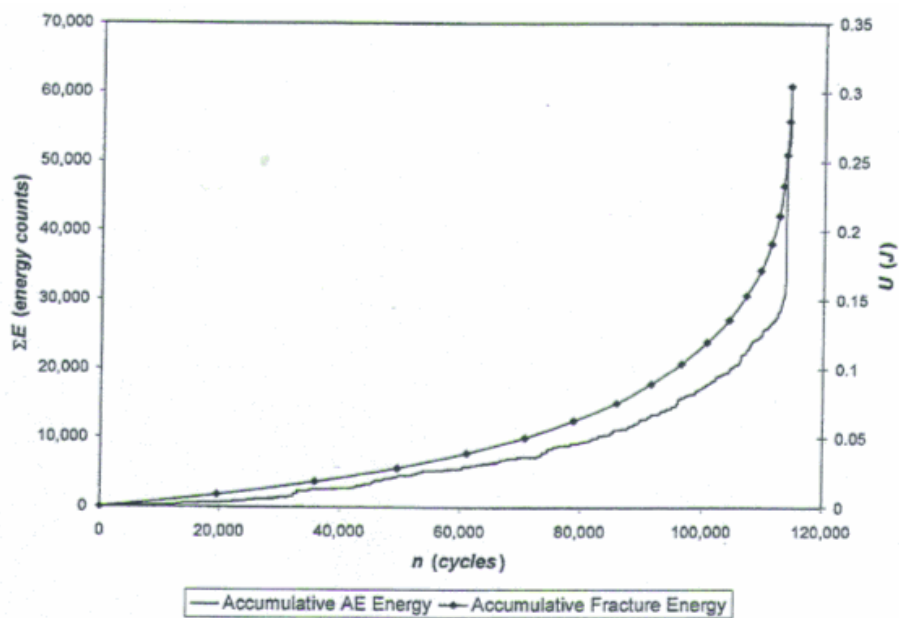


Fig. 3.37 – Gráfico energia acumulada de emissão acústica e energia acumulada de fratura *versus* número de ciclos para o corpo de prova AL1#1. [Chen, 2004]

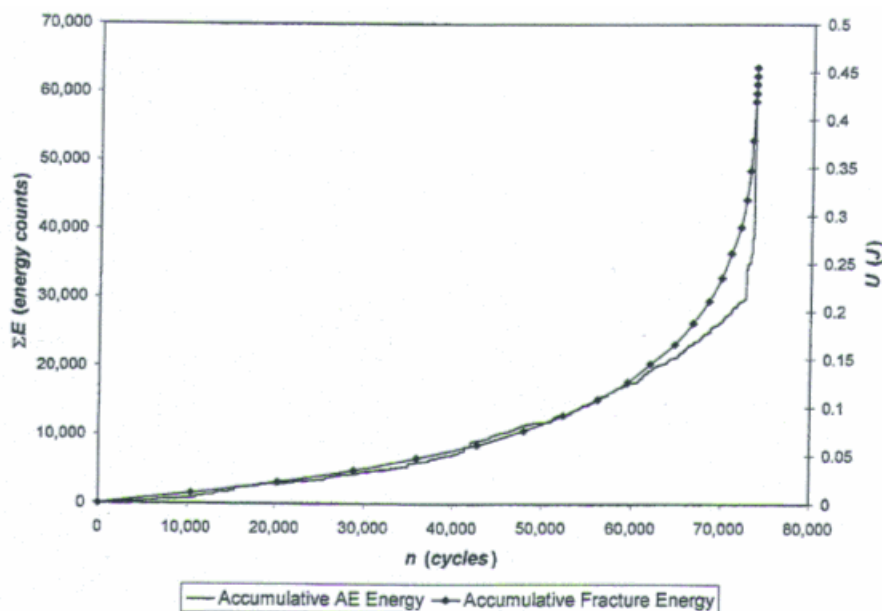


Fig. 3.38 – Gráfico energia acumulada de emissão acústica e energia acumulada de fratura *versus* número de ciclos para o corpo de prova AL2#2. [Chen, 2004].

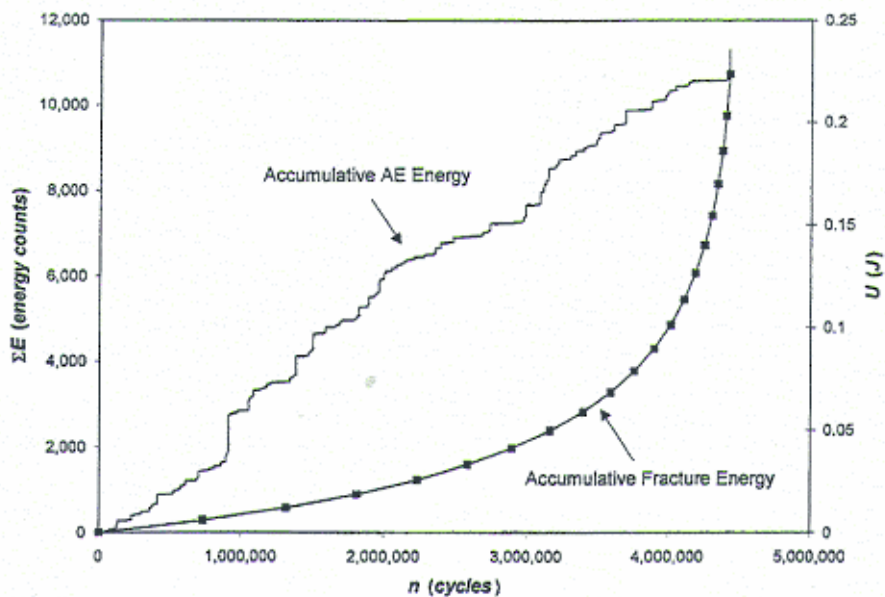


Fig. 3.39 – Gráfico energia acumulada de emissão acústica e energia acumulada de fratura *versus* número de ciclos para o corpo de prova ST#4. [Chen, 2004].

Em 2004 foi publicado um artigo sobre a análise conduzida em um banco de dados criado com os resultados dos ensaios realizados no sistema PETROBRAS [Soares, 2004].

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 contemplou 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. Os ensaios de emissão acústica utilizaram o critério de análise MONPAC. A figura 3.18 (página 63) apresenta um resultado típico da análise de dados com o critério MONPAC. Neste gráfico os valores obtidos para os parâmetros *historic index* e *severity* por cada sensor utilizado são apresentados. O gráfico é dividido em seis regiões: *no significant emissions*, A, B, C, D e E. Em função da classificação obtida por cada canal, o critério MONPAC estabelece ações conforme a tabela III.5 (página 63). Os resultados de ensaios de emissão acústica classificados como “D” e “E” requerem a realização de ensaios não destrutivos para a detecção e o dimensionamento das descontinuidades porventura existentes. [Soares, 2004]

O banco de dados analisado contemplava 210 ensaios realizados. A tabela III.5 (página 63) revelou que os equipamentos ensaiados classificados como “E” são os mais críticos para a continuidade operacional segura. A análise do banco de dados selecionou 21 equipamentos com classificação “E”. A tabela III.7 apresenta o resumo dos dados obtidos em 18 equipamentos classificados como “E” [Soares, 2004].

Tabela III.7 - Equipamentos classificados como “E” no ensaio de emissão acústica. [Soares, 2004]

Tipo e código do equipamento	Ensaio não destrutivos	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
		Trinca	60, 5 e 11 mm	> 2 mm
		Trinca	20 mm	3,2 mm
		Trinca	60 mm	
		FF	210, 280, 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.				

Apenas três equipamentos apresentados na tabela III.7 apresentavam dimensionamento de descontinuidades, totalizando seis descontinuidades. Destas descontinuidades apenas duas apresentavam o dimensionamento da altura. O valor da altura da descontinuidade, quando não fornecido, foi arbitrado em 2 mm para descontinuidades superficiais e o diâmetro do furo cilíndrico necessário para a execução da inspeção ultra-sônica para descontinuidades internas. Na tabela III.8 são apresentados os equipamentos avaliados pela mecânica da fratura e os respectivos parâmetros utilizados nos cálculos. [Soares, 2004]

Tabela III.8 - Equipamentos avaliados pela mecânica da fratura. [Soares, 2004]

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 (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	20				
		2	60				
		2	210				
		3	280				
		2	45				

Os dados da tabelas III.8 junto com os valores das propriedades mecânicas dos materiais descritos são entradas para o cálculo do diagrama FAD (Failure Assessment Diagram) apresentado na figura 3.16. Na tabela III.9 são apresentados os resultados do diagrama FAD para os equipamentos analisados. [Soares, 2004]

Tabela III.9 - Resultados do diagrama FAD para os equipamentos da tabela III.8. [Soares, 2004]

Equipamento	Kr	Lr
Esfera (008)	0,235	0,591
Vaso de pressão (061)	0,232	0,736
Vaso de pressão (1203)	0,323	0,661
	0,221	0,661
	0,276	0,661
	0,248	0,661
	0,251	0,662
	0,337	0,664
	0,247	0,661

A mesma análise mostrada anteriormente foi realizada para as demais classes de resultados conforme a tabela III.8. Na figura 3.40 são apresentados os resultados da comparação entre o critério MONPAC e os resultados de mecânica da fratura para os equipamentos do banco de dados que continham informações de dimensionamento de descontinuidades. Como não foi possível a percepção de uma tendência coerente entre o critério MONPAC e os resultados de mecânica da fratura, para os dados apresentados na figura 3.40, uma análise foi realizada separando os resultados por tipo de equipamento. Na figura 3.41 são apresentados os resultados desta análise para os equipamentos do tipo vaso de pressão, que apresentaram uma relação coerente entre os resultados do critério MONPAC e a mecânica da fratura [Soares, 2004], isto é, para equipamentos do tipo vasos de pressão a realização de testes hidrostáticos monitorados por emissão acústica utilizando o critério MONPAC de análise pode fornecer qualitativamente a condição de integridade estrutural da região coberta pelos sensores de emissão acústica.

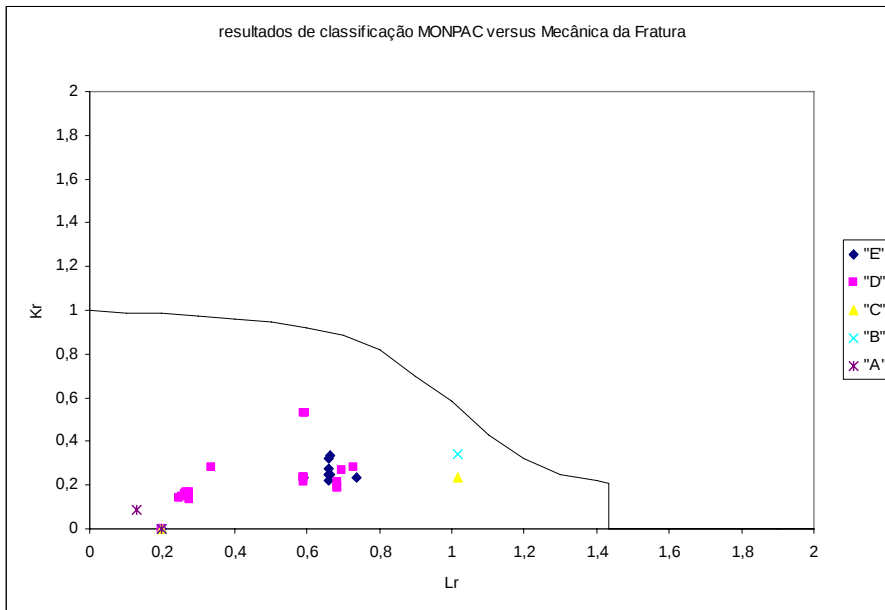


Fig. 3.40 – Comparação entre os resultados do critério MONPAC e os resultados de mecânica da fratura. [Soares, 2004]

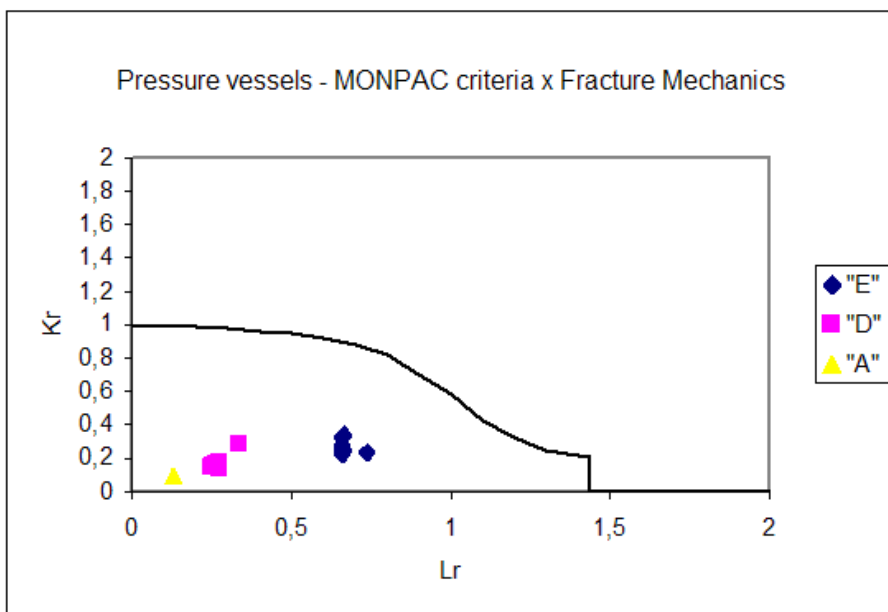


Fig. 3.41 – Comparação entre os resultados do critério MONPAC e os resultados de mecânica da fratura para equipamentos do tipo vasos de pressão. [Soares, 2004]

Diversas conclusões foram apresentadas após a análise dos dados dos 210 equipamentos do banco de dados, dentre as quais: a) existe uma relação entre o critério MONPAC e a presença de descontinuidades. Quase todos os equipamentos classificados como “E” apresentavam descontinuidades e menos de 50% dos equipamentos classificados como “A” tinham descontinuidades; b) não existe uma separação clara entre as classes do critério MONPAC, quando comparado aos resultados de mecânica da fratura; c) existe uma correlação *quasi* linear entre emissão acústica e mecânica da fratura para as inspeções realizadas em vasos de pressão (figura 3.41, incremento da criticidade indicada pelo critério MONPAC proporcional ao incremento de L_r e K_r); e, d) a técnica de emissão acústica poderia ser utilizada como ferramenta de seleção de equipamentos e áreas para inspeção complementar com ensaios não destrutivos. [Soares, 2004]

Cole e Gautrey [Cole, 2004] estudaram os aspectos relacionados com a aplicação do ensaio de emissão acústica durante o teste hidrostático de vasos de pressão na condição após fabricação, antes da entrada em serviço. Diversas análises podem ser realizadas durante este teste permitindo a identificação de descontinuidades que podem ser críticas para o vaso de pressão na condição operacional. Sinais de emissão acústica foram detectados sem a presença de descontinuidades em um dos testes apresentados, porém a análise detalhada deste equipamento detectou a realização de soldas com diferentes aportes térmicos que resultaram em diferentes níveis de tensões residuais. Os diversos níveis de tensão residual acarretaram sinais de emissão acústica, durante o teste hidrostático, que reprovavam o equipamento em teste para o uso futuro. A solução empregada consistiu em realizar um segundo ciclo de carregamento para detectar a nucleação de descontinuidades nas áreas de maior tensão residual. Em função da não ocorrência de novos sinais de emissão acústica o vaso de pressão em teste foi liberado para uso. [Cole, 2004]

III.6 Considerações finais

O ensaio de emissão acústica tem sido estudado para aplicações em diversas áreas, dentre as quais pode-se destacar: o controle da corrosão; detecção de descontinuidades em

equipamentos submetidos à carregamentos com pressão interna e avaliação da integridade estrutural de componentes.

Na área de controle da corrosão existem estudos para acompanhamento de processos de perda de massa [Allevato, 1980]; detecção e monitoração da corrosão, do trincamento por corrosão sob tensão e da corrosão fadiga [Yuyama, 1986] [Morofuji, 2003]; inspeção de fundo de tanques de armazenamento [van de Loo, 1988] e avaliação de processos corrosivos em dutos enterrados [Yuyuma, 2003] [Yoshida, 2003].

Na área de detecção de descontinuidades em equipamentos submetidos à carregamentos com pressão interna a experiência acumulada no Brasil permitiu a edição da norma ABNT NBR 13199 [*opuscit* Feres, 1996] para a inspeção de cilindros de armazenamento de gás e a realização de trabalhos para inspecionar sistemas de tubulação [Evangelista, 2001]. Pesquisadores estrangeiros têm divulgados trabalhos para: detecção e localização em tempo real de fontes de emissão acústica em costados de vasos de pressão [Beattie, 2003].

Na área da integridade estrutural existem proposições da utilização do método de emissão acústica para a detecção de trincas de fadiga em plataformas *off-shore* [Allevato, 1982]. Existem resultados concretos da utilização de ensaios de emissão acústica em conjunto com requisitos de mecânica da fratura para: a inspeção de cilindros de distribuição de gases industriais montados em caminhões [Blackburn, 1988]; o auxílio da definição do procedimento correto de operação de autoclaves em refinaria de petróleo [Feres, 2001]; e, indicação antecipada da presença de descontinuidades críticas em dutos antes de ser atingido um valor crítico de carregamento. Correlações envolvendo resultados de emissão acústica e criticidade de descontinuidades foram estudadas: utilizando o ensaio de CTOD (*crack tip opening displacement*), demonstrando a capacidade do método de emissão acústica detectar trincas antes do valor do CTOD de iniciação ser obtido [Camerini, 1990]; utilizando o parâmetro K de mecânica da fratura [Chen, 2004]; e, comparando os resultados de vários ensaios de emissão acústica, ensaios não destrutivos complementares e análises de mecânica da fratura sistematizadas em um banco de dados [Soares, 2004]. Vasos de

pressão construídos em material composto foram estudados e os valores críticos dos parâmetros do ensaio de emissão acústica para a operação segura dos vasos foram definidos como 66 dB e 0,9, para amplitude e razão *Felicity*, respectivamente [Chelladurai, 2000]. A relação entre os parâmetros de emissão acústica e o fator de intensidade de tensões foi estudada para aços utilizados na construção de pontes metálicas, sendo determinado que o parâmetro energia apresenta a maior parcela de contribuição para a estimativa do fator de intensidade de tensões. [Yoon, 2000]. Trabalhos conceituais admitem a possibilidade de relação entre as tensão localizadas, a abertura e a área das descontinuidades, e a propagação de ondas mecânicas nos materiais [Scruby, 2001]. Com a consolidação da aplicação do método de emissão acústica para a avaliação da integridade estrutural foi emitida a norma japonesa *JIS Z 2342-2002 Method for acoustic emission testing of pressure vessels during pressure tests and classification of test results* para a análise dos dados de emissão acústica baseada em concentração de eventos e somatórios de energia e contagens, relacionados com a pressão de teste [opuscit Mori, 2003].

A utilização do método de inspeção com a técnica de emissão acústica têm sido alterada com o passar dos anos e disseminação do conhecimento. Novos sistemas de ensaio, incorporando novas tecnologias e velocidades de processamento permitiram a realização de análises e a manipulação de quantidade de dados inimagináveis há 20 anos atrás. Inicialmente o método de emissão acústica era utilizado para detectar descontinuidades, passando depois para a classificação da criticidades das áreas inspecionadas.

Atualmente, com a disseminação de ferramentas de cálculo de criticidade de descontinuidades [Anderson, 2000] busca-se uma relação entre os resultados de emissão acústica e os parâmetros de mecânica da fratura. A existência desta relação está baseada no princípio físico do ensaio de emissão acústica no qual uma descontinuidade em processo de propagação ao gerar uma nova superfície de fratura libera energia sob a forma de uma onda mecânica. Ao analisar-se o fato de que o incremento das descontinuidades exigirá cada vez mais energia para o processo de deformação pode-se supor também o incremento dos sinais de emissão acústica. Os critérios de análise utilizados industrialmente envolvem procedimentos padronizados de carregamento e permitem o estabelecimento de relações

entre os resultados de emissão acústica e a criticidade das descontinuidades, conforme os trabalhos publicados por Soares [Soares, 2004] e Cole e Gautrey [Cole, 2004]

Em função da pesquisa bibliográfica realizada pode-se concluir pela viabilidade da obtenção de correlações entre os resultados do ensaio de emissão acústica e a criticidade de descontinuidades ou o estabelecimento da condição de integridade estrutural de um componente ensaiado. Estudos e testes devem ser realizados para identificar os parâmetros e as formas de processamento que devem ser aplicadas aos dados de emissão acústica para o estabelecimento de correlações com os parâmetros de mecânica da fratura extensamente utilizados na disciplina de integridade estrutural.

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

IV.1 Introdução

Neste capítulo serão descritos:

- os corpos de prova citando dimensões e descontinuidades inseridas;
- o material de confecção dos corpos de prova;
- a instrumentação utilizada para a coleta de dados;
- o método de aplicação de carga nos corpos de prova;
- a metodologia de cálculo de mecânica da fratura utilizada para o carregamento imposto aos corpos de prova;
- os métodos de análise empregados para o estabelecimento de correlações com parâmetros de mecânica da fratura.

IV.2 Corpos de prova

Foram empregados segmentos de dutos de aço especificação API XL 60, com costura, diâmetro nominal 20 polegadas, comprimento de 1500 mm e espessura de parede 14,5 mm. Os dutos foram produzidos industrialmente com chapas grossas pelo processo de laminação controlada e soldados por arco submerso após conformação para formar o corpo cilíndrico. Nos corpos de prova utilizados, denominados “Tubo 01”, “Tubo 02” e “Tubo 03”, foram inseridas descontinuidades planares longitudinais por eletroerosão com formato semi-elíptico com a finalidade de simular trincas. Na figura 4.1 apresenta-se um dos corpos de prova confeccionados, com sensores para coleta de sinais de emissão acústica e transdutores de ultra-som para a medição da profundidade das descontinuidades inseridas.



Fig. 4.1 – Corpo de prova preparado para a realização do teste hidrostático.

Na tabela IV.1 são apresentados os resultados da análise química efetuada em amostra do tubo utilizado neste trabalho de pesquisa [Velloso, 2006] e a especificação do aço API XL Grau 60 [API, 2004].

Tabela IV.1 – Composição química do aço API XL 60, amostra e especificado. Valores percentuais em peso. [Velloso, 2006]

Elemento químico	Amostra	Especificado
C	0,09	0,14
Mn	1,43	1,43
Ni	0,02	0,02
Si	0,24	0,28
Cr	0,03	0,03
Mo	0,05	0,04
S	0,007	0,008
P	0,023	0,023
Cu	< 0,01	
V	0,04	
Nb	0,03	
Al	0,03	
Ti	< 0,001	
N	< 0,001	
Ca	< 0,001	
B	< 0,001	

Na figura 4.2 apresenta-se um desenho esquemático das descontinuidades inseridas. Para a inserção das descontinuidades foram consideradas duas razões de aspecto ($a/2c$): 10 e 20. As descontinuidades foram inseridas com profundidades “ a ” iguais a 1/4, 3/8 e 1/2 da espessura “ e ”.

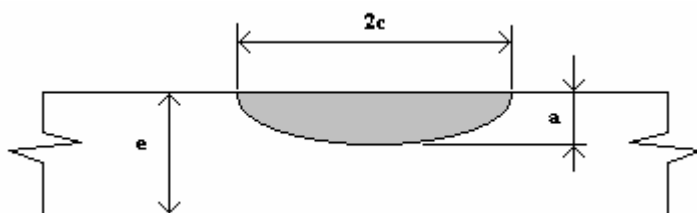


Fig. 4.2 – Desenho esquemático da seção transversal das descontinuidades inseridas por eletroerosão.

As descontinuidades foram posicionadas longitudinalmente nos corpos de prova com a finalidade de serem submetidas à tensão circunferencial de tração, que é a tensão principal nos dutos.

Os segmentos de tubos utilizados continham uma solda longitudinal e foram fechados, para compor um recipiente cilíndrico semelhante a um vaso de pressão pela soldagem de tampos retos em suas extremidades. As descontinuidades foram inseridas no metal base destes segmentos de tubos e na zona termicamente afetada da solda longitudinal dos segmentos de tubos. Na tabela IV.2 são descritas as dimensões e a localização das descontinuidades inseridas nos corpos de prova Tubo 01, Tubo 02 e Tubo 03.

Tabela IV.2 – Descontinuidades inseridas.

Corpo de prova	Profundidade (mm)	Comprimento (mm)	Localização
Tubo 03	7,0	140	Metal base
	7,0	70	Metal base
	7,0	140	Zona termicamente afetada
	7,0	70	Zona termicamente afetada
Tubo 02	3,91	72	Metal base
	3,81	36	Metal base
	3,53	72	Zona termicamente afetada
	3,58	36	Zona termicamente afetada
Tubo 01	1,9	38	Metal base
	1,9	19	Metal base
	1,9	38	Zona termicamente afetada
	1,9	19	Zona termicamente afetada

As descontinuidades foram identificadas nos corpos de prova em função de sua posição, metal base ou zona termicamente afetada (próxima ao metal de adição), respectivamente MB e MA; e em função de seu comprimento, razão de aspecto 10 ou 20, respectivamente TP (trinca pequena) e TG (trinca grande). A combinação desta identificação produziu os nomes MBTP, MBTG, MATP e MATG para as descontinuidades.

IV.3 Material

Na tabela IV.3 apresentam-se os valores das propriedades mecânicas do material empregado na confecção dos corpos de prova obtidos experimentalmente por Teixeira [Teixeira, 2003]. Os corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos foram retirados na seção transversal do metal de base do tubo, diametralmente oposto ao cordão de solda longitudinal.

Tabela IV.3 – Propriedades mecânicas do aço API XL 60. [Teixeira, 2003]

Propriedade	Valor (MPa)
Limite de escoamento	483
Limite de resistência	598
Módulo de elasticidade	216505
K_{Jc} (MPa $\sqrt{m}$)	222

Nas tabelas de IV.4 a IV.6 apresentam-se os valores de Integral J , obtidos experimentalmente por Teixeira [Teixeira, 2003], para a determinação da curva de resistência segundo a norma ASTM E 1820, para os corpos de prova deste estudo denominados “Tubo 03”, “Tubo 02”, e “Tubo 01”, respectivamente, conforme apresentado na figura 4.1. O termo rasgamento refere-se ao incremento da profundidade, medida pela técnica ultra-sônica ToFD, conforme a figura 4.6, descrita mais adiante no item “IV.5 Sistema de ultra-som”. O formato das tabelas é diferente em função de não ter ocorrido rasgamento das descontinuidades nos corpos de prova “Tubo 01” e “Tubo 02”. No corpo de prova “Tubo 01” o rasgamento da descontinuidade foi identificado apenas após o seccionamento da descontinuidade e em função disto seu valor não foi apresentado na tabela, uma vez que foram considerados rasgamentos os valores medidos com a técnica ultra-sônica ToFD.

Tabela IV.4 – Valores experimentais para obtenção da curva de resistência do corpo de prova tubo 03, segundo o parâmetro de mecânica da fratura Integral J .
[Teixeira, 2003]

Rasgamento (mm)	J (kJ/m ²)
0,1	1211,18
0,2	1455,74
0,3	1753,86
0,5	2444,09
0,6	3046,94
0,8	4365,91

Tabela IV.5 – Valores experimentais para determinação de J aplicado ao corpo de prova tubo 02. Pressão em bar e J em kJ/m^2 . MBTG, metal base trinca grande; MBTP, metal base trinca pequena; MATG, zona termicamente afetada trinca grande; e, MATP, zona termicamente afetada trinca pequena. [Teixeira, 2003]

Pressão (bar)	$J (\text{kJ/m}^2)$			
	MBTG	MBTP	MATG	MATP
0,00	0	0	0	0
9,4	0,03	0,03	0,02	0,02
24,5	0,19	0,18	0,16	0,16
33,4	0,35	0,34	0,29	0,30
59,1	1,11	1,05	0,92	0,94
86,8	2,39	2,27	1,98	2,03
131	5,47	5,20	4,53	4,64
137,4	6,04	5,74	5,00	5,12
138,3	6,12	5,82	5,07	5,19
174,4	10,54	9,98	8,59	8,82
198,3	16,33	15,33	12,89	13,29
211,8	22,37	20,84	17,19	17,78
220,4	28,19	26,13	21,23	22,02
237,4	47,50	43,59	34,44	35,90
272,3	163,14	147,71	111,99	117,65
275,9	186,11	168,36	127,31	133,81
279,2	209,99	189,92	143,23	150,60
280,3	218,60	197,57	148,97	156,66
283,4	244,79	221,11	166,41	175,06
288,2	291,50	263,09	197,51	207,87
290,4	315,70	284,83	213,61	224,86

Tabela IV.6 – Valores experimentais para obtenção da curva de resistência do corpo de prova tubo 01, segundo o parâmetro de mecânica da fratura Integral J . [Teixeira, 2003]

Pressão (bar)	J (kJ/m ²)			
	MBTG	MBTP	MATG	MATP
0,00	0	0	0	0
301,1	161,19	96,74	51,79	53,57

Os resultados obtidos para o parâmetro Integral J descritos nas tabelas IV.4, IV.5 e IV.6 apresentaram uma extensa faixa de variação (os valores máximos variaram de 51,79 kJ/m² a 4365,91 kJ/m²). As pressões internas máximas aplicadas aos corpos de prova (ver figura 4.1) situaram-se próximas a 300 bar, valor necessário para impor tensões circunferenciais trativas da ordem da tensão limite de escoamento do material em questão. Em função desta grande variação do valor de Integral J optou-se pela utilização de outro parâmetro de mecânica da fratura que não apresentasse a extensa faixa de variação proporcionada pelo parâmetro Integral J . Para a obtenção das correlações entre emissão acústica e mecânica da fratura foi utilizado o parâmetro de mecânica da fratura K .

O parâmetro de mecânica da fratura K aplicado aos corpos de prova “Tubo 01”, Tubo 02” e “Tubo 03”, construídos conforme a figura 4.1, foi calculado baseado no esquema apresentado na figura 4.3, descrito por Anderson [Anderson, 1995] que melhor exprime o carregamento imposto nas descontinuidades inseridas por eletro-erosão.

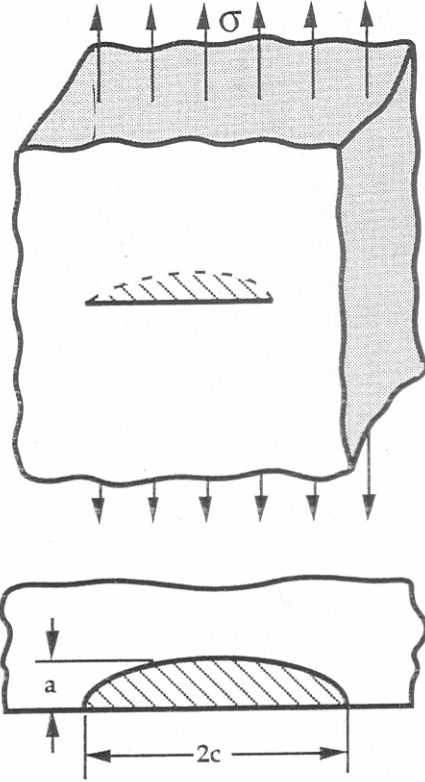


Fig. 4.3 – Carregamento imposto aos corpos de prova nas regiões contendo descontinuidades. [Anderson, 1995]

O valor de K_I pode ser calculado pela equação IV.1.

$$K_I = \lambda_s \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{Q}} f(\phi) \quad (\text{IV.1})$$

O valor de Q é calculado pela equação IV.2, utilizando a razão entre profundidade e metade do comprimento, considerando a propagação da descontinuidade durante a realização do teste hidrostático.

$$Q = 1 + 1,464 \cdot \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65} \quad (\text{IV.2})$$

O valor de λ_s é calculado pela equação IV.3 que também considera a propagação da descontinuidade.

$$\lambda_s = \left[1,13 - 0,09 \cdot \left(\frac{a}{c} \right) \right] \cdot \left[1 + 0,1 \cdot (1 - \sin \Phi)^2 \right] \quad (\text{IV.3})$$

O valor de $f(\Phi)$ é calculado pela equação IV.4.

$$f(\phi) = \left[\sin^2 \phi + \left(\frac{a}{c} \right)^2 \cdot \cos^2 \phi \right]^{1/4} \quad (\text{IV.4})$$

O máximo valor de K_I será obtido, em cada condição de carregamento, quando calculado para $\Phi = 90^\circ$ (figura 4.4). Nesta condição o valor de $f(\Phi)$ iguala-se a 1, em função disto λ_s apresenta o valor máximo fornecido pela expressão IV.5 e K_I é calculado pela equação IV.6.

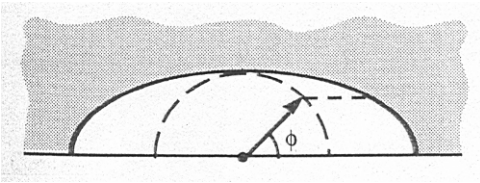


Fig. 4.4 – Determinação do ângulo Φ . [Anderson, 1995]

$$\lambda_s = \left[1,13 - 0,09 \cdot \left(\frac{a}{c} \right) \right] \quad (\text{IV.5})$$

$$K_I = \lambda_s \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{Q}} \quad (\text{IV.6})$$

O raio da zona plastificada na ponta da trinca, considerando o estado plano de deformação, pode ser calculado pela equação IV.7.

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_{LE}} \right)^2 \quad (\text{IV.7})$$

Após o cálculo de K_I utilizando a equação IV.6 foram calculados os índices K_r e L_r para as descontinuidades introduzidas nos corpos de prova com o objetivo de indicar graficamente, com o auxílio do diagrama FAD (*failure analysis diagram*) a criticidade das descontinuidades. As equações IV.8 e IV.9 definem o método de cálculo destes índices conforme apresentado na figura 3.16 [Anderson, 2000].

$$K_r = \frac{K_I}{K_{MAT}} \quad (\text{IV.8})$$

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{LE}} \quad (\text{IV.9})$$

Onde:

K_I , é o fator de intensificação de tensão, em $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$;

K_{MAT} , é o valor da tenacidade a fratura do material em análise, em $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$;

σ_{ref} , é o valor da tensão aplicada na descontinuidade, em MPa, e;

σ_{LE} , é a tensão limite de escoamento do material em análise, em MPa.

IV.4 Sistema de emissão acústica

Foram utilizados dois sistemas de emissão acústica para a coleta de dados.

O sistema denominado *MicroDisp*, fabricado pela empresa americana *Physical Acoustics Corporation – PAC*, com capacidade de quatro canais de coleta de dados.

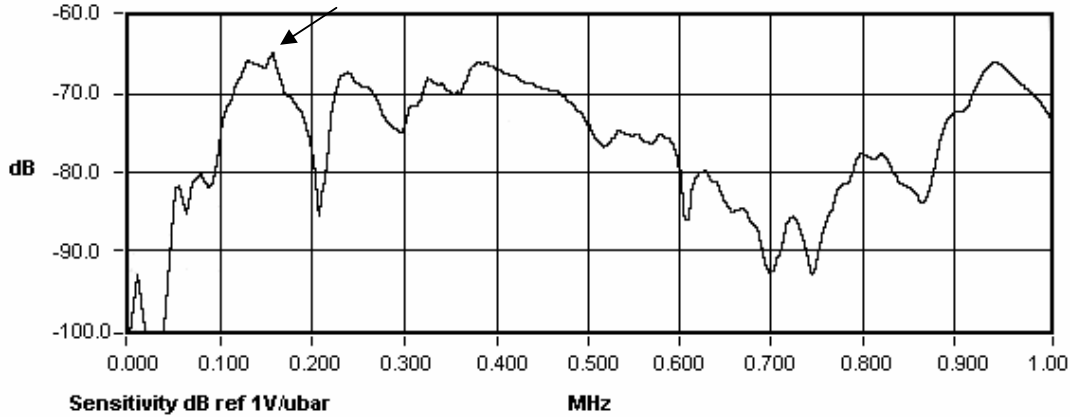
Os dados de emissão acústica foram coletados utilizando o software desenvolvido pela *PAC* denominado *AEWin*. O software *AEWin*, construído em plataforma *Windows 98* gerencia a coleta de dados, permitindo a aquisição dos parâmetros de emissão acústica.

Neste estudo foi habilitada a coleta dos principais parâmetros de um sinal de emissão acústica: tempo de subida, contagem, energia, duração e amplitude. Os valores destes parâmetros são coletados indexados pelo sensor de detecção (também chamado de canal) e pelo instante de tempo de ocorrência da detecção. Os sinais de emissão acústica são ondas de frente plana e propagam-se em todas as direções do meio onde foram geradas. Em função disto os sensores foram posicionados próximos das discontinuidades inseridas nos corpos de prova para permitir a detecção dos sinais oriundos destas discontinuidades. Após a detecção os sinais são armazenados em arquivos eletrônicos que podem ser lidos pelo software *AEWin* ou convertidos em arquivos *ASCII* para utilização por softwares universais de leitura de dados.

Os dados foram coletados utilizando sensores com pico de frequência em 150 kHz e banda de 100%. Na figura 4.5 apresenta-se o gráfico de calibração de um dos sensores utilizados neste estudo. Neste gráfico pode-se identificar o tipo de sensor calibrado (R15), o sensor utilizado como referência para calibração (CA89), a data da calibração (29 de agosto de 2000), o executante do teste, e a informação mais importantes para a utilização correta do sensor: o pico de frequência (156,25 kHz). O pico de amplitude informado (-62,61 dB) deve ser utilizado como valor de referência para comparação do desempenho do sensor durante sua vida útil. O pico de frequência está indicado na figura por uma seta (grifo do autor). O procedimento de calibração utilizado está descrito na norma *ASTM E 976 – Guide for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response*.

AE SENSOR CALIBRATION CERTIFICATE

Sensor Name:	R15	Test Date:	3/29/00	Max. Value (dB):	-62.61
Sensor S/N:	CA89	Tested by:	C.P.	Peak Freq. (kHz):	156.25



PAC certifies that this sensor meets all performance, environmental and physical standards established in applicable PAC specifications. Calibration methodology based on ASTM standard E976 - "Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response".

Fig. 4.5 – Gráfico de calibração de sensor.

IV.5 Sistema de ultra-som

As descontinuidades inseridas foram monitoradas e medidas por sistema de inspeção ultra-sônica com a técnica *time of flight diffraction* (ToFD) em intervalos de 1 segundo. A técnica ToFD esta baseada na difração do feixe ultra-sônico, causada pelas extremidades superior e inferior de um refletor, neste estudo a descontinuidade inserida por eletro-erosão. Essa difração ocorre quando se introduz um feixe de ondas ultra-sônicas provenientes de um transdutor angular emissor. As reflexões e difrações são captadas por outro transdutor angular que trabalha somente como receptor de ondas ultra-sônicas. Na figura 4.6, podemos ver como é representado o sinal sônico convertido em elétrico, no osciloscópio do aparelho, representação esta conhecida como *A-scan*: o sinal azul é de uma onda (onda lateral), que percorre a chapa, imediatamente abaixo da superfície, os sinais vermelhos são difrações das pontas superior e inferior do defeito, respectivamente, e o sinal verde é a reflexão do fundo da chapa [Carneval, 2005]. Para a medição das profundidades e/ou altura de descontinuidades realizou-se uma calibração definindo a espessura como a diferença entre os sinais na cor azul e verde na figura 4.6. Após a calibração da escala de tempo realizada

conforme a frase anterior, os sinais provenientes das discontinuidades foram medidos considerando o incremento dos sinais originários provenientes do fundo da descontinuidade inserida por eletroerosão (sinal semelhante ao sinal apresentado na cor vermelho na figura 4.6). Como as descontinuidades inseridas eram abertas para a superfície, apenas um sinal de difração (cor vermelho) era gerado, ou o sinal da onda lateral (cor azul) era deslocado em função de um maior percurso da onda ultra-sônica.

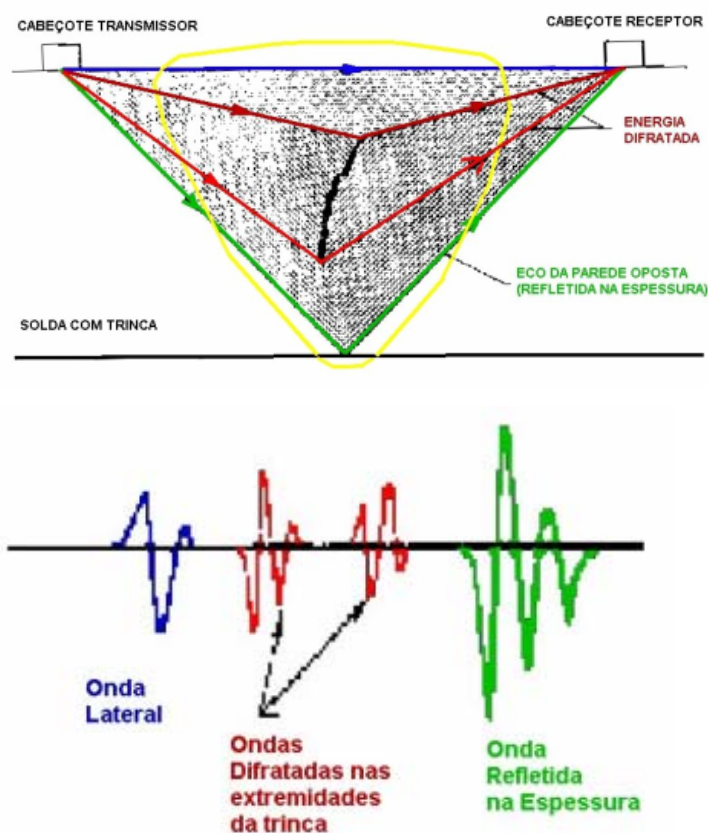


Fig. 4.6 – Princípios da técnica ToFD na inspeção de descontinuidades, formação dos sinais. [Carneval, 2005]

A diferença de tempo entre as ondas difratadas nas extremidades da trinca fornece a “altura” “ a ” da descontinuidade inspecionada. Em função da medição contínua das dimensões das descontinuidades inseridas, foi possível obter os valores dos parâmetros de mecânica da fratura durante todo o teste hidrostático, permitindo assim o estudo de

correlações entre estes parâmetros e os resultados dos ensaios de emissão acústica em diferentes níveis de criticidade.

Para a coleta dos sinais de ultra-som com a técnica ToFD empregou-se o módulo de ultra-som convencional do aparelho *R/D Tech Focus*, fabricado pela empresa canadense *R/D Tech*, do grupo *Olympus*. Foram utilizados transdutores fabricados pela empresa holandesa RTD, específicos para ToFD, com ângulo de incidência da onda longitudinal no aço de 60°.

IV.6 Testes hidrostáticos

Os corpos de prova foram carregados com pressão interna durante a realização de testes hidrostáticos. Foram utilizadas curvas de pressurização que permitiram atingir pressões equivalentes à 90% da tensão limite de escoamento. A tensão aplicada foi calculada utilizando a equação IV.10.

$$\sigma_{membrana} = \frac{P \cdot r}{e} \quad (IV.10)$$

Onde,

$\sigma_{membrana}$ é a tensão de membrana aplicada aos corpos de prova;

P é a pressão interna aplicada e medida durante a realização dos testes hidrostáticos;

r é o raio do corpo de prova; e,

e é a espessura do corpo de prova.

A taxa de aplicação da pressão interna foi mantida entre 1 e 2% da máxima pressão, por minuto. Para os corpos de prova confeccionados a pressão correspondente à tensão limite de escoamento do material empregado nos testes, API XL 60, foi definida como 267 kgf/cm². A pressão aplicada foi monitorada e medida em intervalos de 30 segundos. A medição da pressão aplicada foi efetuada utilizando transdutor de pressão conectado a

microcomputador para armazenamento digital da leitura e posterior correlação com outros sinais coletados durante os testes hidrostáticos dos corpos de prova.

Em função da presença de descontinuidades foi realizada uma avaliação considerando a possível formação da protuberância na parede do tubo na região da descontinuidade como consequência do carregamento por pressão interna. A formulação utilizada para esta análise foi proposta pelo Instituto Batelle e atualmente é utilizada no código ASME Seção XI conforme Hippert [Hippert, 2004]. A equação IV.11 permite a estimativa da tensão de colapso em função das dimensões das descontinuidades inseridas nos corpos de prova.

$$\sigma_c = \bar{\sigma} \left[\frac{1 - \frac{a}{t}}{1 - \frac{a}{t} \left(\frac{1}{M} \right)} \right] \quad (\text{IV.11})$$

Onde:

a , é a profundidade da descontinuidade;

t , é a espessura do corpo de prova;

$\bar{\sigma}$, é a tensão de fluxo; e,

M , é o fator de Folias.

Hippert [Hippert, 2004] descreve que a tensão de fluxo, $\bar{\sigma}$, segundo o API 579 é a média aritmética entre a tensão limite de escoamento e a tensão limite de resistência do material. A tensão de fluxo é um conceito empírico que tenta representar, através de um parâmetro único, a capacidade de encruamento do material. Para o material utilizado, aço API XL 60, estes valores são respectivamente 483 MPa e 598 MPa. O valor utilizado para $\bar{\sigma}$ foi 540,5 MPa.

O fator de Folias, M , exprime a relevância do comprimento para a descontinuidade, qualificando se a descontinuidade é profunda ou rasa e se é curta ou extensa e é utilizado para cálculo da tensão de colapso por considerar em sua formulação a formação da

protuberância na parede do tubo na região da descontinuidade em consequência do carregamento por pressão interna. A solução analítica para o fator de Folias é uma série infinita, e as três aproximações mais largamente empregadas estão apresentadas nas equações de IV.12 a IV.14, conforme exposto por Hippert [Hippert, 2004].

$$M = \sqrt{1 + 0,26 \left(\frac{2c}{\sqrt{Rt}} \right)^2} \quad (\text{IV.12})$$

$$M = \sqrt{1 + 0,314 \left(\frac{2c}{\sqrt{Rt}} \right)^2 - 0,00084 \left(\frac{2c}{\sqrt{Rt}} \right)^4} \quad (\text{IV.13})$$

$$M = \sqrt{1 + 0,40 \left(\frac{2c}{\sqrt{Rt}} \right)^2} \quad (\text{IV.14})$$

Onde:

$2c$, é o comprimento da descontinuidade;

R , é o raio externo do corpo de prova; e,

t , é a espessura do corpo de prova.

A equação IV.12, quando utilizada, fornece o menor valor para o fator de Folias e, consequentemente, o maior valor para a tensão de colapso.

Na tabela IV.7 são apresentados os valores calculados para a tensão de colapso dos corpos de prova, segundo as equações IV.11 e IV.12.

Tabela IV.7 – Estimativa da tensão de colapso dos corpo de prova considerando o fator de Folias.

Corpo de prova	Descontinuidade	Tensão de colapso (MPa)
Tubo 03	MBTG	407
	MBTP	479
	MATG	407
	MATP	479
Tubo 02	MBTG	513
	MBTP	532
	MATG	517
	MATP	533
Tubo 01	MBTG	537
	MBTP	539
	MATG	537
	MATP	539

Durante os testes hidrostáticos os corpos de provas foram monitorados com sistema de emissão acústica para a coleta de sinais para posterior correlação com os dados de pressão e ultra-som.

IV.7 Sincronização dos dados

Os dados de pressão aplicada, propagação de descontinuidades e emissão acústica foram sincronizados em um único arquivo. As medições de ultra-som para a determinação da profundidade das descontinuidades foram correlacionadas com as medidas de pressão interna para permitir o cálculo dos parâmetros de mecânica da fratura. Os valores de mecânica da fratura foram ordenados em função do tempo para a pesquisa das correlações com os resultados do ensaio de emissão acústica. A sincronização dos dados possibilitou o estudo por intervalos de tempo do teste hidrostático ou de forma cumulativa.

IV.8 Cálculo dos valores de mecânica da fratura

Após a sincronização das medidas de ultra-som e a pressão interna aplicada foram realizados cálculos de mecânica da fratura para determinação dos valores de K_I . Estes cálculos foram realizados utilizando a norma BS 7910.

As análises foram realizadas utilizando os valores de K_I calculados conforme o item IV.3 deste estudo.

IV.9 Cálculo das estatísticas

Em função da grande quantidade de sinais de emissão acústica coletados fez-se necessário uma redução dos dados para a obtenção de correlações entre estes sinais e os valores dos parâmetros de mecânica da fratura. As estatísticas média e desvio padrão foram calculadas com o auxílio de planilha eletrônica *Excel* para os dados de emissão acústica. As estatísticas calculadas foram correlacionadas com os valores de mecânica da fratura obtidos na sincronização dos dados utilizando o método de mínimos quadrados para o estabelecimento de equações.

IV.10 Pesquisa e aplicação das equações

O método de mínimos quadrados e outros métodos de ajuste de equações foram utilizados para o estabelecimento de correlações entre os dados de emissão acústica (tempo de subida, contagem, energia, duração, amplitude, frequência média e contagens para o pico) e as estatísticas calculadas na etapa anterior. Softwares matemáticos, tais como MatLab, foram utilizados para esta tarefa. Foram determinadas as equações de menor grau que apresentavam o menor erro e a melhor representação do fenômeno pesquisado. Parâmetros ou estatísticas que não apresentaram variação não foram utilizadas para determinação de equações para estimar os valores de mecânica da fratura. Durante esta etapa foram empregadas técnicas de filtragem de sinais para melhorar o ajuste das correlações entre os dados. Os filtros utilizados foram inicialmente baseados em

considerações estatísticas (quantidade de desvios padrão da média) e na norma *JIS Z 2342-2002 Method for acoustic emission testing of pressure vessels during pressure tests and classification of test results* [opuscit Mori, 2003]

IV.11 Aplicações em casos reais

As equações obtidas com os resultados dos testes laboratoriais foram utilizadas para a análise de dados de emissão acústica coletados em testes de equipamentos instalados na indústria de petróleo que tenham sido inspecionados por métodos pontuais de ensaios não destrutivos. Os resultados dos ensaios não destrutivos foram compilados para a realização de cálculos de mecânica da fratura. Os resultados dos cálculos de mecânica da fratura foram comparados com os valores obtidos com as equações definidas neste estudo para a proposição de ajustes que envolvam as condições operacionais de campo diferentes das utilizadas neste estudo. Estas condições incluem: espessura, propriedades mecânicas dos materiais de construção, diâmetro, etc.

V. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos, as análises e discussões realizadas para o estabelecimento das conclusões deste trabalho de pesquisa envolvendo emissão acústica e mecânica da fratura.

Nos itens V.1, V.2 e V.3 são apresentados resultados e análises dos corpos de prova Tubo 03, Tubo 02 e Tubo 01, respectivamente. Os resultados são apresentados inicialmente por corpo de prova, utilizando-se uma sub-divisão pela metodologia de análise de dados (MONPAC, dados brutos, correlações de dados).

No item V.4 apresenta-se a análise para o estabelecimento de equações para estimativa de K_I utilizando os resultados do ensaio de emissão acústica.

No item V.5 são apresentados os resultados da aplicação das equações estabelecidas no item V.4 em conjunto de dados reais, ou seja, de ensaios com a técnica de emissão acústica em equipamentos que estavam em funcionamento em unidades operacionais da indústria de petróleo.

No item V.6 apresentam-se as considerações finais, em um subitem, com o objetivo de sumarizar o capítulo e apontar para as conclusões do trabalho.

V.1 Corpo de prova Tubo 03

Na figura 5.1 apresenta-se, em um desenho do duto planificado, a localização dos sensores de emissão acústica no corpo de prova Tubo 03. Os sensores estão identificados por números. As descontinuidades inseridas, identificadas pelas setas, no corpo de prova Tubo 03 deveriam conter as dimensões previstas descritas na tabela V.1. As descontinuidades foram identificadas como metal base ou zona termicamente afetada, e trinca grande e trinca pequena, MB ou MA, e TG ou TP, respectivamente.

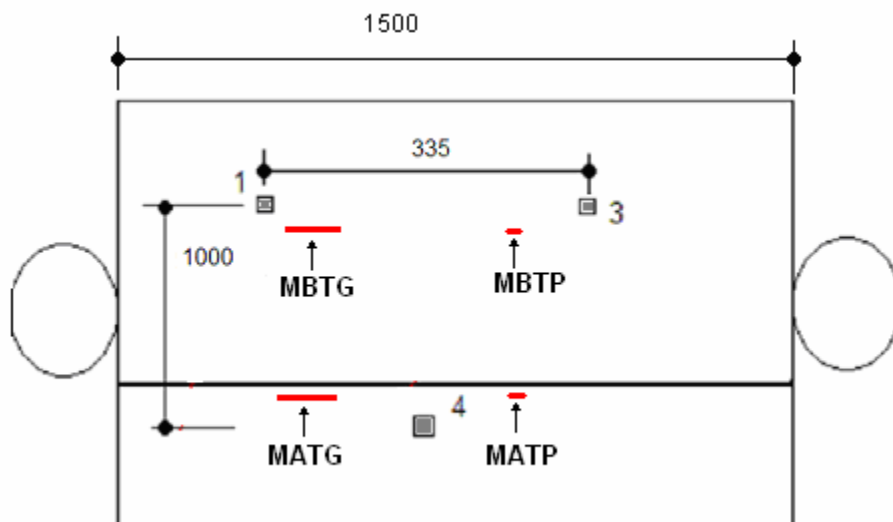


Fig. 5.1 – Localização das descontinuidades no corpo de prova “Tubo 03”.

Tabela V.1 – Dimensões previstas para as descontinuidades inseridas no corpo de prova Tubo 03.

Descontinuidade	Profundidade (mm)	Comprimento (mm)
MBTG	7,0	140
MBTP	7,0	70
MATG	7,0	140
MATP	7,0	70

Na figura 5.2 apresenta-se a curva de pressurização aplicada ao corpo de prova identificado como “Tubo 03”. O incremento de pressão foi obtido utilizando-se acumulador hidráulico e a pressão medida em intervalos de 30 segundos utilizando-se a leitura da medida de transdutor de pressão instalado no corpo de prova.

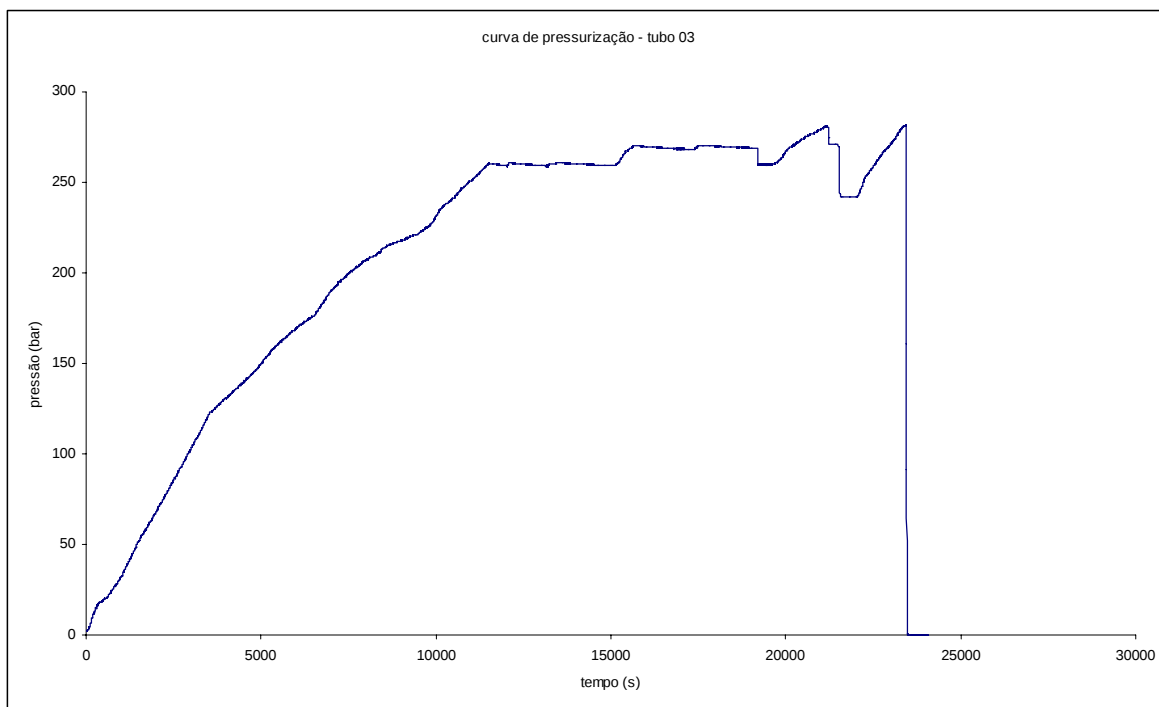


Fig. 5.2 – Curva de pressurização aplicada ao corpo de prova “Tubo 03”.

A descontinuidade MBTG apresentou propagação detectada e medida por ultra-som com a técnica *ToFD* (conforme descrito no item IV.5), até a falha, descrita na tabela V.2 e apresentada de forma gráfica na figura 5.3. Os comprimentos das descontinuidades não apresentaram diferenças entre os valores previstos e os inseridos. As profundidades das descontinuidades apresentaram diferenças entre o previsto e o inserido e esta diferença esta descrita na tabela V.2 para a descontinuidade MBTG e na tabela V.4 para a descontinuidade MBTP. Na tabela V.2 apresentam-se os valores de pressão interna e profundidade da descontinuidade, em função do tempo, coletados durante o teste hidrostático do corpo de prova Tubo 03. Pode-se notar que a profundidade prevista para 7,0 mm foi inserida com um valor de 7,3 mm.

Tabela V.2 – Profundidade da descontinuidade MBTG e pressão interna aplicada ao corpo de prova Tubo 03.

Profundidade (mm)	Pressão interna (bar)	Tempo de ensaio (segundos)
7,3	2,06	0
7,3	248,48	10835
7,4	248,59	10836
7,4	250,37	10950
7,5	250,26	10951
7,5	252,17	11087
7,6	252,17	11087
7,6	254,55	11211
7,8	254,55	11212
7,8	257,14	11349
7,9	257,14	11350
7,9	260,01	11496
8,0	260,09	11497
8,2	260,01	13377
8,2	260,41	13427
8,3	260,48	13425
8,3	266,48	15407
8,4	266,44	15408
8,4	268,87	15556
8,5	268,86	15557
8,5	270,19	15656
8,6	270,16	15657
8,6	269,99	15839
8,8	270,07	15840



Fig. 5.3 – Medição da propagação da descontinuidade MBTG inserida no corpo de prova Tubo 03.

Na tabela V.3 são apresentados os valores de K_I , K_r e L_r , calculados para as pressões internas e profundidades descritas na tabela VI.2. Estes valores foram obtidos utilizando-se as propriedades mecânicas do material empregado e as equações para cálculo de K_I descritos no capítulo IV, item IV.3. Os valores de K_r e L_r são apresentados para a máxima de tensão membrana medida em cada instante de propagação da descontinuidade.

Tabela V.3 – Valores de K_I , L_r e K_r para as profundidades e pressões da descontinuidade MBTG descritas na tabela V.2.

Profundidade (mm)	Tensão de membrana (MPa)	K_I (MPa√m)	L_r	K_r
7,3	4	0,6	0,01	0,00
7,3	435	72,6	0,88	0,32
7,4	435	73,1	0,88	0,32
7,4	439	73,6	0,88	0,32
7,5	438	74,0	0,88	0,32
7,5	442	74,6	0,89	0,33
7,6	442	75,1	0,89	0,33
7,6	446	75,8	0,90	0,33
7,8	446	76,7	0,90	0,34
7,8	450	77,5	0,91	0,34
7,9	450	77,9	0,91	0,34
7,9	456	78,8	0,92	0,34
8	456	79,3	0,92	0,35
8,2	455	80,3	0,92	0,35
8,2	456	80,3	0,92	0,35
8,3	456	80,7	0,92	0,35
8,3	467	82,6	0,94	0,36
8,4	467	83,0	0,94	0,36
8,4	471	83,8	0,95	0,37
8,5	471	84,2	0,95	0,37
8,5	473	84,7	0,95	0,37
8,6	473	85,1	0,95	0,37
8,6	473	85,0	0,95	0,37
8,8	473	86,0	0,95	0,38

Na figura 5.4 apresenta-se o resultado da tabela V.3 em formato gráfico. O início da propagação da descontinuidade sub-crítica, detectada com a técnica ultra-sônica *ToFD* em 10835 s, corresponde a um valor de K_I próximo a 73 MPa√m.

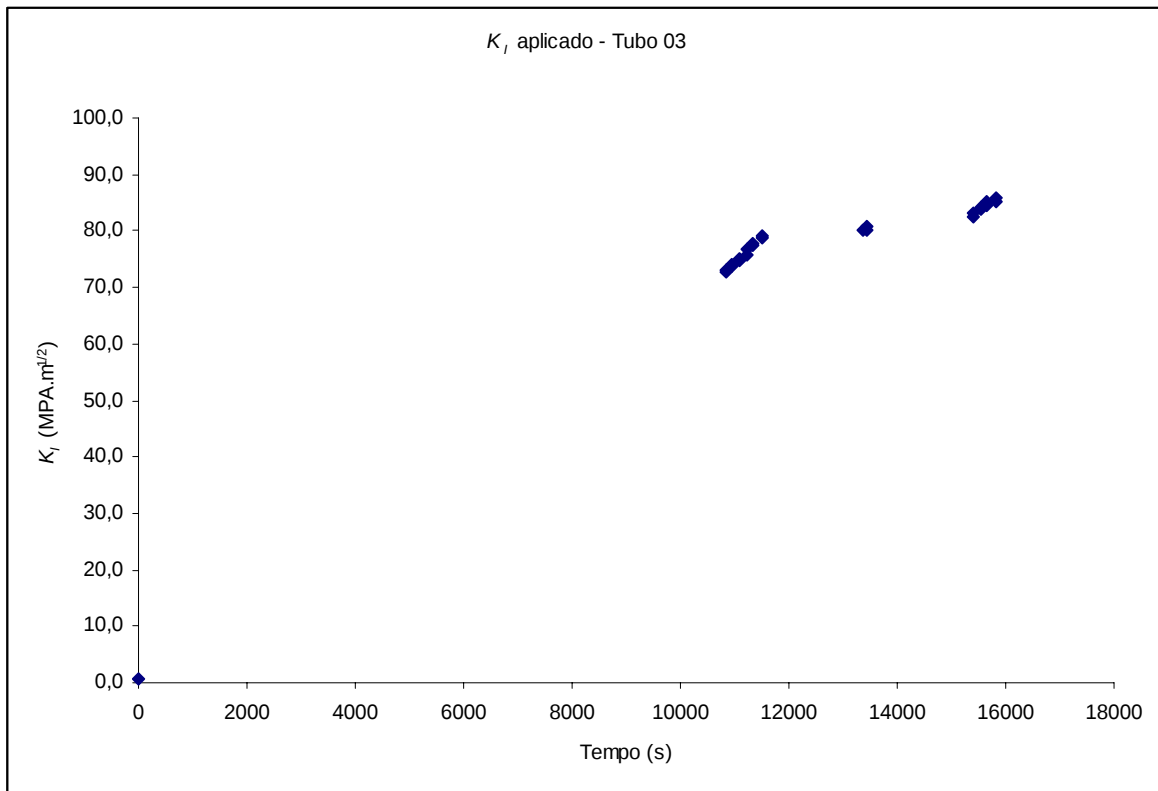


Fig. 5.4 – Gráfico K_I versus tempo de ensaio para o corpo de prova Tubo 03, descontinuidade MBTG.

Na tabela V.4 são apresentados os resultados de K_I , L_r e K_r , para a descontinuidade MBTP.

Tabela V.4 – Valores de K_I , L_r e K_r , para a descontinuidade MBTP, que não apresentou propagação durante o teste hidrostático do corpo de prova Tubo 03.

Profundidade (mm)	Tensão de membrana (MPa)	K_I (MPa√m)	L_r	K_r
7,00	0	0,0	0,00	0,00
7,00	435	68,4	0,88	0,30
7,00	438	68,8	0,88	0,30
7,00	442	69,4	0,89	0,30
7,00	446	70,0	0,90	0,31
7,00	450	70,7	0,91	0,31
7,00	455	71,5	0,92	0,31
7,00	456	71,6	0,92	0,31
7,00	467	73,3	0,94	0,32
7,00	471	74,0	0,95	0,32
7,00	473	74,3	0,95	0,33

Na figura 5.5 apresenta-se o diagrama FAD com as descontinuidades MBTG e MBTP do corpo de prova Tubo 03. Pode-se notar neste gráfico que as descontinuidades inseridas não ultrapassaram a linha limítrofe do diagrama e apresentavam características de falha por colapso plástico. A descontinuidade MBTG levou o corpo de prova a falha.

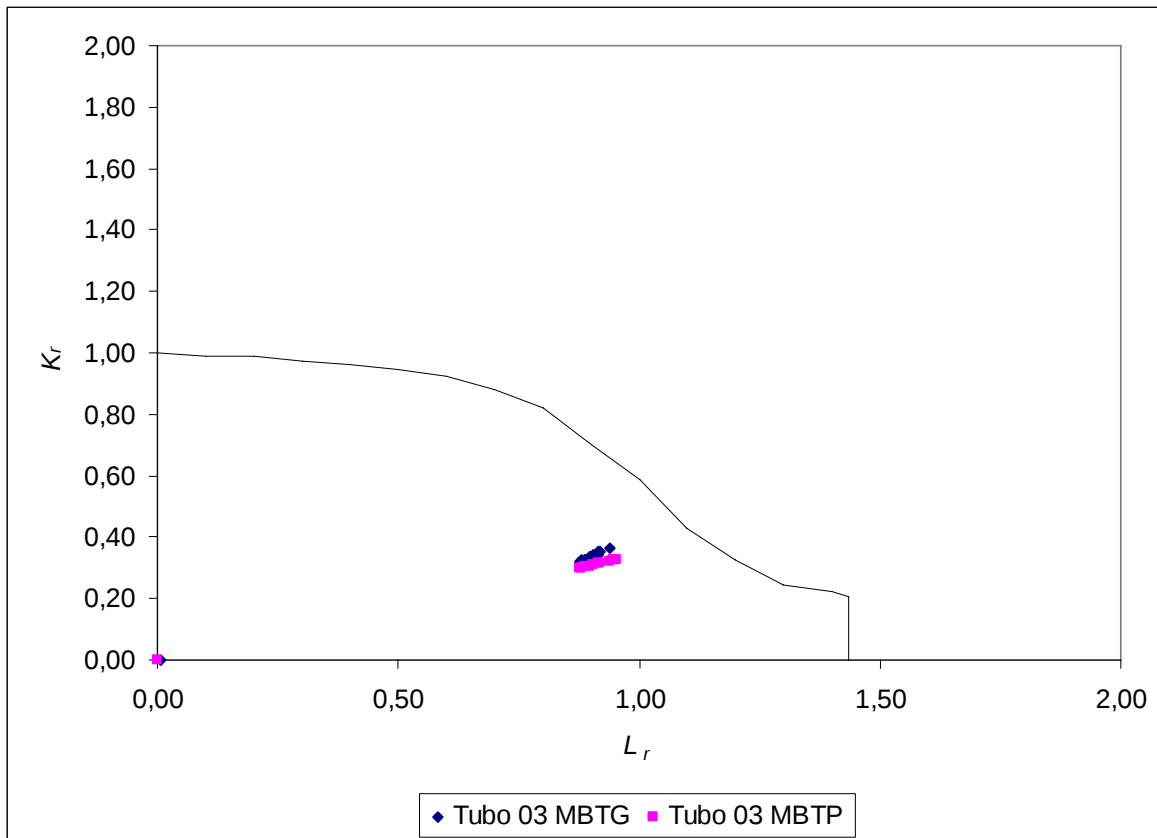


Fig. 5.5 – Diagrama FAD para as descontinuidades analisadas no corpo de prova Tubo 03.

A máxima tensão de membrana aplicada ao corpo de prova Tubo 03 foi de 473 MPa.

A tensão de colapso, calculada utilizando o fator de Folias (descrito no capítulo IV), para as descontinuidades MBTG e MATG foi de 407 MPa. O início da propagação da descontinuidade MBTG ocorreu quando o valor da tensão de membrana atingiu 435 MPa, superior ao valor calculado. A descontinuidade MBTG levou o corpo de prova a falha ao atingir 473 MPa, aproximadamente.

A tensão de colapso calculada para as descontinuidades MBTP e MATP foi de 479 MPa, este valor é superior a tensão de membrana aplicada ao corpo de prova Tubo 03. Estas descontinuidades não apresentaram propagação durante o carregamento hidrostático do corpo de prova.

V.1.1 Resultados do ensaio de emissão acústica

Os dados de emissão acústica podem ser coletados em todos os sensores instalados no corpo de prova. Os sensores instalados foram ajustados para a coleta dos parâmetros básicos de emissão acústica: tempo de subida, contagem, energia, duração e amplitude. Os sinais detectados em um sensor poderiam propagar nos corpos de prova confeccionados e em função disto a mesma fonte de emissão de emissão acústica, seja a propagação de uma descontinuidade ou um sinal espúrio, poderia significar mais de um sinal coletado pela instrumentação de emissão acústica. Para minimizar o problema da reflexão de sinais em função de sua contínua propagação foi utilizada uma técnica de filtragem de sinais conhecida como “primeiro sinal”. A metodologia do primeiro sinal consiste em um filtro baseado em tempo para a redução de dados de modo a não permitir que reflexões do mesmo sinal de emissão acústica detectado em mais de um sensor sejam utilizadas na análise. Este filtro utiliza o valor da velocidade de propagação do sinal de emissão acústica e a maior distância (geralmente a diagonal do corpo de prova planejado) do corpo em teste. Sinais que sejam detectados em outros sensores dentro do tempo necessário de propagação na maior distância do corpo de prova e que permitam a localização precisa de sua origem são filtrados. Por exemplo, em uma coleta de sinais utilizando dois sensores de emissão acústica posicionados em linha onde o tempo de propagação de um sensor para o outro seja 100 μ s, este valor será utilizado para a filtragem dos sinais. Após um dos sensores detectar um sinal de emissão acústica, todo sinal de emissão acústica detectado no outro sensor em um intervalo de tempo inferior a 100 μ s será filtrado e não fará parte do novo arquivo de dados gerados após o filtro. Para coleta de sinais envolvendo mais de dois sensores o mesmo princípio é utilizado, porém adiciona-se ao algoritmo de filtragem a necessidade de que os sinais detectados no tempo inferior ao informado tenham sido localizados em uma posição geométrica da superfície em inspeção. Esta metodologia foi empregada para a filtragem dos sinais e sua posterior apresentação nas figuras de 5.6 a 5.11.

No gráfico da figura 5.6 verifica-se a ocorrência de sinais com tempo de subida entre 0 e 938 μ s durante todo o teste hidrostático do corpo de prova Tubo 03. Após o início da

propagação da descontinuidade (tempo = 10835 s) estes valores não ultrapassam 760 μ s. Os valores acima de 760 μ s foram detectados para valores de K_I inferiores a 73 MPa $\sqrt{\text{m}}$.

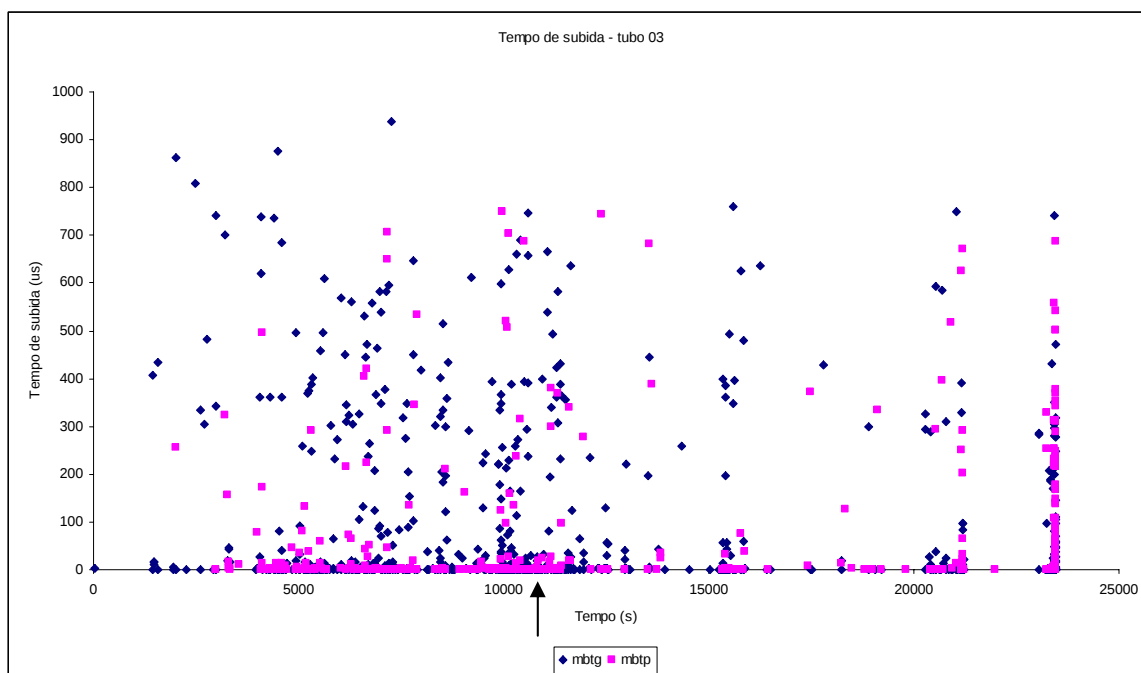


Fig. 5.6 – Gráfico tempo de ensaio *versus* tempo de subida para os sinais detectados no Tubo 03. A seta representa o início da propagação da descontinuidade MBTG.

Na figura 5.7 apresentam-se os valores do parâmetro contagem durante o ensaio hidrostático do corpo de prova Tubo 03. A descontinuidade MGTB teve o início de propagação de sua profundidade, detectada com a técnica ultra-sônica *ToFD*, em 10835 s com um valor de K_I próximo a $73 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Neste gráfico não é possível estabelecer relação entre contagem e a propagação da descontinuidade, e entre contagem e K_I .

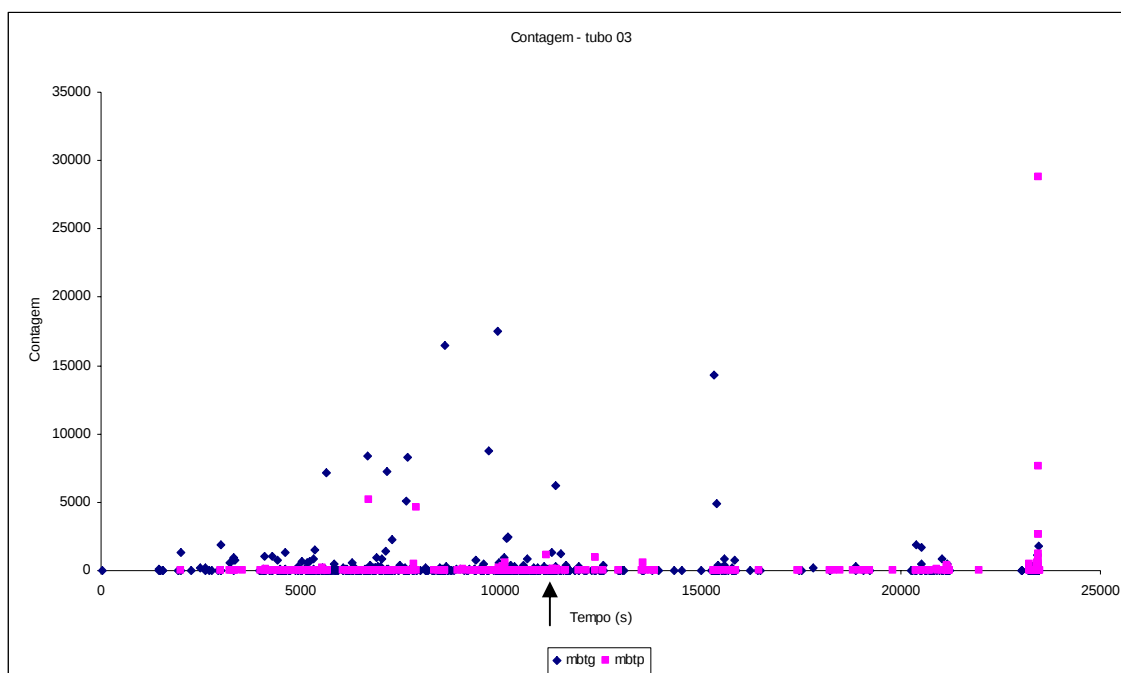


Fig. 5.7 – Gráfico tempo de ensaio *versus* contagem para os sinais detectados no Tubo 03.

A seta representa o início da propagação da descontinuidade MBTG.

Na figura 5.8 apresentam-se os valores do parâmetro energia durante o ensaio hidrostático do corpo de prova Tubo 03. A descontinuidade MGTB teve o início de propagação de sua profundidade, detectada com a técnica ultra-sônica *ToFD*, em 10835 s com um valor de K_I próximo a $73 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Neste gráfico não é possível estabelecer relação entre energia e a propagação da descontinuidade e, entre energia e K_I .

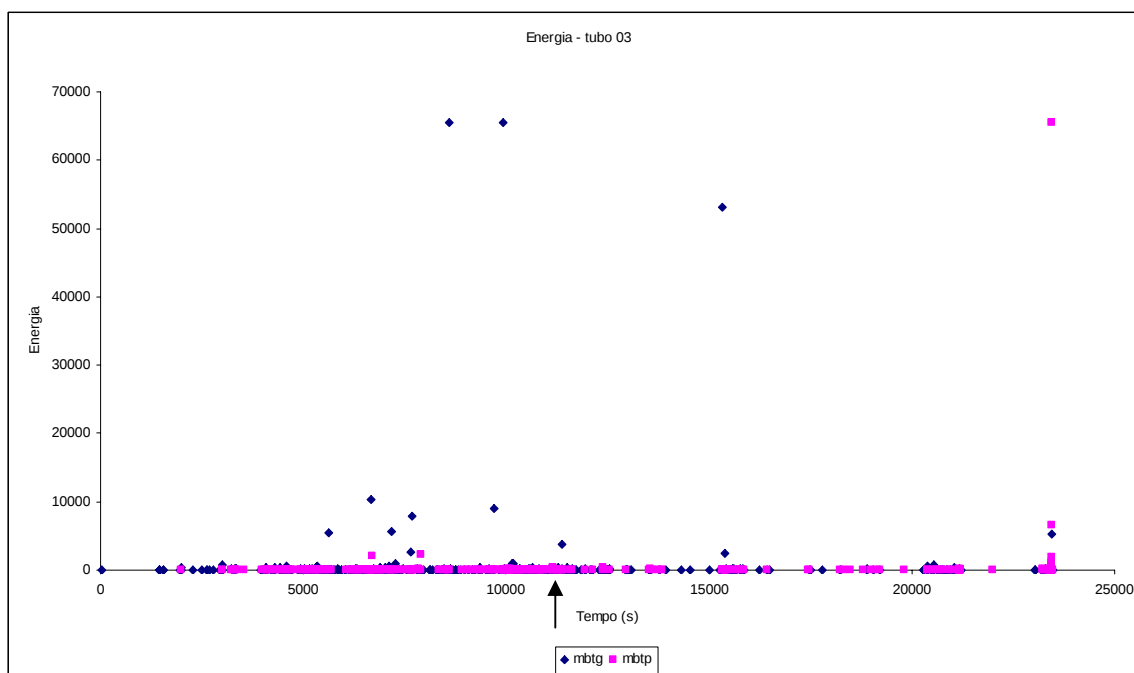


Fig. 5.8 – Gráfico tempo de ensaio *versus* energia para os sinais detectados no Tubo 03. A seta indica o início da propagação da descontinuidade MBTG.

Na figura 5.9 apresentam-se os valores do parâmetro duração durante o ensaio hidrostático do corpo de prova Tubo 03. A descontinuidade MGTB teve o início de propagação de sua profundidade, detectada com a técnica ultra-sônica *ToFD*, em 10835 s com um valor de K_I próximo a $73 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Neste gráfico não é possível estabelecer relação entre duração e a propagação da descontinuidade e, entre duração e K_I .

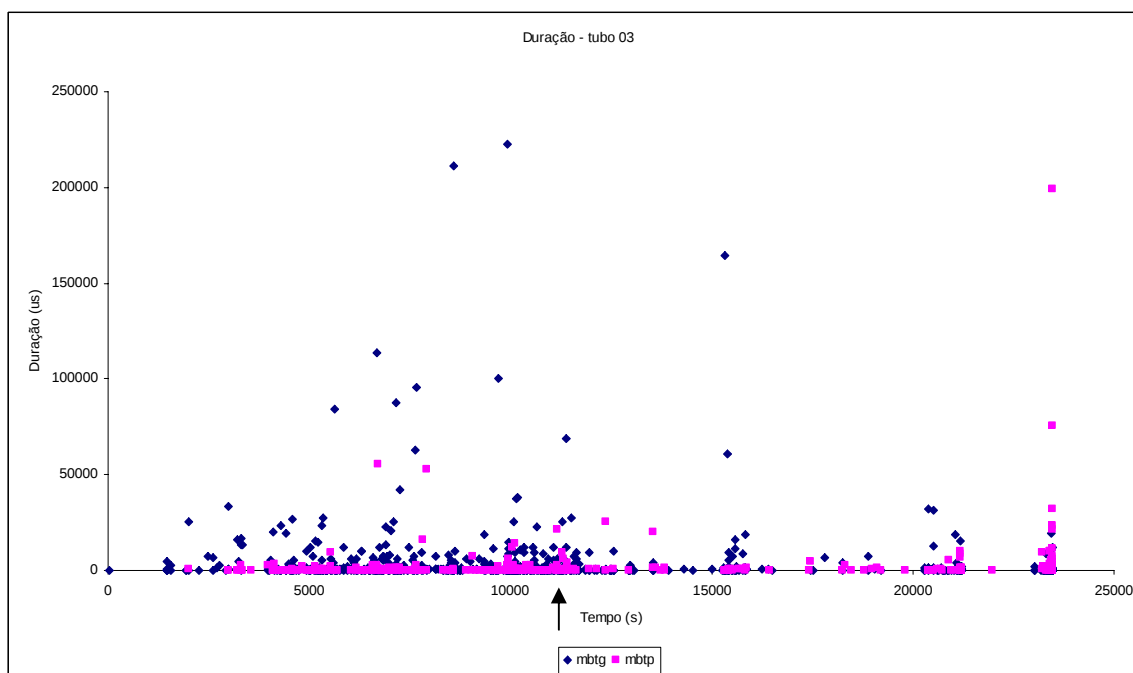


Fig. 5.9 – Gráfico tempo de ensaio *versus* duração para os sinais detectados no Tubo 03. A seta indica o início da propagação da descontinuidade MBTG.

Na figura 5.10 apresentam-se os valores do parâmetro amplitude durante o ensaio hidrostático do corpo de prova Tubo 03. A descontinuidade MGTB teve o início de propagação de sua profundidade, detectada com a técnica ultra-sônica *ToFD*, em 10835 s com um valor de K_I próximo a $73 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Neste gráfico não é possível estabelecer relação entre amplitude do sinal de emissão acústica e a propagação da descontinuidade e, entre amplitude e K_I .

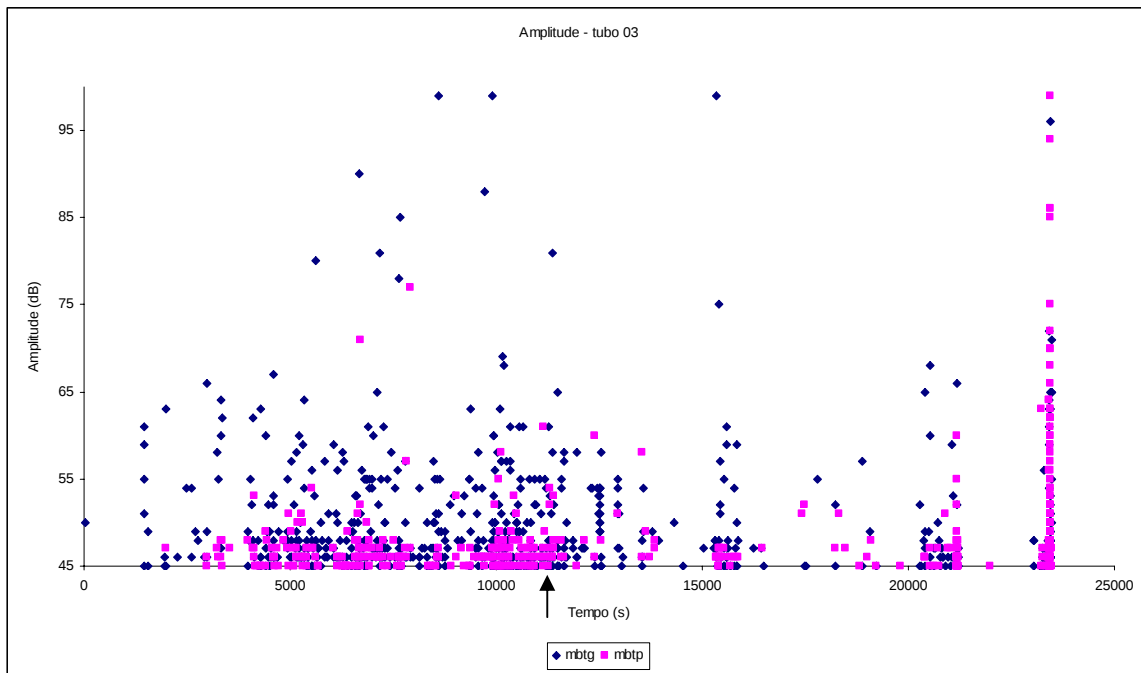


Fig. 5.10 – Gráfico tempo de ensaio *versus* amplitude para os sinais detectados no Tubo 03.
A seta indica o início da propagação da descontinuidade.

A razão obtida entre a contagem e a duração do sinal de emissão acústica é identificada como frequência média do sinal de emissão acústica. Na figura 5.11 apresentam-se os valores do parâmetro frequência média durante o ensaio hidrostático do corpo de prova Tubo 03. Sinais de pequena duração com apenas uma contagem apresentam frequência média próxima a 1 MHz. Estes valores de frequência média podem ser observados no gráfico da figura 5.11, dentro do balão identificado com o termo saturação. A descontinuidade MGTB teve o início de propagação de sua profundidade, detectada com a técnica ultra-sônica *ToFD*, em 10835 s com um valor de K_I próximo a 73 MPa√m. Neste gráfico não é possível estabelecer relação entre frequência média e a propagação da descontinuidade.

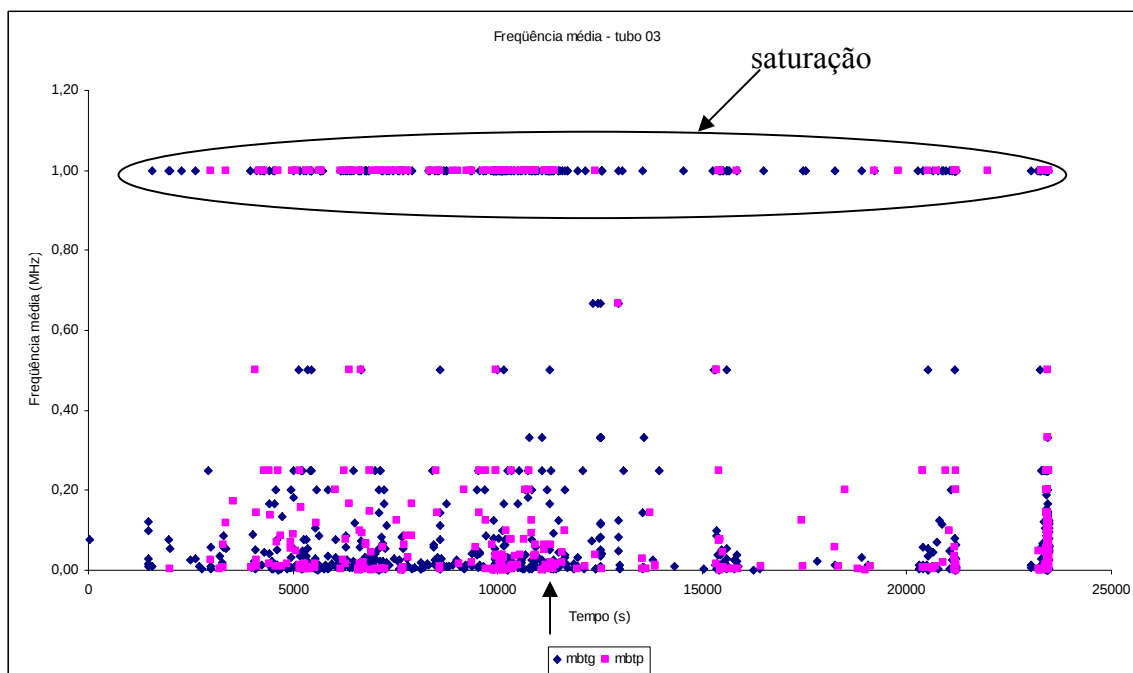


Fig. 5.11 – Gráfico tempo de ensaio *versus* frequência média para os sinais detectados no Tubo 03. A seta vertical indica o início da propagação da descontinuidade MBTG.

V.1.2 Resultados obtidos com o critério MONPAC

A descontinuidade MBTG apresentou propagação, detectada pela técnica ultra-sônica *ToFD*, conforme descrito na tabela V.3. Os valores das profundidades medidas e

apresentadas na tabela V.3 foram obtidos nos tempos de ensaio descritos na tabela V.2. Após a determinação dos instantes de tempo onde ocorreram as detecções das propagações da descontinuidade MBTG foram obtidos os valores do critério MONPAC para os dados de emissão acústica nestes instantes. Os valores do critério MONPAC foram calculados interrompendo-se a análise no instante de tempo desejado. Na tabela V.5 estes valores são apresentados. Para a primeira detecção de propagação, tempo igual a 10836 s, o valor do critério MONPAC até este instante da coleta de dados de emissão acústica foi 3,45 e 17666,8 para os índices *Historic* e *Severity*, respectivamente, no sensor de número 1. Para a segunda detecção de propagação, tempo igual a 10951 s, os valores do critério MONPAC até este instante da coleta de dados foram 3,45 e 17666,8 para os índices *Historic* e *Severity*, respectivamente. Esta metodologia de calcular os índices *Historic* e *Severity* até os instantes de nova detecção de propagação da descontinuidade foi utilizada para os demais sensores (3 e 4) e até a última detecção de propagação registrada. Os sensores 1, 3 e 4 foram posicionados próximos as descontinuidades MBTG e MBTP e entre as descontinuidades MATG e MATP, respectivamente. Embora apenas a descontinuidade MBTG tenha apresentado propagação, detectada pela técnica *ToFD*, os valores do critério MONPAC foram calculados para os outros sensores para permitir a análise e correlação dos dados do critério MONPAC com os valores de K_I aplicados ao corpo de prova.

Tabela V.5 – Resultados do critério MONPAC para o corpo de prova Tubo 03.
Profundidade em mm, pressão em bar e tempo em s.

Profundidade	Pressão	Tempo	MBTG (canal 1)		MBTP (canal 3)		canal 4	
			<i>Historic</i>	<i>Severity</i>	<i>Historic</i>	<i>Severity</i>	<i>Historic</i>	<i>Severity</i>
7,3	2,06	0	-	-	-	-	-	-
7,4	248,59	10836	3,45	17666,8	3,63	17017,9	3,98	12200,6
7,5	250,26	10951	3,45	17666,8	3,63	17017,9	3,98	12227,3
7,6	252,17	11087	3,45	17666,8	3,63	17017,9	3,98	12227,3
7,8	254,55	11212	3,45	17666,8	3,63	17017,9	3,98	12227,3
7,9	257,14	11350	3,45	17666,8	3,63	17017,9	3,98	12227,3
8	260,09	11497	3,45	17822,1	3,63	17150,6	3,98	14250,5
8,2	260,01	13425	3,45	17822,1	3,63	17150,6	3,98	12450,5
8,3	260,48	13425	3,45	17822,1	3,63	17150,6	3,98	12450,5
8,4	266,44	15408	3,45	22886,7	3,63	21408,2	3,98	18294,5
8,5	268,86	15557	3,45	22886,7	3,63	21408,2	3,98	18294,5
8,6	270,16	15657	3,45	22886,7	3,63	21408,2	3,98	18294,5
8,8	270,07	15840	3,45	22886,7	3,63	21408,2	3,98	18294,5

Na figura 5.12 são apresentados os resultados da tabela V.5 em formato gráfico, correlacionando os valores de *Severity index* com os valores de K_I (descritos nas tabelas V.3 e V.4), respectivamente. Não foram utilizados os resultados de *historic index* em função da não variação do resultado durante o teste. Os valores de *Severity index* foram calculados nos instantes onde ocorreram propagações das descontinuidades inseridas, medidas pela técnica ultra-sônica *ToFD*. Optou-se pelo cálculo somente nestes instantes em função de existir uma outra técnica de ensaios não destrutivos (ultra-som *ToFD*) para “validar” os sinais detectados de emissão acústica. Pode-se notar na figura 5.12 que existe uma relação entre o incremento dos valores de *Severity index* e os valores de K_I . Para a descontinuidade MBTP, que não apresentou propagação, os valores de *Severity index* e K_I ultrapassam os valores obtidos para a descontinuidade que apresentou propagação, MBTG, embora os valores de K_I estejam próximos do valor no início da propagação (73 MPa√m).

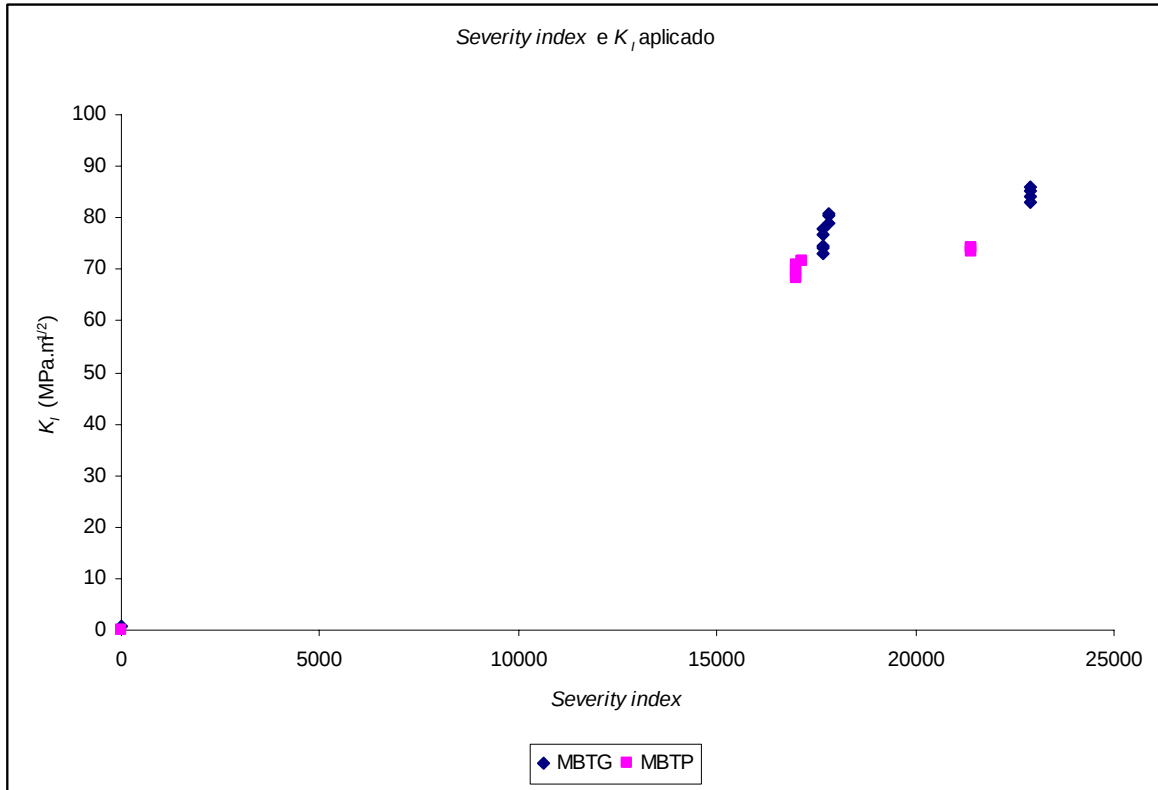


Fig. 5.12 – Gráfico *severity index versus* K_I , para o corpo de prova Tubo 03.

Na figura 5.13 apresenta-se o gráfico do critério MONPAC para os dados da tabela V.5. Pode-se notar que as descontinuidades concentraram os resultados na região “E” do gráfico. Esta região em ensaios de campo significa uma recomendação para interrupção de operação e realização de ensaios não destrutivos para avaliação da integridade do equipamento em teste.

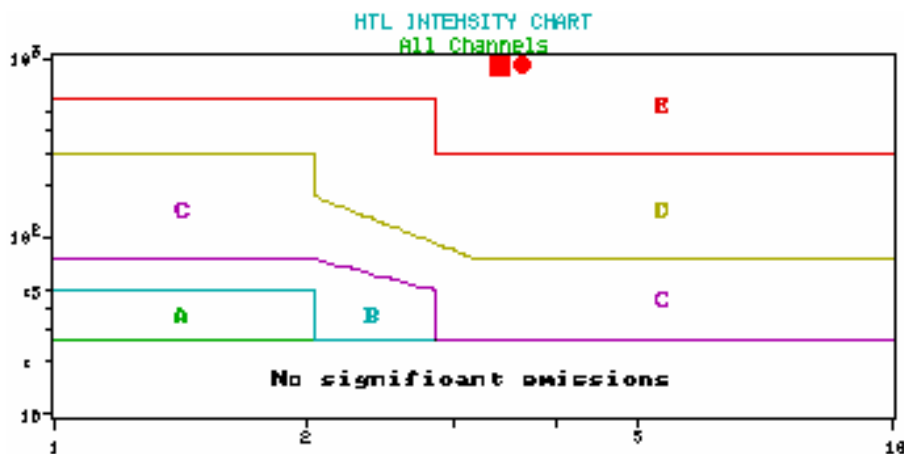


Fig. 5.13 – Gráfico do critério MONPAC para as descontinuidades analisadas no corpo de prova Tubo 03. Quadrado, descontinuidade MBTG, e; Círculo, descontinuidade MBTP.

V.1.3 Análise com localização exata de fontes de emissão acústica

Quando o sinal de emissão acústica gerado pela descontinuidade propaga no objeto em teste e é coletado em mais de um sensor pode-se determinar a localização exata desta fonte de emissão acústica. O sinal localizado de emissão acústica é denominado evento de emissão acústica.

Neste item são apresentados os resultados da correlação dos valores K_I com os valores dos parâmetros dos sinais localizados de emissão acústica.

Na tabela V.6 são apresentados os valores dos parâmetros de emissão acústica dos eventos coletados nas regiões das descontinuidades inseridas no corpo de prova Tubo 03 durante a realização do teste hidrostático. A descontinuidade que falhou durante o teste hidrostático pode ser identificada pelos sinais detectados no sensor 1.

Tabela V.6 – Eventos de emissão acústica detectados nas regiões das descontinuidades inseridas no corpo de prova Tubo 03.

Tempo (s)	Sensor	Tempo de subida	Contagens	Energia	Duração	Amplitude
10113	1	229	36	37	4442	51
11079	1	12	1	1	132	47

Os dados apresentados na tabela V.6 foram sincronizados com os dados da tabela V.3. Esta sincronização está apresentada na tabela V.7.

Tabela V.7 – Valores dos parâmetros de emissão acústica e valores de mecânica da fratura para a obtenção de equações de correlação.

Tempo (s)	K_I	Tempo de subida	Contagens	Energia	Duração	Amplitude
0	0	0	0	0	0	0
10113	68,4	229	36	37	4442	51
11079	74,6	241	37	38	4574	98

Todos os parâmetros de emissão acústica apresentaram coeficientes de correlação, com o valor de K_I , acima de 0,90. Deve-se ressaltar a pequena quantidade de eventos localizados na região da descontinuidade, apenas 2, e que um destes eventos (tempo = 10113 s) ocorreu antes da detecção da propagação com o método ultra-sônico. Este evento foi detectado sem propagação detectável e abaixo do valor de $73 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ identificado no início da propagação detectável, pelo método ultra-sônico, para a propagação da descontinuidade.

A propagação de sinais de emissão acústica ocorre pela interação da onda mecânica (sinal de emissão acústica) com a estrutura do corpo de prova em teste. Durante esta propagação os fenômenos de absorção, espalhamento e atenuação estão presentes, fazendo com que ocorra um decréscimo da intensidade e da quantidade de sinais ao longo da distância percorrida. Em superfícies curvas, como a seção transversal do corpo de prova (um anel cilíndrico), a reflexão de sinais também é presente alterando os modos de propagação e os ângulos para a propagação das ondas que trafegam internamente na seção transversal do segmento de duto. Estes fatores limitam a utilização da localização exata

como critério de identificação de regiões críticas para ensaios de emissão acústica durante testes hidrostáticos, fato este comprovado pela pequena quantidade de sinais localizados (eventos) no corpo de prova Tubo 03.

V.2 Corpo de prova Tubo 02

Na figura 5.14 apresenta-se o desenho planificado do corpo de prova “Tubo 02” com a localização dos sensores de emissão acústica. Os sensores estão identificados por números. As descontinuidades inseridas, identificadas pelas setas, no corpo de prova Tubo 02 deveriam conter as dimensões previstas descritas na tabela V.8. As descontinuidades foram identificadas como metal base ou zona termicamente afetada, e trinca grande e trinca pequena, MB ou MA, e TG ou TP, respectivamente.

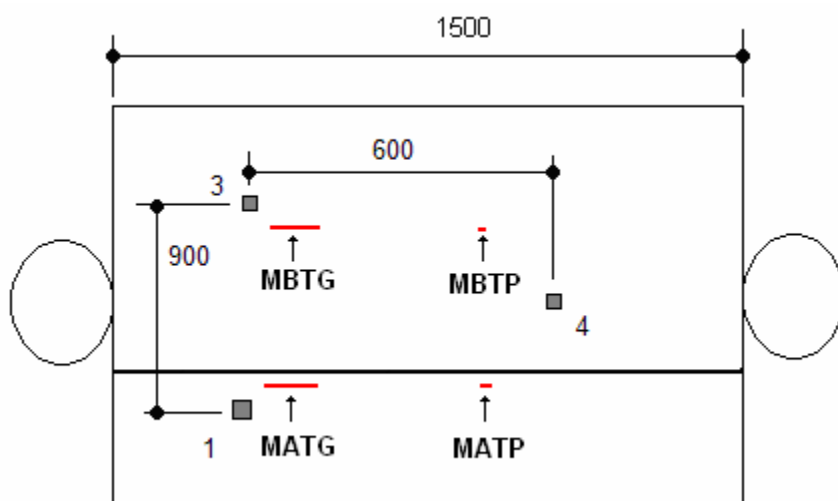


Fig. 5.14 – Desenho do corpo de prova Tubo 02 com a localização das descontinuidades.

As descontinuidades inseridas no corpo de prova Tubo 02 apresentavam as dimensões descritas na tabela V.8 e foram identificadas como metal base ou zona termicamente afetada, e trinca grande ou trinca pequena, MB ou MA e TG ou TP, respectivamente.

Tabela V.8 – Descontinuidades inseridas no corpo de prova Tubo 02.

Descontinuidade	Profundidade (mm)	Comprimento (mm)
MBTG	3,91	72
MBTP	3,81	36
MATG	3,53	72
MATP	3,58	36

Na figura 5.15 apresenta-se a curva de pressurização aplicada ao corpo de prova Tubo 02.

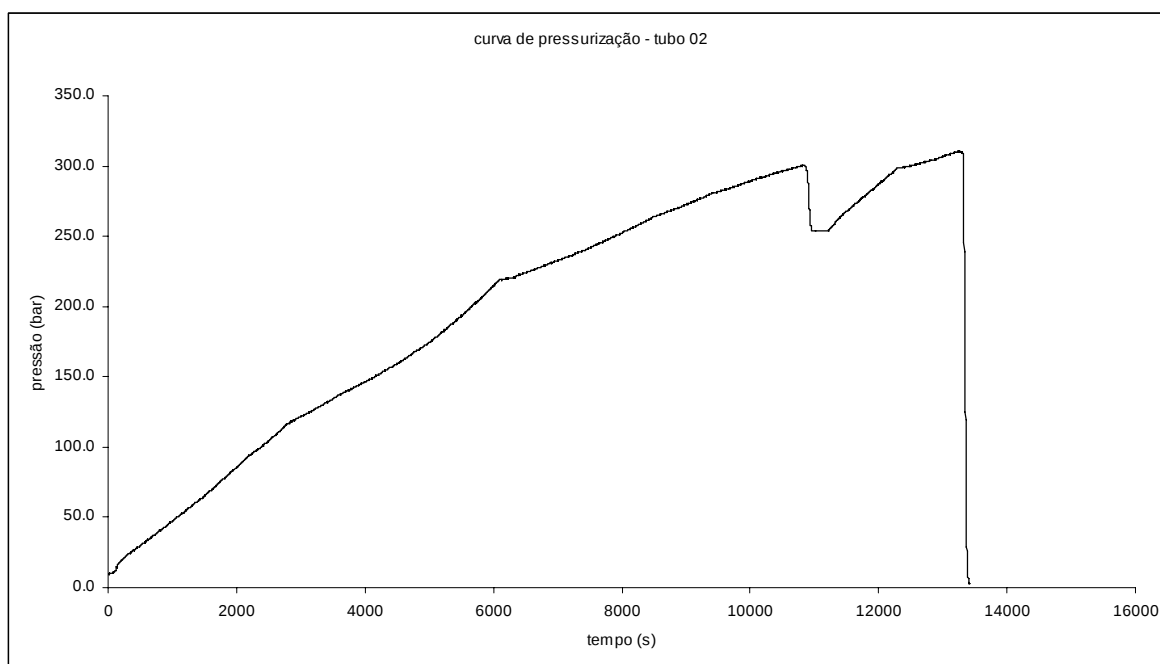


Fig. 5.15 – Curva de pressurização aplicada ao corpo de prova Tubo 02.

As descontinuidades inseridas não apresentaram propagação na medição de suas respectivas profundidades. Na tabela V.9 são apresentados os valores de pressão interna em função do tempo de ensaio.

Tabela V.9 – Curva de pressurização aplicada ao corpo de prova Tubo 02, descrita na figura 5.15.

Pressão interna (bar)	Tempo de ensaio (s)
9,4	1
24,5	335
33,4	601
59,1	1327
86,8	2030
131,0	3370
137,4	3604
138,3	3657
174,4	4999
198,3	5619
211,8	5936
220,4	6287
237,4	7277
272,3	8989
275,9	9183
279,2	9344
280,3	9404
283,4	9627
288,2	9932
290,4	10088

Na tabela V.10 são apresentados os valores de K_I para as pressões internas aplicadas descritas na tabela V.9. Estes valores foram obtidos utilizando as propriedades mecânicas do material empregado e as equações para cálculo de K_I descritos no capítulo IV, item IV.3. Pode-se notar que os valores máximos de K_I não ultrapassaram o valor obtido no corpo de prova Tubo 03 de 73 MPa√m. A não propagação das descontinuidades pode indicar que algum valor próximo a 73 MPa√m seja um valor limite para a propagação das descontinuidades.

Tabela V.10– Valores de K_I , L_r e K_r , para as profundidades e pressões descritas na tabelas V.8 e V.9. Pressão em bar; tensão de membrana em MPa e K_I em MPa $\sqrt{m}$.

Pressão	Tensão de membrana	MBTG			MBTP			MATG			MATP		
		K_I	L_r	K_r	K_I	L_r	K_r	K_I	L_r	K_r	K_I	L_r	K_r
9,4	16	2,0	0,03	0,01	1,9	0,03	0,01	1,9	0,03	0,01	1,9	0,03	0,01
24,5	43	5,2	0,09	0,02	4,9	0,09	0,02	5,0	0,09	0,02	4,8	0,09	0,02
33,4	59	7,1	0,12	0,03	6,7	0,12	0,03	6,8	0,12	0,03	6,6	0,12	0,03
59,1	104	12,6	0,21	0,06	11,9	0,21	0,05	12,0	0,21	0,05	11,6	0,21	0,05
86,8	152	18,5	0,31	0,08	17,5	0,31	0,08	17,7	0,31	0,08	17,1	0,31	0,07
131,0	229	28,0	0,46	0,12	26,4	0,46	0,12	26,7	0,46	0,12	25,8	0,46	0,11
137,4	241	29,3	0,48	0,13	27,7	0,48	0,12	28,0	0,48	0,12	27,0	0,48	0,12
138,3	242	29,5	0,49	0,13	27,9	0,49	0,12	28,2	0,49	0,12	27,2	0,49	0,12
174,4	306	37,2	0,61	0,16	35,2	0,61	0,15	35,5	0,61	0,16	34,3	0,61	0,15
198,3	347	42,3	0,70	0,19	40,0	0,70	0,18	40,4	0,70	0,18	39,0	0,70	0,17
211,8	371	45,2	0,75	0,20	42,7	0,75	0,19	43,1	0,75	0,19	41,7	0,75	0,18
220,4	386	47,1	0,78	0,21	44,5	0,78	0,19	44,9	0,78	0,20	43,4	0,78	0,19
237,4	416	50,7	0,84	0,22	47,9	0,84	0,21	48,3	0,84	0,21	46,7	0,84	0,20
272,3	477	58,1	0,96	0,25	55,0	0,96	0,24	55,4	0,96	0,24	53,6	0,96	0,23
275,9	483	58,9	0,97	0,26	55,7	0,97	0,24	56,2	0,97	0,25	54,3	0,97	0,24
279,2	489	59,6	0,98	0,26	56,3	0,98	0,25	56,9	0,98	0,25	54,9	0,98	0,24
280,3	491	59,8	0,99	0,26	56,6	0,99	0,25	57,1	0,99	0,25	55,2	0,99	0,24
283,4	496	60,5	1,00	0,26	57,2	1,00	0,25	57,7	1,00	0,25	55,8	1,00	0,24
288,2	505	61,5	1,02	0,27	58,2	1,02	0,25	58,7	1,02	0,26	56,7	1,02	0,25
290,4	509	62,0	1,02	0,27	58,6	1,02	0,26	59,1	1,02	0,26	57,2	1,02	0,25

Na figura 5.16 apresenta-se o diagrama FAD com as descontinuidades MBTG, MBTP, MATG e MATP do corpo de prova Tubo 02. Pode-se notar neste gráfico que as descontinuidades inseridas não ultrapassaram a linha limítrofe do diagrama e apresentavam características de falha por colapso plástico. Estas descontinuidades não apresentaram propagação durante o carregamento hidrostático do corpo de prova.

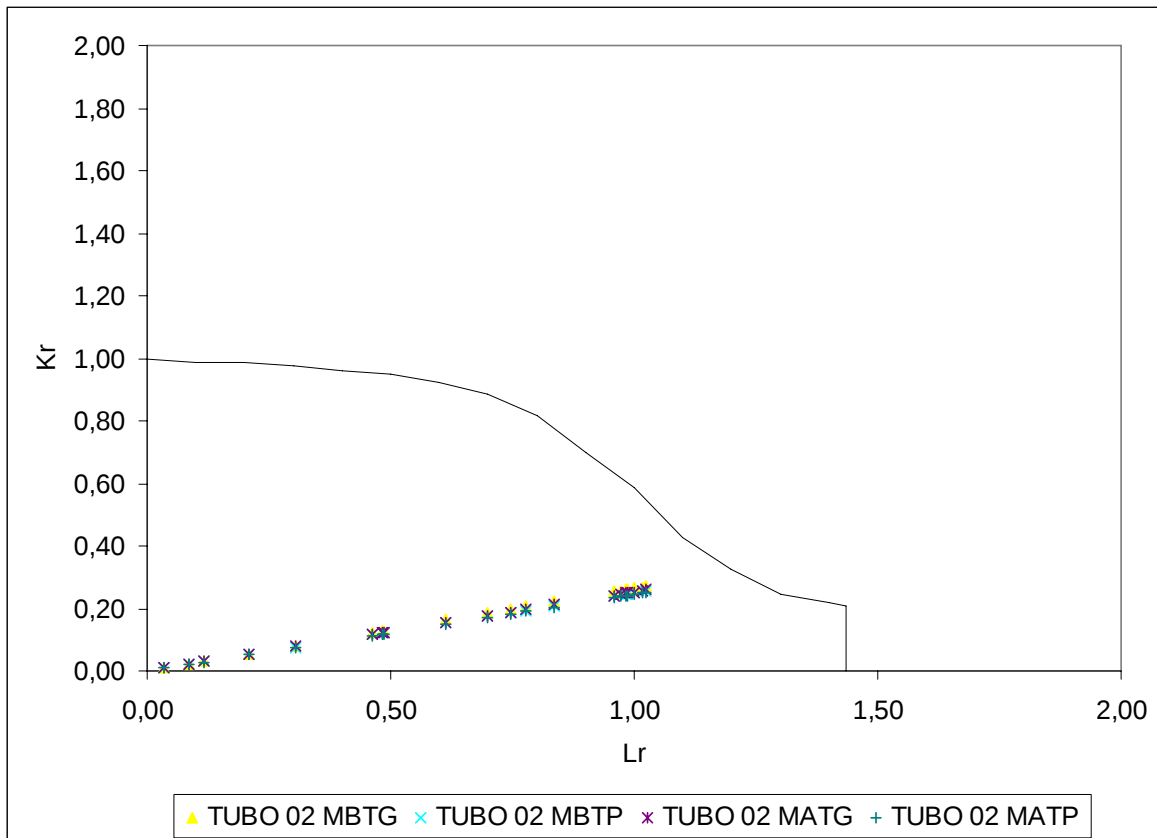


Fig. 5.16 – Diagrama FAD para as descontinuidades analisadas no corpo de prova Tubo 02.

A máxima tensão de membrana aplicada ao corpo de prova Tubo 02 foi de 509 MPa.

A tensão de colapso, calculada utilizando o fator de Folias (descrito no capítulo IV), para as descontinuidades MBTG, MATG, MBTP e MATP, foram respectivamente 513 MPa, 517 MPa, 532 MPa e 533 MPa. Estes valores são superiores a tensão de membrana aplicada ao corpo de prova Tubo 02.

V.2.1 Resultados do ensaio de emissão acústica

Nas figuras de 5.17 a 5.22 serão apresentados de forma gráfica os valores dos parâmetros de emissão acústica. Estes resultados foram analisados considerando a não propagação das descontinuidades inseridas no corpo de prova Tubo 02. A metodologia “primeiro sinal” descrita no item V.1.1 foi utilizada para a apresentação destes dados.

Na figura 5.17 pode-se notar que o parâmetro tempo de subida apresentou os mesmos valores durante todo o teste hidrostático do corpo de prova Tubo 02. Estes valores variaram entre 0 μ s e 1035 μ s. Conforme apresentado no corpo de prova Tubo 03, os valores de K_I durante o teste hidrostático do corpo de prova Tubo 02 não foram superiores a 73 MPa $\sqrt{m}$ e apresentaram tempos de subida superiores a 760 μ s.

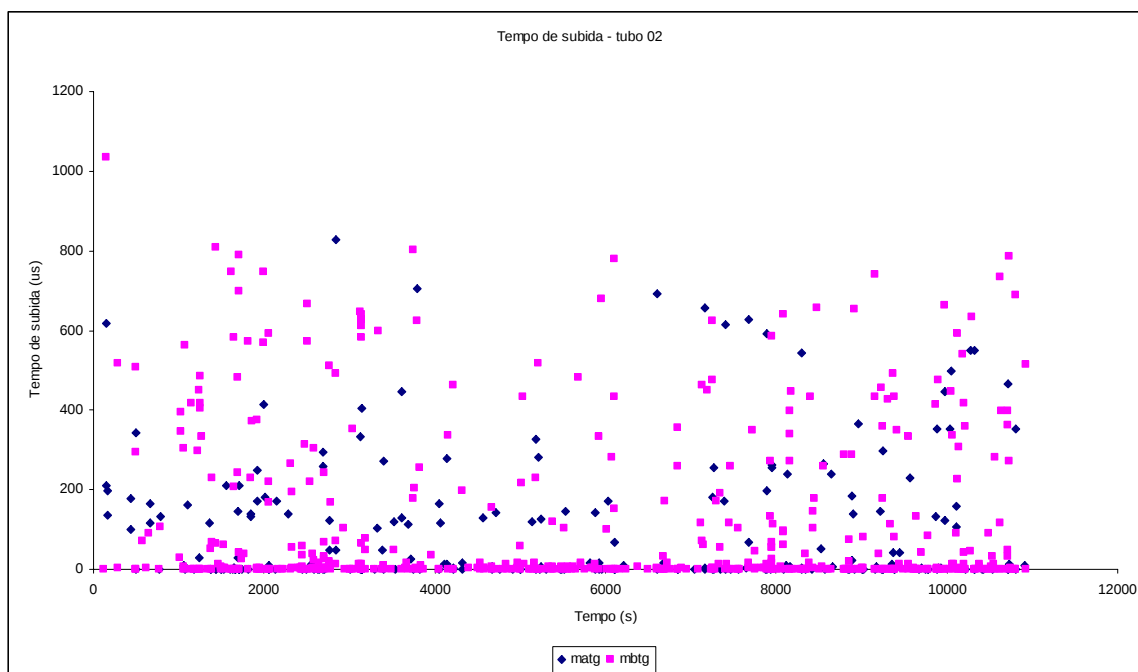


Fig. 5.17 – Gráfico tempo de ensaio *versus* tempo de subida, detectado durante o teste hidrostático do corpo de prova Tubo 02.

Na figura 5.18 percebe-se que os valores máximos de contagem no corpo de prova Tubo 02, que não apresentou propagação da descontinuidade, não atingiram os mesmos patamares obtidos no corpo de prova Tubo 03. No corpo de prova Tubo 03 estes valores atingiram 65000 μ s e no corpo de prova Tubo 02 os valores máximos foram próximos a 7000 μ s.

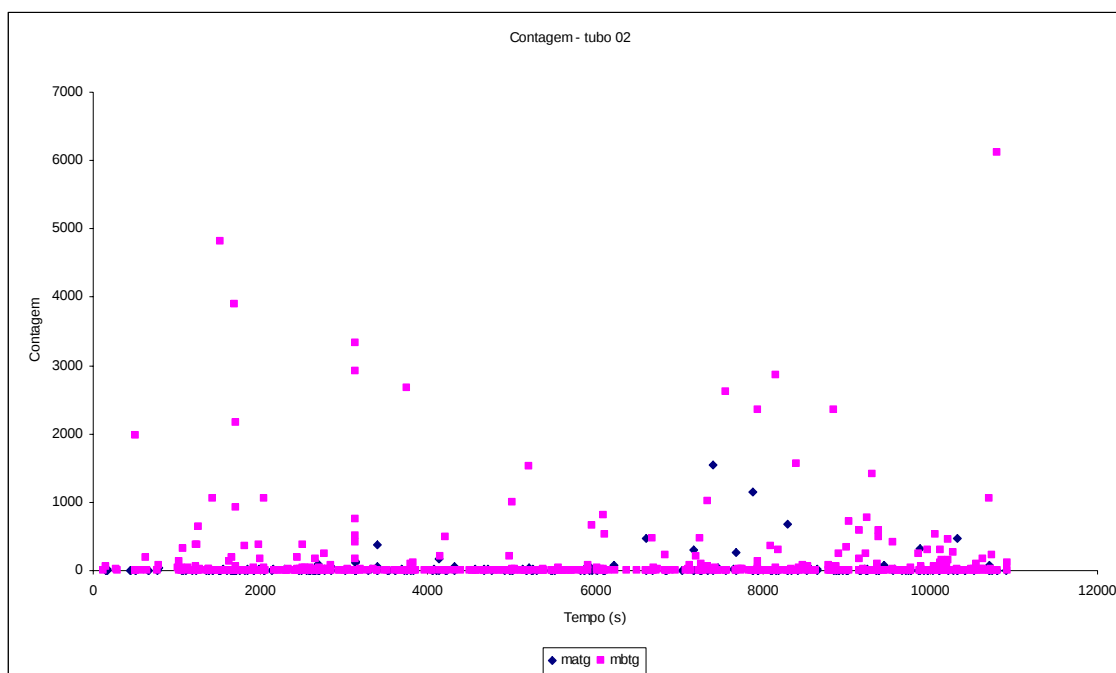


Fig. 5.18 – Gráfico tempo de ensaio *versus* contagem, detectado durante o teste hidrostático do corpo de prova Tubo 02.

O parâmetro de emissão acústica energia apresentou no corpo de prova Tubo 02 valores próximos a 5000, conforme pode ser visto na figura 5.19. No corpo de prova Tubo 03, que apresentou propagação de uma das descontinuidades, estes valores foram próximos a 65000.

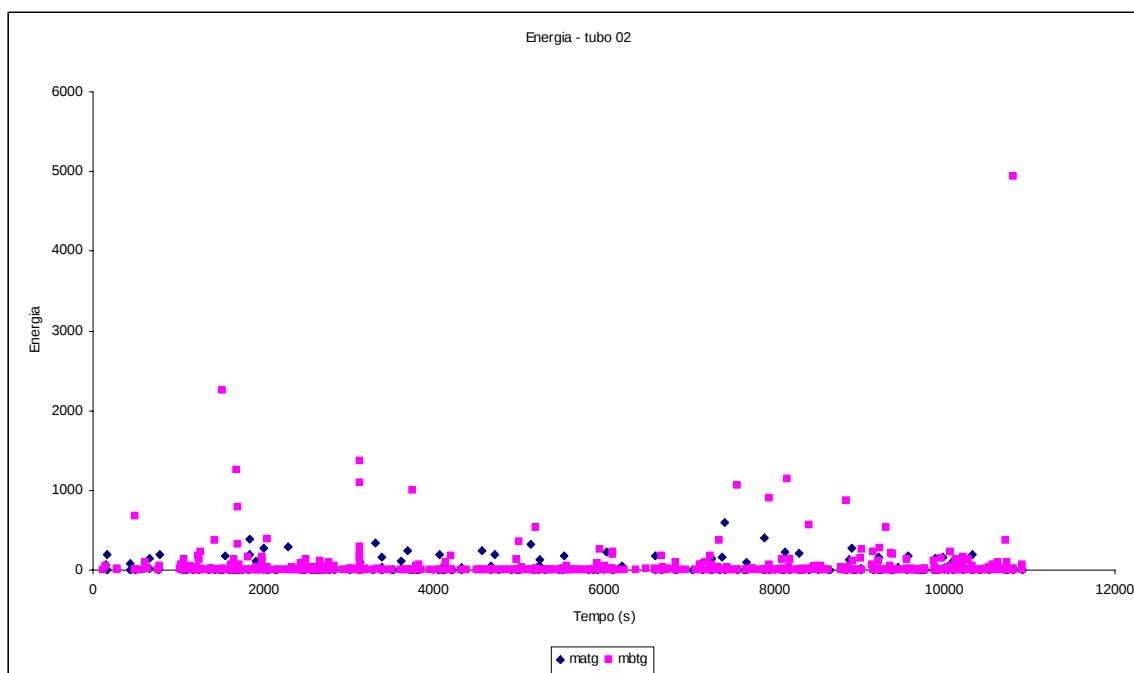


Fig. 5.19 – Gráfico tempo de ensaio *versus* energia, detectado durante o teste hidrostático do corpo de prova Tubo 02.

Sinais de emissão acústica com duração de até 80000 μs foram detectados no corpo de prova Tubo 02, como apresentado na figura 5.20. No corpo de prova Tubo 03, que apresentou propagação de uma das descontinuidades, os sinais detectados apresentaram duração de aproximadamente 250000 μs .

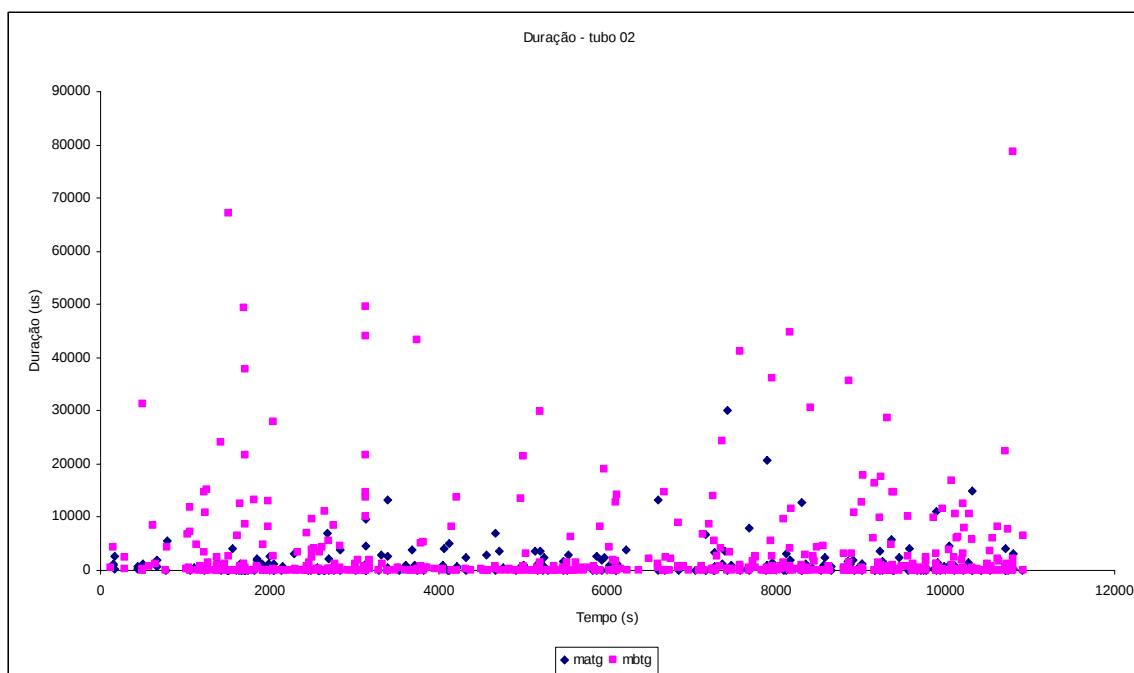


Fig. 5.20 – Gráfico tempo de ensaio *versus* duração, detectado durante o teste hidrostático do corpo de prova Tubo 02.

O gráfico apresentado na figura 5.21 apresenta sinais com amplitudes de até 85 dB. Estes valores são, aproximadamente, 10 dB inferiores aos detectados no corpo de prova Tubo 03, onde foi detectada a propagação de uma das descontinuidades utilizando o método ultra-sônico *ToFD*.

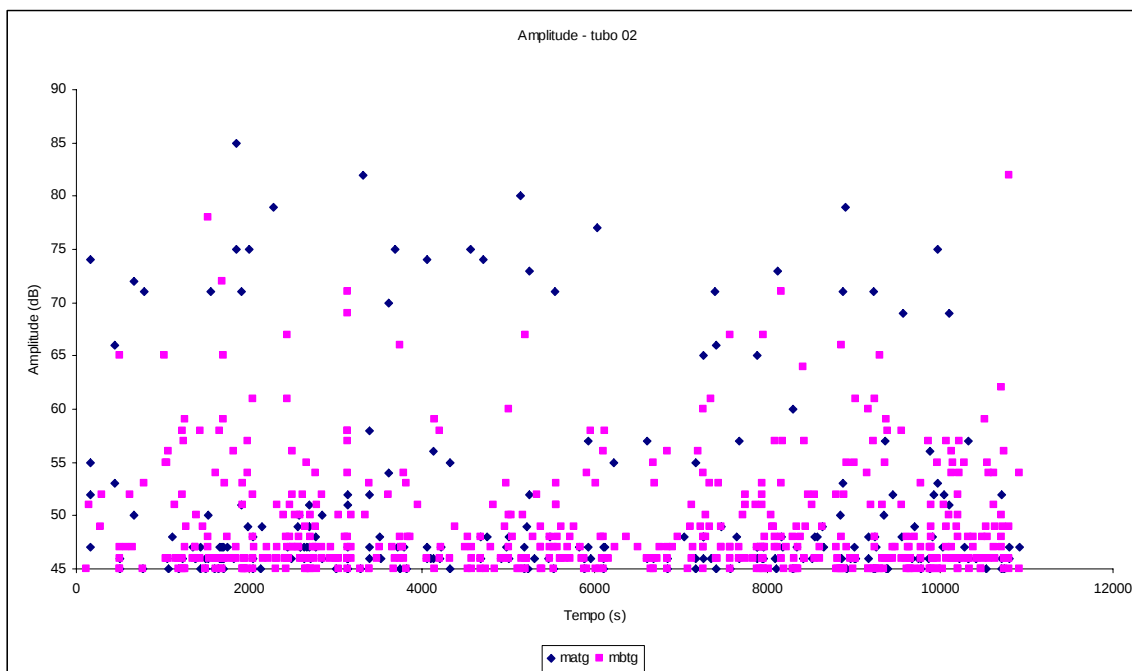


Fig. 5.21 – Gráfico tempo de ensaio *versus* amplitude, detectado durante o teste hidrostático do corpo de prova Tubo 02.

Os valores de frequência média dos sinais de emissão acústica detectados nos corpos de prova Tubo 02 (fig. 5.22) e Tubo 03 (fig 5.11) são similares, não permitindo a diferenciação entre os corpos de prova e, conseqüentemente, alguma inferência que permita identificar a propagação ou não de descontinuidades. Sinais de pequena duração com apenas uma contagem apresentam frequência média próxima a 1 MHz. Estes valores de frequência média podem ser observados no gráfico da figura 5.22, dentro do balão identificado com o termo saturação.

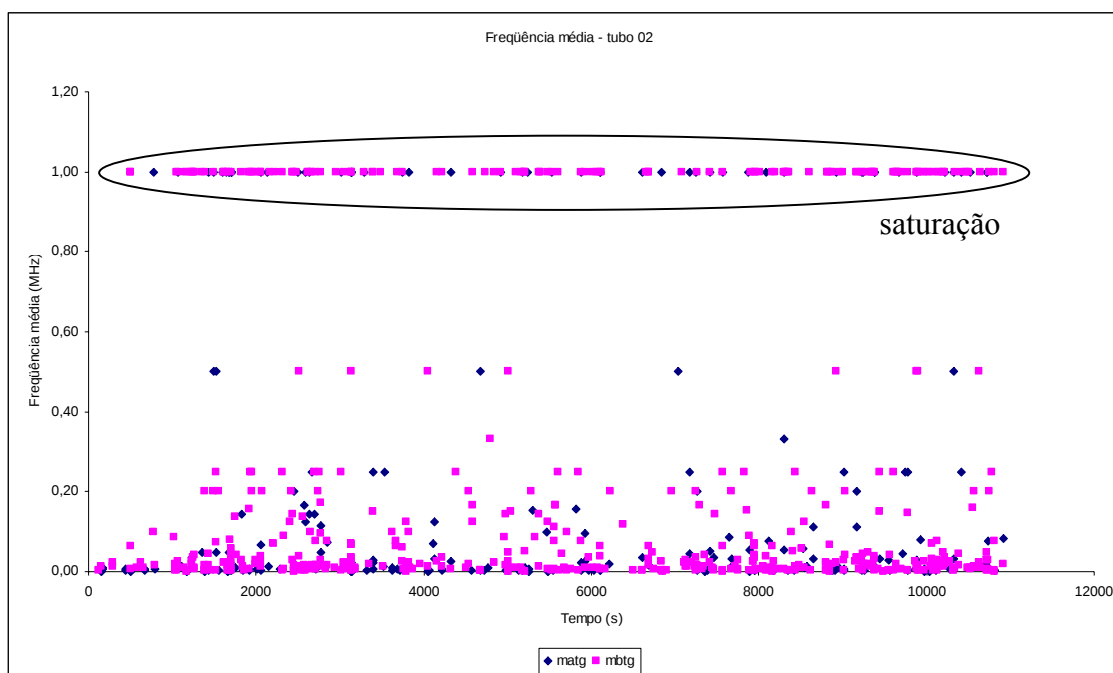


Fig. 5.22 – Gráfico tempo de ensaio *versus* frequência média, detectado durante o teste hidrostático do corpo de prova Tubo 02.

V.2.2 Análise com o critério MONPAC

Apresenta-se na tabela V.11 a análise dos dados de emissão acústica com o critério MONPAC. Os valores do critério MONPAC foram calculados interrompendo-se a análise no instante de tempo desejado. A primeira análise dos dados de ultra-som com a técnica *ToFD* determinou os instantes de propagação das descontinuidades inseridas. Estes instantes estão descritos na coluna “tempo” na tabela V.11. Ao final do teste hidrostático verificou-se que não houve propagação das descontinuidades. Em função disto foi realizada

uma nova análise dos dados de *ToFD* e um erro na rotina de cálculo das profundidades, que indicariam a propagação ou não descontinuidades, foi encontrado. Esta nova análise não identificou propagação das descontinuidades. Como não ocorreu propagação de descontinuidade detectável pelo método ultra-sônico *ToFD*, os tempos utilizados na primeira análise foram utilizados para a obtenção dos valores do critério MONPAC. O primeiro valor foi obtido para o tempo igual a 601 s, o valor do critério MONPAC até este instante da coleta de dados de emissão acústica foi 2,69 e 74,40 para os índices *Historic* e *Severity*, respectivamente, na descontinuidade MBTG (sensor 3). O segundo valor foi obtido para o tempo igual a 1327 s, os valores do critério MONPAC até este instante da coleta de dados foram 2,16 e 74,50 para os índices *Historic* e *Severity*, respectivamente, na descontinuidade MATG (sensor 1). Esta metodologia de calcular os índices *Historic* e *Severity* em tempos crescentes do teste hidrostático do corpo de prova Tubo 02 foi utilizada em todos os sensores até o término do ensaio. Os sensores 1, 3 e 4 foram posicionados próximos as descontinuidades MATG e MBTG e entre as descontinuidades MATP e MBTP, respectivamente. Embora nenhuma das descontinuidades tenha apresentado propagação detectável pela técnica *ToFD*, os valores do critério MONPAC foram obtidos para permitir a análise e correlação dos dados do critério MONPAC com os valores de K_I aplicados ao corpo de prova.

Tabela V.11 – Resultados do critério MONPAC, para os dados coletados no corpo de prova

Tubo 02. Pressão em bar, tempo em s.

Pressão	Tempo	MATG (canal 1)		MBTG (canal 3)		canal 4	
		<i>Historic</i>	<i>Severity</i>	<i>Historic</i>	<i>Severity</i>	<i>Historic</i>	<i>Severity</i>
33,4	601	-	-	2,69	74,4	2,62	7,50
59,1	1327	2,16	74,50	2,69	163,00	2,62	62,00
86,8	2030	2,16	182,90	2,69	637,00	2,62	268,50
131,0	3370	2,16	182,90	2,69	660,40	2,62	268,50
137,4	3604	2,16	232,70	2,69	878,60	2,62	284,40
128,3	3657	2,16	232,70	2,69	878,60	2,62	284,40
174,4	4999	2,16	253,00	2,69	950,10	2,62	540,80
198,3	5619	2,16	265,90	2,69	971,20	2,62	723,30
211,8	5936	2,16	265,90	2,69	971,20	2,62	723,30
220,4	6287	2,16	269,40	2,69	971,20	2,62	723,30
237,4	7277	2,16	269,40	2,69	971,20	2,62	1211,10
272,3	8989	2,16	334,60	2,69	1171,80	2,62	1247,10
275,9	9183	2,16	334,60	2,69	1171,80	2,62	1247,10
279,2	9344	2,16	334,60	2,69	1171,80	2,62	1247,10
280,3	9404	2,16	334,60	2,69	1171,80	2,62	1247,10
283,4	9627	2,16	334,60	2,69	1171,80	2,62	1247,10
288,2	9932	2,16	334,60	2,69	1171,80	2,62	1247,10
290,4	10086	2,16	334,60	2,69	1171,80	2,62	1277,10

Os dados foram sincronizados com os dados da tabela V.10 e são apresentados na tabela V.12 para as descontinuidades MBTG e MATG, canais 3 e 1, respectivamente. Os dados do canal 4 não foram utilizados, pois não foi possível definir se os sinais coletados são oriundos das descontinuidades MBTP ou MATP, em função do posicionamento dos sensores de emissão acústica.

Tabela V.12 – Valores de K_I sincronizados com os resultados do critério MONPAC para as descontinuidades MBTG e MATG.

Tensão de membrana (MPa)	MBTG		MATG	
	<i>Severity</i>	K_I	<i>Severity</i>	K_I
0	0	0	0	0
57	74,4	7,1		
101	163	12,6	74,5	12,0
148	637	18,5	182,9	17,7
223	660,4	28		
234	878,6	29,3	232,7	28,0
297	950,1	37,2	253	35,5
337	971,2	42,3	265,9	40,4
375			269,4	44,9
463			334,6	55,4
494	1171,8	62,0		

Na figura 5.23 são apresentados os resultados da tabela V.12 em formato gráfico. As duas descontinuidades do corpo de prova Tubo 02 apresentadas nestes gráficos possuíam o mesmo comprimento, 72 mm, porém, profundidades diferentes, 3,53 mm e 3,91 mm para as descontinuidades MATG e MBTG, respectivamente. Pode-se notar que as duas descontinuidades apresentam valores de *Severity index* e taxas de incremento diferentes. Os valores mais altos de *Severity index* foram encontrados na descontinuidade de maior profundidade (MBTG). Embora os valores de K_I tenham apresentado a mesma faixa de variação, pode-se notar que para a descontinuidade de maior profundidade (MBTG) o valor máximo foi superior, pois o valor de K_I é incrementado pelo aumento da profundidade. Deve ser enfatizado que embora estas variações tenham sido observadas, o método ultrassônico *ToFD* não detectou propagação das descontinuidades inseridas e os valores calculados para *Severity index* foram uma ordem de grandeza inferior aos valores detectados no corpo de prova Tubo 03, onde ocorreu propagação e fratura durante o teste hidrostático.

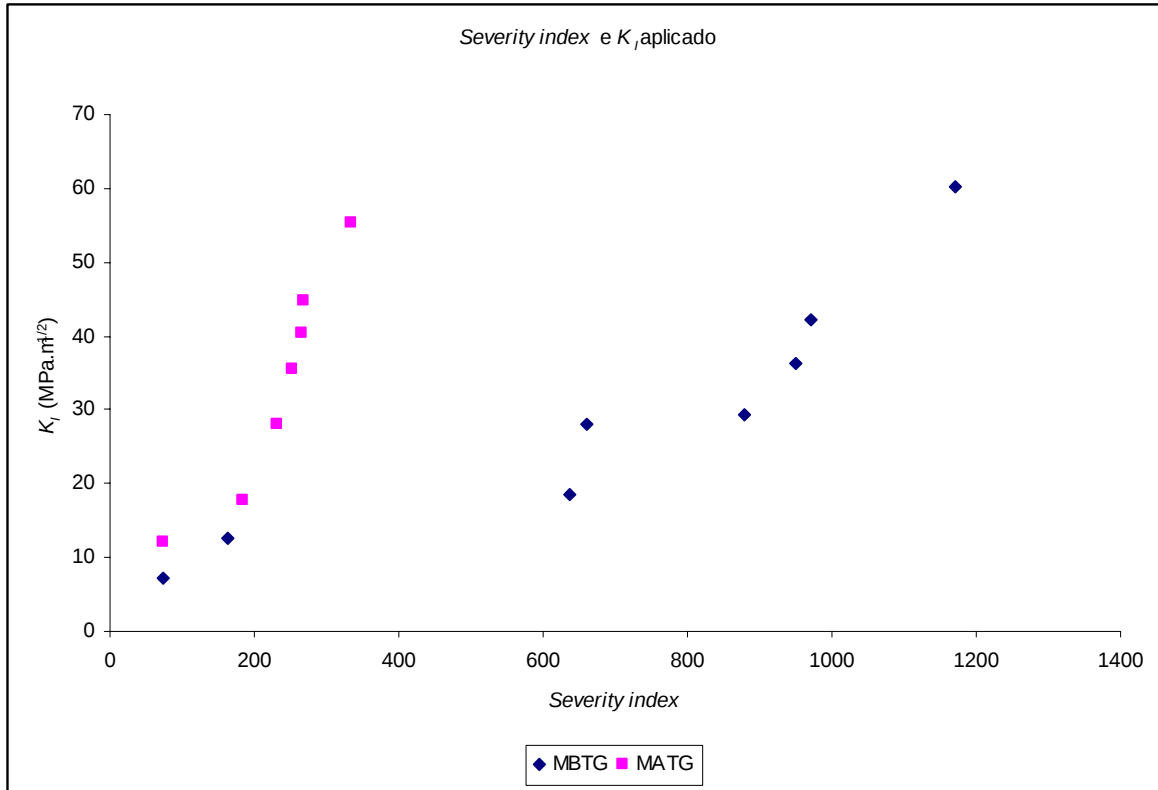


Fig. 5.23 – Gráfico *severity index versus K_I* , para as descontinuidades inseridas no corpo de prova Tubo 02.

Na figura 5.24 apresenta-se o gráfico do critério MONPAC para os dados da tabela V.11. Pode-se notar que a descontinuidade MATG foi classificada inicialmente como “C” e ao final do teste foi classificada como “D”, enquanto a descontinuidade MBTG foi classificada inicialmente como “C” e ao final do teste foi classificada como “E”. Estas classificações em ensaios de campo indicam a recomendação para execução de ensaios não destrutivos complementares, e a interrupção de operação e realização de ensaios não destrutivos para avaliação da integridade do equipamento em teste, respectivamente para as classificações “D” e “E”.

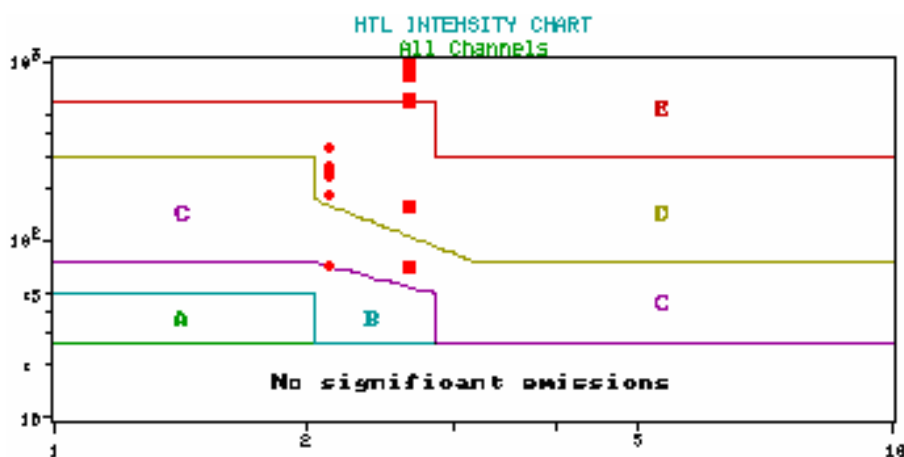


Fig. 5.24 – Gráfico do critério MONPAC para as descontinuidades analisadas no corpo de prova Tubo 02. Quadrado, descontinuidade MBTG, e; Círculo, descontinuidade MATG.

V.2.3 Análise com localização exata de fontes de emissão acústica.

Quando o sinal de emissão acústica gerado pela descontinuidade propaga no objeto em teste e é coletado em mais de um sensor pode-se determinar a localização exata desta fonte de emissão acústica. O sinal localizado de emissão acústica é denominado evento de emissão acústica.

Neste item são apresentados os resultados da correlação dos valores de mecânica da fratura com os valores dos parâmetros de emissão acústica para o corpo de prova Tubo 02.

Na tabela V.13 são apresentados os valores dos parâmetros de emissão acústica dos eventos coletados na região das descontinuidades MATG do corpo de prova Tubo 02 durante a realização do teste hidrostático. Na região da descontinuidade MBTG não foram localizados sinais de emissão acústica. A pequena localização de sinais de emissão acústica pode ser explicada por fenômenos de absorção e/ou espalhamento conforme descrito no item V.1.3.

Tabela V.13 – Eventos de emissão acústica detectados na região da descontinuidade MATG do corpo de prova Tubo 02.

Tempo (s)	Sensor	Tempo de subida	Contagens	Energia	Duração	Amplitude
7877	1	1	1	0	1	47

Os dados apresentados na tabela V.13 foram sincronizados com os dados da tabela V.10 para a obtenção de correlações entre os sinais de emissão acústica e mecânica da fratura e são apresentados na tabela V.14. Por se tratar de apenas um par de pontos não foram calculados índices de correlação.

Tabela V.14 – Somatório dos valores dos parâmetros de emissão acústica e valores de mecânica da fratura para a obtenção de equações de correlação.

Tempo (s)	K_I	Tempo de subida	Contagens	Energia	Duração	Amplitude
0	0	0	0	0	0	0
7877	58,1	1	1	0	1	47

V.3 Corpo de prova Tubo 01

Na figura 5.25 apresenta-se o desenho planificado do corpo de prova “Tubo 01” com a localização dos sensores de emissão acústica. Os sensores estão identificados por números. As descontinuidades inseridas, identificadas pelas setas, no corpo de prova Tubo 03 deveriam conter as dimensões previstas descritas na tabela V.15. As descontinuidades foram identificadas como metal base ou zona termicamente afetada e, trinca grande e trinca pequena, MB ou MA, e, TG ou TP, respectivamente.

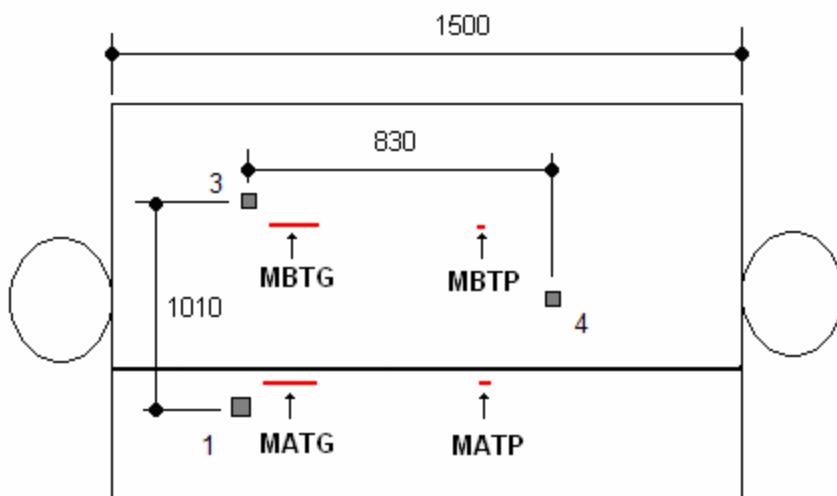


Fig. 5.25 – Desenho do corpo de prova Tubo 01 com a localização das descontinuidades e sensores de emissão acústica.

As descontinuidades inseridas no corpo de prova Tubo 01 apresentavam as dimensões descritas na tabela V.23 e foram identificadas como metal base ou zona termicamente afetada, e trinca grande ou pequena, MB ou MA e TG ou TP, respectivamente.

Tabela V.15 – Descontinuidades inseridas no corpo de prova Tubo 01.

Descontinuidade	Profundidade (mm)	Comprimento (mm)
MBTG	2,90	38
MBTP	1,90	19
MATG	1,85	38
MATP	1,88	19

Na figura 5.26 apresenta-se a curva de pressurização aplicada ao corpo de prova Tubo 01.

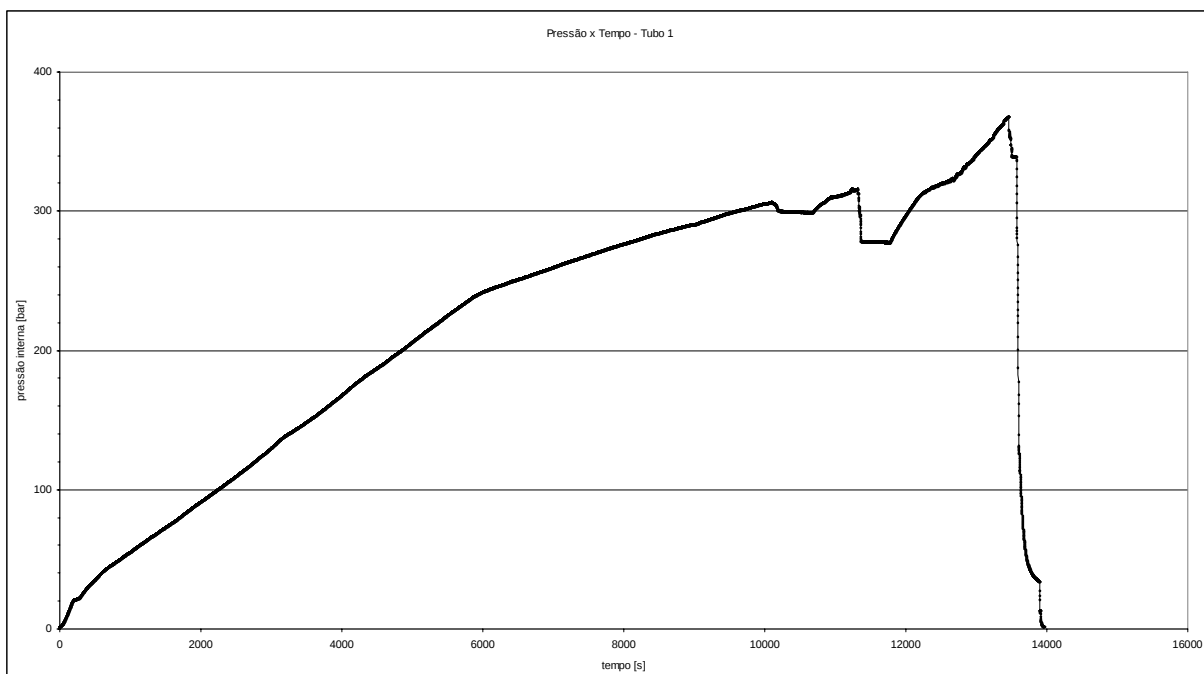


Fig. 5.26 – Curva de pressurização aplicada ao corpo de prova Tubo 01.

A descontinuidade inserida no metal base com menor comprimento (MBTP) apresentou um acréscimo de 0,52 mm na profundidade, detectado com a técnica *ToFD*. A máxima pressão interna imposta ao corpo de prova Tubo 01, durante a monitoração com emissão acústica, foi de 301,1 bar, embora valores próximos a 380 bar tenham sido aplicados. Na tabela V.16 são apresentados os valores de pressão interna em função do tempo de ensaio.

Tabela V.16 - Pressão interna aplicada ao corpo de prova Tubo 01.

Pressão interna (bar)	Tempo de ensaio (s)
1,1	1
184,8	4437
231,8	5685
258,2	6933
292,7	9151
301,1	9705
300,1	10201
299,0	10676

Na tabela V.17 são apresentados os valores de K_I , L_r e K_r , para as pressões internas descritas na tabela V.16. Estes valores foram obtidos utilizando as propriedades mecânicas do material empregado e as equações para cálculo de K_I descritos no capítulo IV, item IV.3. Pode-se notar que os valores máximos de K_I não ultrapassaram o valor limiar para propagação, estabelecido no corpo de prova Tubo 03 de 73 MPa√m. Embora este limiar não tenha sido atingido uma das descontinuidades, MBTP, apresentou crescimento de sua profundidade em 0,52 mm, contrariando o suposto valor limiar de 73 MPa√m.

Tabela V.17 – Valores de K_I , L_r e K_r , para as pressões descritas na tabela V.16. Pressão em bar; tensão de membrana em MPa; e, K_I em MPa√m.

Pressão	Tensão de membrana	MBTG			MBTP			MATG			MATP		
		K_I	L_r	K_r	K_I	L_r	K_r	K_I	L_r	K_r	K_I	L_r	K_r
1,1	2	0,2	0,00	0,00	0,2	0,00	0,00	0,2	0,00	0,00	0,2	0,00	0,00
184,8	324	33,4	0,65	0,15	27,2	0,65	0,12	26,5	0,65	0,12	26,4	0,65	0,12
231,8	406	41,9	0,82	0,18	34,2	0,82	0,15	33,2	0,82	0,15	33,1	0,82	0,15
258,2	452	46,7	0,91	0,20	38,1	0,91	0,17	37,0	0,91	0,17	36,8	0,91	0,17
292,7	513	52,9	1,03	0,23	43,2	1,03	0,19	41,9	1,03	0,19	41,8	1,03	0,19
301,1	527	54,4	1,06	0,24	44,4	1,06	0,20	43,1	1,06	0,19	43,0	1,06	0,20
300,1	526	54,3	1,06	0,24	44,2	1,06	0,20	43,0	1,06	0,19	42,8	1,06	0,20
299,0	524	54,1	1,05	0,24	44,1	1,05	0,22	47,1	1,05	0,19	42,7	1,05	0,19

A máxima tensão de membrana aplicada ao corpo de prova Tubo 01 foi de 526 MPa.

A tensão de colapso, calculada utilizando o fator de Folias (descrito no capítulo IV), para as descontinuidades MBTG e MATG foi de 537 MPa. Este valor é superior a tensão de membrana aplicada ao corpo de prova Tubo 01. Estas descontinuidades não apresentaram propagação durante o carregamento hidrostático do corpo de prova.

A tensão de colapso calculada para as descontinuidades MBTP e MATP foi de 539 MPa, este valor é superior a tensão de membrana aplicada ao corpo de prova Tubo 01. A descontinuidade MBTP apresentou propagação durante o carregamento hidrostático do corpo de prova.

Na figura 5.27 apresenta-se o diagrama FAD com as descontinuidades MBTG, MBTP, MATG e MATP do corpo de prova Tubo 01. Pode-se notar neste gráfico que as descontinuidades inseridas não ultrapassaram a linha limítrofe do diagrama e apresentavam características de falha por colapso plástico. Como citado no parágrafo anterior, apenas a descontinuidade MBTP apresentou propagação durante o teste hidrostático.

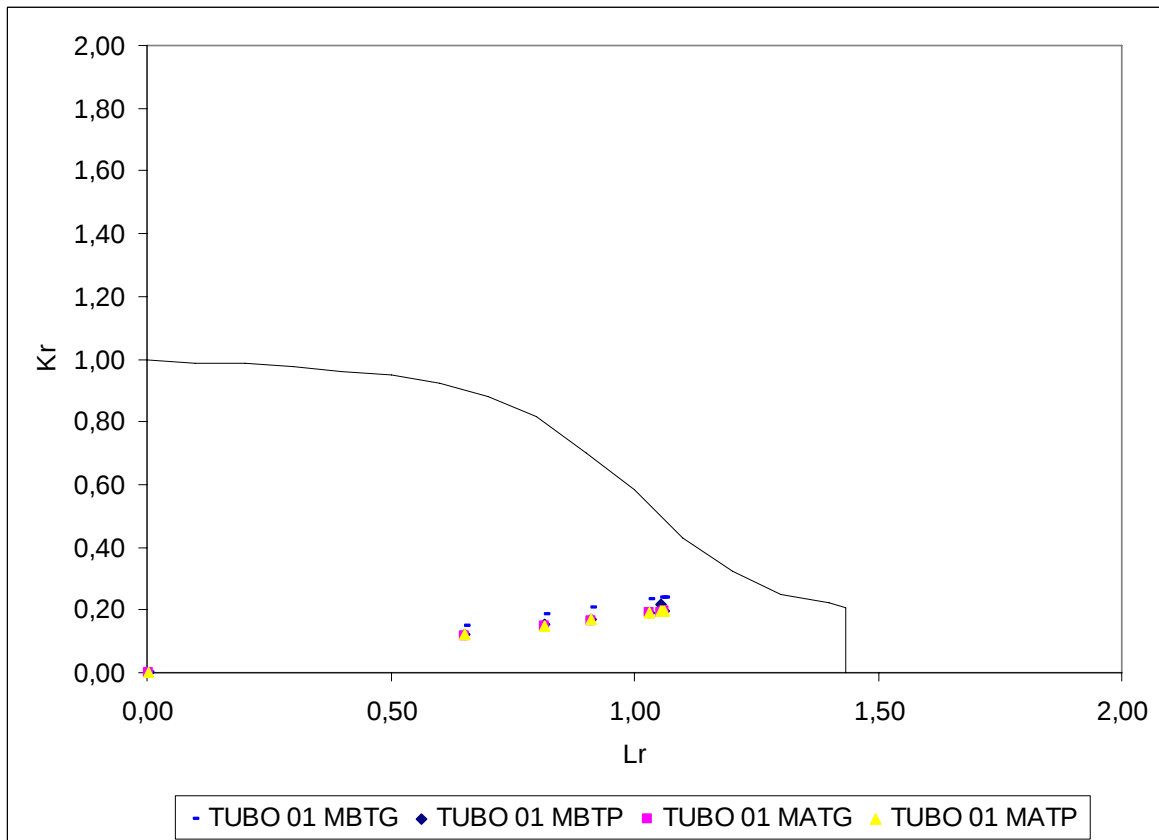


Fig. 5.27 – Diagrama FAD para as descontinuidades analisadas no corpo de prova Tubo 02.

V.3.1 Resultados do ensaio de emissão acústica

Nas figuras de 5.28 a 5.33 serão apresentados de forma gráfica os valores dos parâmetros de emissão acústica. Uma vez mais a metodologia “primeiro sinal” descrita no item V.1.1 Estes resultados foram analisados considerando a propagação de 0,52 mm na descontinuidade identificada como MBTP. A análise dos dados da descontinuidade MBTP deve ser feita com cuidado, pois os sensores de emissão acústica estavam posicionados para melhor captar os sinais provenientes das descontinuidades MBTG e MBTP.

Na figura 5.28 pode-se notar que o valor máximo detectado para o parâmetro tempo de subida foi de aproximadamente 1400 μs , superior aos valores obtidos nos corpos de prova Tubo 03 e Tubo 02. Os maiores valores de tempo de subida foram detectados no corpo de prova Tubo 01 que apresenta os menores valores de K_I . A análise dos dados coletados nos três corpos de prova apresentou uma relação inversamente proporcional entre o tempo de subida do sinal de emissão acústica e o valor de K_I .

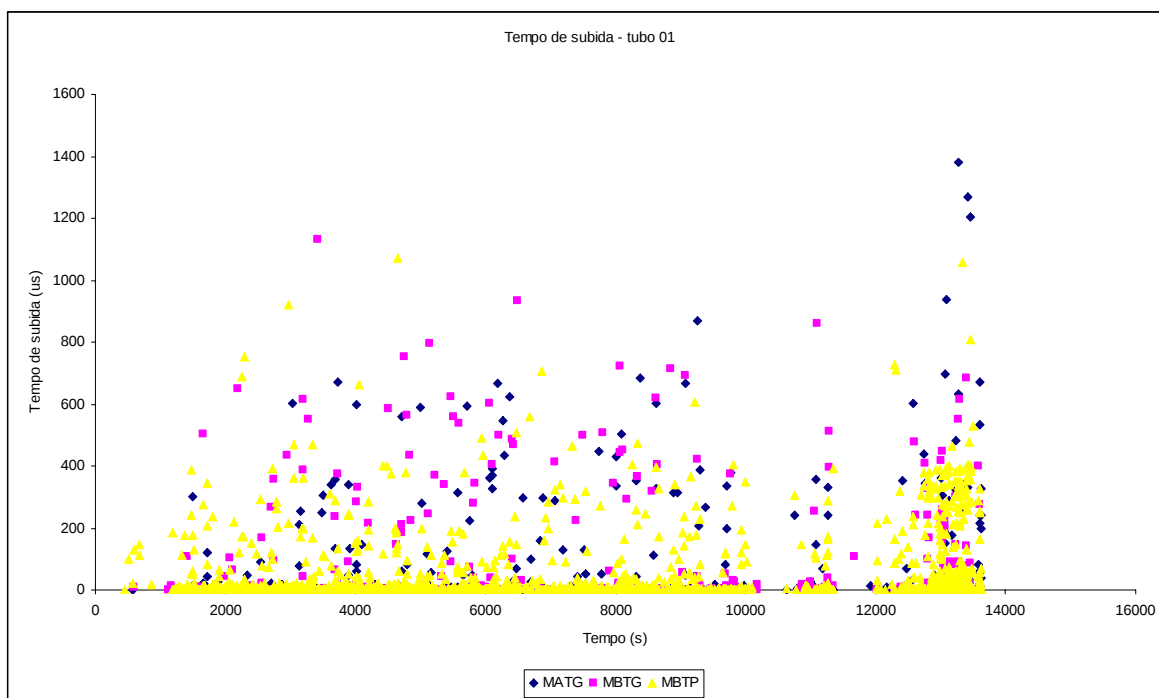


Fig. 5.28 – Gráfico tempo de ensaio *versus* tempo de subida, para o corpo de prova Tubo 01.

Nota-se, no gráfico da figura 5.29, o incremento das contagens dos sinais de emissão acústica com o incremento do tempo de ensaio e, conseqüentemente, da carga aplicada para a descontinuidade MBTP que apresentou propagação durante o teste hidrostático. Os valores de contagem apresentaram a mesma ordem de grandeza na descontinuidade MBTP, que apresentou propagação, quando comparado com os dados do corpo de prova Tubo 03.

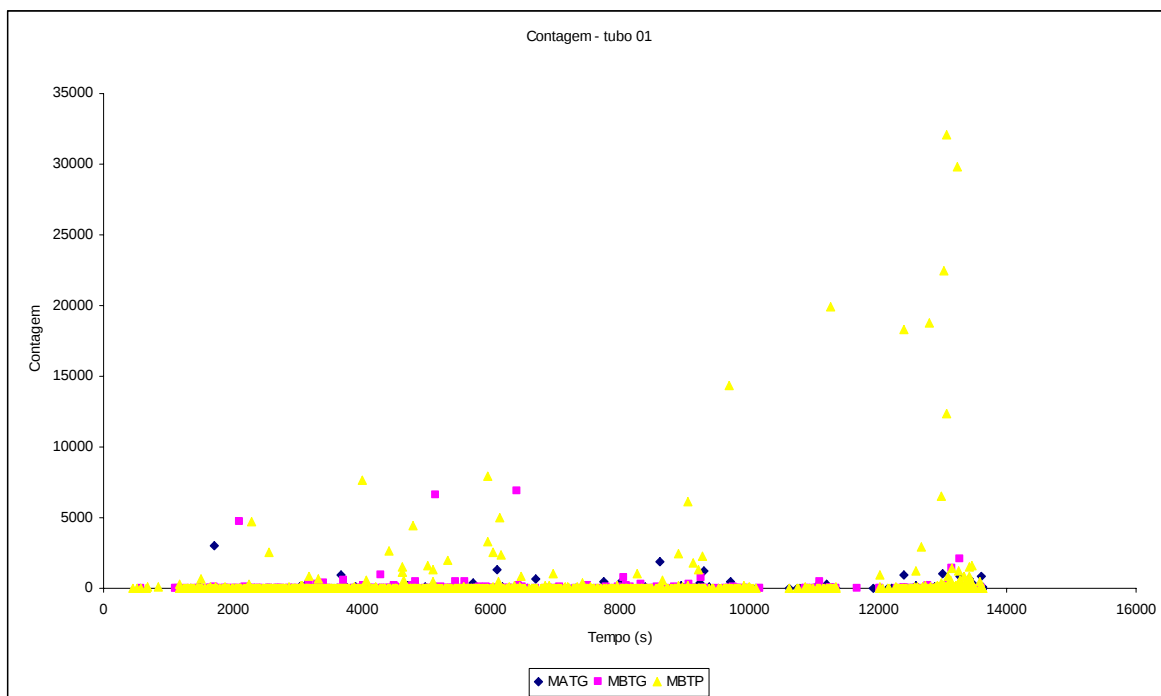


Fig. 5.29 – Gráfico tempo de ensaio *versus* contagem, para o corpo de prova Tubo 01.

O mesmo comportamento de incremento de contagens também pode ser associado ao parâmetro energia que apresentou valores de mesma ordem de grandeza quando comparado com o corpo de prova Tubo 03, para a descontinuidade MBTP que apresentou propagação de 0,52 mm. Estes resultados são apresentados na figura 5.30.

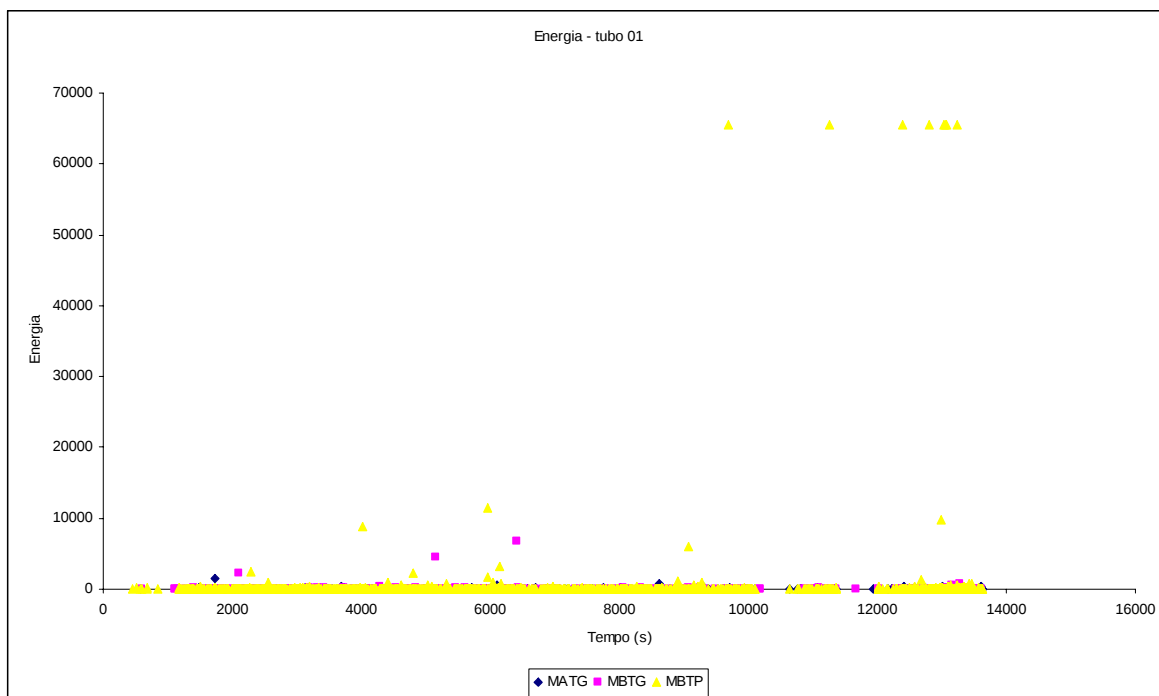


Fig. 5.30 – Gráfico tempo de ensaio *versus* energia, para o corpo de prova Tubo 01.

No gráfico da figura 5.31 pode-se notar a tendência de crescimento dos valores de duração do sinal de emissão acústica em função do tempo de ensaio (carga aplicada) para a descontinuidade que apresentou propagação, MBTP. Os valores máximos de duração detectados para a descontinuidade MBTP foram duas vezes maior que os detectados no corpo de prova Tubo 03, embora os valores de K_I e a medição da propagação da profundidade tenham sido maiores no corpo de prova Tubo 03.

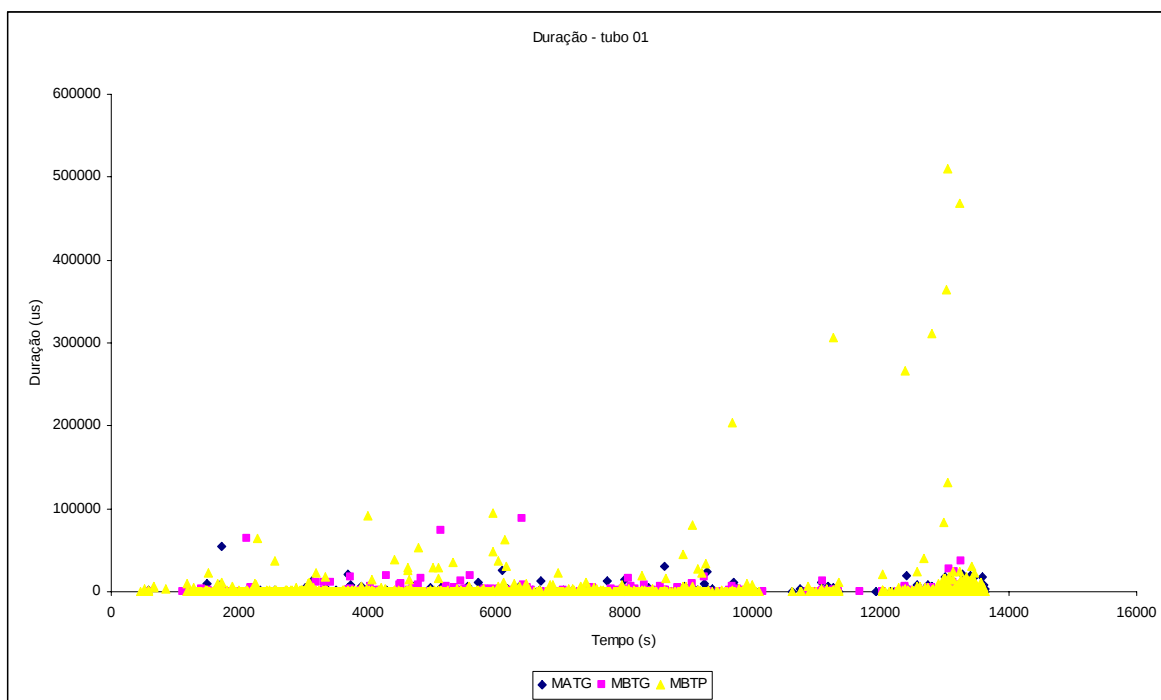


Fig. 5.31 – Gráfico tempo de ensaio *versus* duração, para o corpo de prova Tubo 01.

A amplitude do sinal de emissão acústica apresentou os maiores valores para os dados da descontinuidade MBTP. Esses valores foram semelhantes, em intensidade, aos detectados no corpo de prova Tubo 03. Para as descontinuidades que não apresentaram propagação de sua profundidade os valores foram semelhantes aos detectados no corpo de prova Tubo 02, conforme pode ser visto no gráfico da figura 5.32. Estes resultados demonstram existir uma provável relação entre amplitude e propagação de descontinuidades.

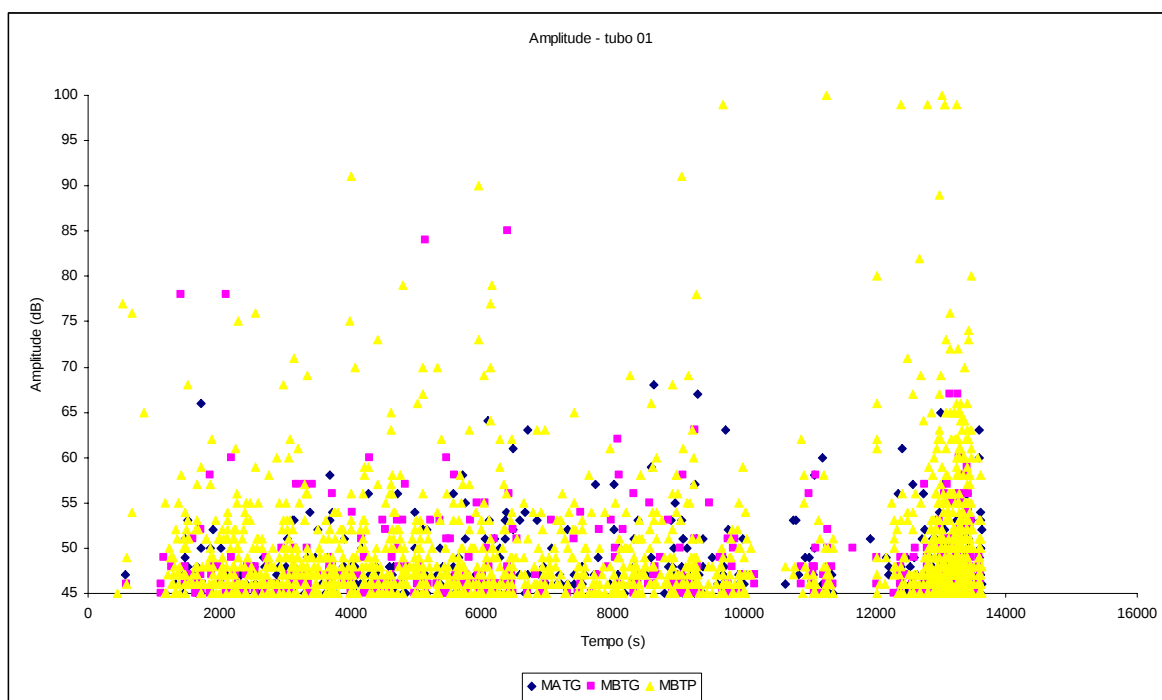


Fig. 5.32 – Gráfico tempo de ensaio *versus* amplitude, para o corpo de prova Tubo 01.

Na figura 5.33 apresentam-se os valores do parâmetro frequência média durante o ensaio hidrostático do corpo de prova Tubo 01. Neste gráfico não é possível estabelecer relação entre frequência média e a propagação da descontinuidade, repetindo o mesmo resultado encontrado nos corpos de prova Tubo 03 e Tubo 02.

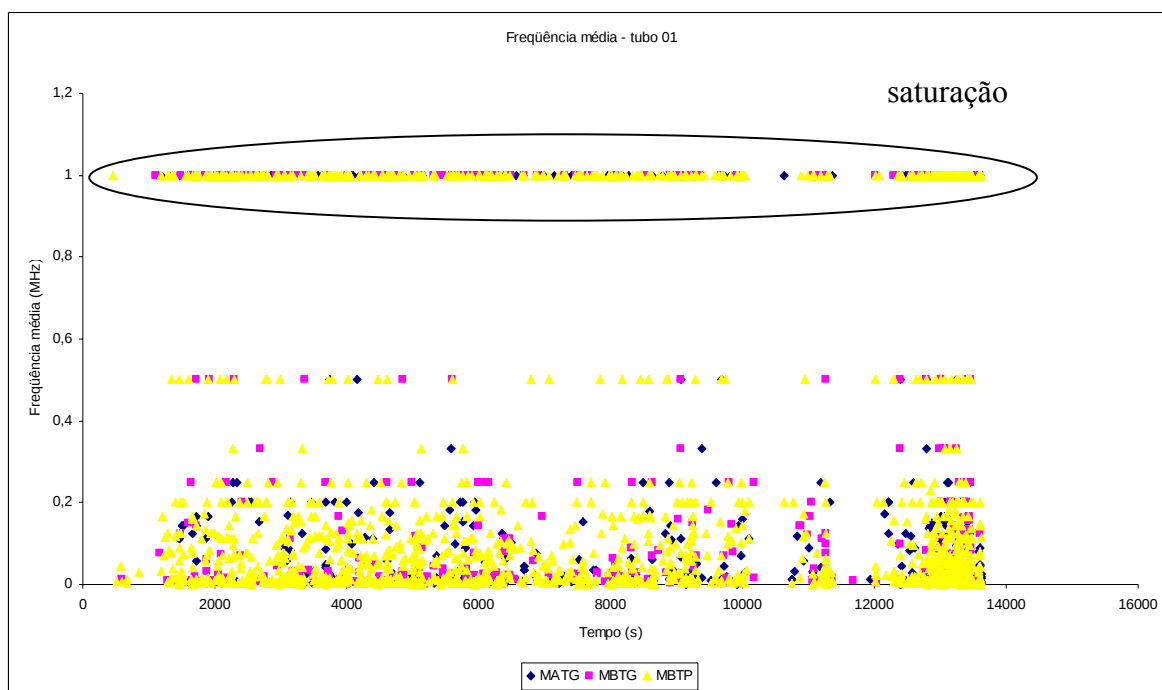


Fig. 5.33 – Gráfico tempo de ensaio *versus* frequência média, para o corpo de prova Tubo 01.

V.3.2 Análise com o critério MONPAC

Apresenta-se na tabela V.18 a análise dos dados de emissão acústica com o critério MONPAC. Os valores do critério MONPAC foram calculados interrompendo-se a análise no instante de tempo desejado. Como a propagação de descontinuidade MBTP só foi detectada ao final do teste hidrostático, os tempos utilizados para a obtenção dos valores do critério MONPAC foram escolhidos aleatoriamente. O primeiro valor foi obtido para o tempo igual a 4437 s, o valor do critério MONPAC até este instante da coleta de dados de emissão acústica foi 1,90 e 243,60 para os índices *Historic* e *Severity*, respectivamente, na descontinuidade MATG (sensor 1). O segundo valor foi obtido para o tempo igual a 5685 s,

os valores do critério MONPAC até este instante da coleta de dados foram 2,89 e 853,40 para os índices *Historic* e *Severity*, respectivamente, na descontinuidade MBTG (sensor 3). Esta metodologia de calcular os índices *Historic* e *Severity* em tempos crescentes do teste hidrostático do corpo de prova Tubo 01 foi utilizada em todos os sensores até o término do ensaio. Os sensores 1, 3 e 4 foram posicionados próximos as descontinuidades MATG e MBTG e entre as descontinuidades MATP e MBTP, respectivamente. Embora nenhuma das descontinuidades tenha apresentado propagação detectável pela técnica *ToFD*, os valores do critério MONPAC foram obtidos para permitir a análise e correlação dos dados do critério MONPAC com os valores de K_I aplicados ao corpo de prova e a propagação de 0,52 mm detectada ao final do teste hidrostático. Pode-se notar que os valores coletados no sensor 4, próximo a descontinuidade que apresentou propagação, MBTP, o parâmetro *Severity index* apresentou valores quase uma ordem de grandeza acima quando comparado com os valores coletados para descontinuidades que não apresentaram propagação. Estes valores foram, no seu valor máximo, aproximadamente a metade dos encontrados para a descontinuidade que apresentou a maior propagação, ocorrida no corpo de prova Tubo 03. Ao compararmos estes dados entre os três corpos de prova nota-se uma provável relação entre a propagação de descontinuidades e os valores obtidos para o parâmetro *Severity Index* do critério MONPAC. Esta relação pode ser estendida para o parâmetro de mecânica da fratura K_I .

Tabela V.18 – Resultados do critério MONPAC para o corpo de prova Tubo 01.

Profundidade (mm)	Pressão (bar)	Tempo (s)	MATG		MBTG		MBTP	
			<i>Historic</i>	<i>Severity</i>	<i>Historic</i>	<i>Severity</i>	<i>Historic</i>	<i>Severity</i>
1,9	1,1	1	0	0	0	0	0	0
1,9	184,8	4437	1,90	243,60	2,89	362,60	5,00	1475,90
1,9	231,8	5685	1,90	252,60	2,89	853,40	5,00	1843,00
1,9	258,2	6933	1,90	321,90	2,89	1524,70	5,00	3349,60
1,9	292,7	9151	1,90	404,60	2,89	1536,70	5,00	3896,60
1,9	301,1	9705	1,90	440,30	2,89	1545,60	5,00	10352,50
1,9	300,1	10201	1,90	443,00	2,89	1545,60	5,00	10352,50
2,42	299,0	10676	1,90	443,00	2,89	1545,60	5,00	10352,50

Os valores de *historic index* não variaram durante o teste e foram descartados da tentativa de estabelecimento de correlação. Os dados da tabela V.18 foram sincronizados com os dados da tabela V.17 e são apresentados na tabelas V.19, para as descontinuidades MATG, MBTG e MBTP. Os dados da descontinuidade MBTP (coletados no canal 4 do sistema de emissão acústica), que apresentou propagação de 0,52 mm ao final do teste hidrostático, devem ser analisados com cuidado em função do arranjo de sensores não permitir a correta identificação da origem dos sinais de emissão acústica, se oriundos da descontinuidade MBTP ou MATP.

Tabela V.19 – Valores de K_I sincronizados com os resultados do critério MONPAC para o corpo de prova Tubo 01. Tensão de membrana em MPa e K_I em MPa $\sqrt{m}$.

Tensão de membrana	MATG		MBTG		MBTP	
	K_I	<i>Severity</i>	K_I	<i>Severity</i>	K_I	<i>Severity</i>
2	0,2	0	0,2	0	0,2	0
324	27,2	243,60	33,4	362,60	26,5	1475,90
406	34,2	252,60	41,9	853,40	33,2	1843,00
452	38,1	321,90	46,7	1524,70	37,0	3349,60
513	43,2	404,60	52,9	1536,70	41,9	3896,60
527	44,4	440,30	54,4	1545,60	43,4	10352,50
526	44,2	443,00	54,3	1545,60	43,0	10352,50
524	44,1	443,00	54,1	1545,60	47,1	10352,50

Na figuras 5.34 são apresentados os resultados da tabela V.19 em formato gráfico.

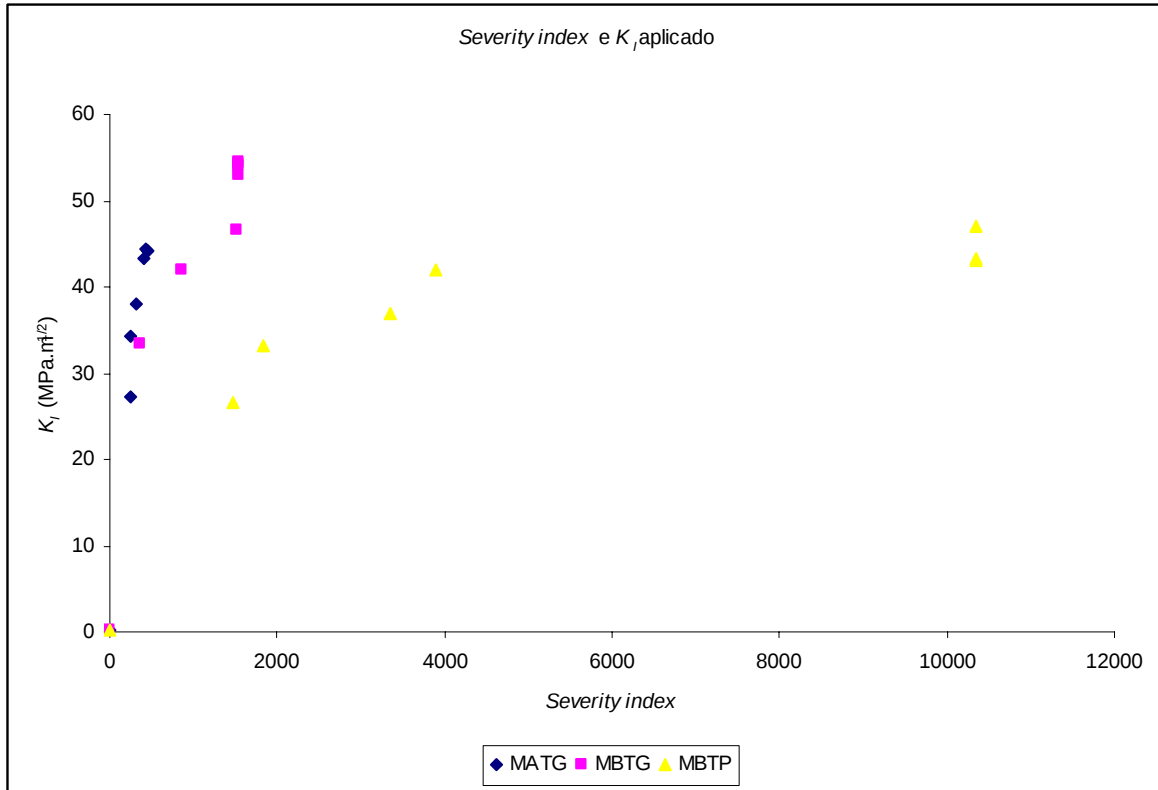


Fig. 5.34 – Gráfico *severity index* versus K_I , para o corpo de prova Tubo 01.

Na figura 5.35 apresenta-se o gráfico do critério MONPAC para os dados da tabela V.18. Pode-se notar que a descontinuidade MATG foi classificada inicialmente como “C” e ao final do teste foi classificada como “D”, enquanto as descontinuidades MBTG e MBTP foram classificadas como “E” desde o início do teste. A descontinuidade MBTP apresentou propagação ao final do teste hidrostático e desde o início do teste apresentou valores superiores ao máximo previsto no gráfico do critério MONPAC para o parâmetro *Severity index*. Estas classificações em ensaios de campo indicam a recomendação para execução de ensaios não destrutivos complementares, e a interrupção de operação e realização de ensaios não destrutivos para avaliação da integridade do equipamento em teste, respectivamente para as classificações “D” e “E”.

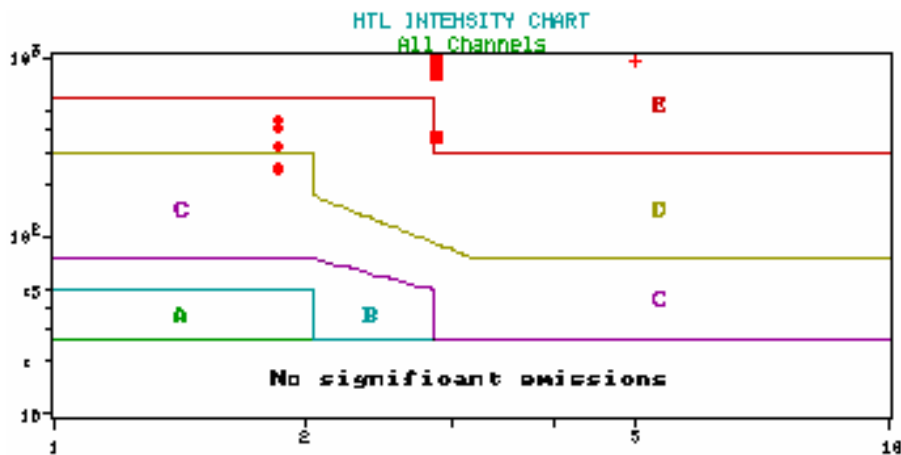


Fig. 5.35 – Gráfico do critério MONPAC para as descontinuidades analisadas no corpo de prova Tubo 01. Quadrado, descontinuidade MBTG, e; Círculo, descontinuidade MATG, Cruz, descontinuidade MBTP.

V.3.3 Análise com localização exata de fontes de emissão acústica.

Não foram localizados sinais de emissão acústica na região da descontinuidade que apresentou propagação de profundidade da trinca ao final do teste hidrostático. Em função deste resultado não foi realizada a análise com localização exata de fontes de emissão acústica.

V.4 Ajuste de equações

V.4.1 Critério MONPAC

Os resultados obtidos com o critério MONPAC nos corpos de prova Tubo 01, Tubo 02 e Tubo 03 encorajaram a tentativa de estabelecimento de equações para exprimir o valor de K_I em função do valor do parâmetro de emissão acústica *Severity index*. Na figura 5.36 são apresentados de forma gráfica os dados dos três corpos de prova, correlacionando *Severity index* e K_I . Para facilitar a visualização no gráfico não foram feitas distinções entre as descontinuidades nos corpos de prova. Pode-se notar uma maior concentração de dados, no gráfico da figura 5.36, para valores de K_I entre 10 e 60 MPa√m. Esta maior concentração de dados influencia o ajuste de equações para a região de maior concentração de dados.

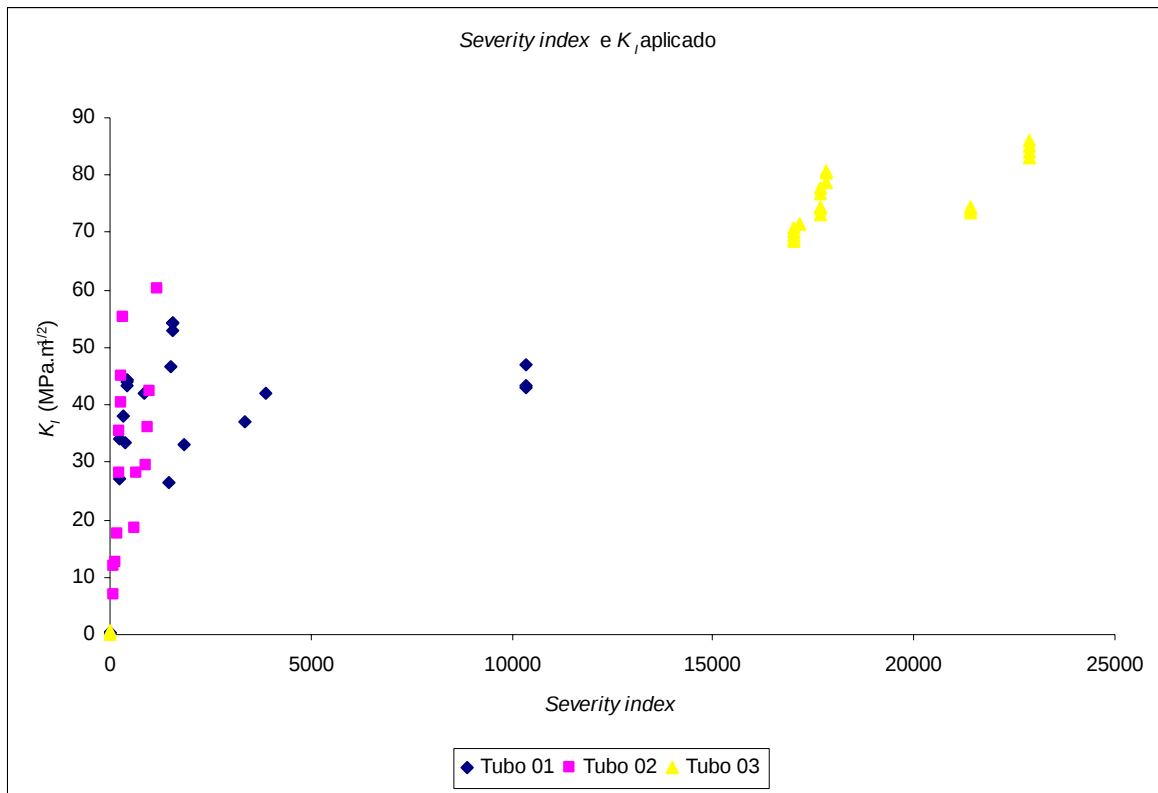


Fig. 5.36 – Gráfico *Severity index versus K_I* , para os corpos de prova Tubo 01, Tubo 02 e Tubo 03.

Para contornar a situação de concentração de dados foi realizada uma seleção de dados para o ajuste de equações. Para a realização desta seleção levantou-se um histograma dos valores de K_I . Este histograma foi construído com a finalidade de separar os valores de K_I em 10 blocos iguais. A faixa de cada bloco foi estabelecida calculando a décima parte da diferença entre o valor mínimo (0 MPa√m) e o valor máximo (86,0 MPa√m) dos valores calculados de K_I . A quantidade de dados em cada bloco, considerando o limite inferior inclusive e o limite superior exclusive é descrita na tabela V.20 e apresentado graficamente na figura 5.37. Pode-se notar que a menor quantidade encontrada nos blocos do histograma foi de dois dados, três blocos de dados com dois dados foram identificados. Em função disto foi realizada uma seleção de dados para contemplar dois dados não repetidos em cada bloco de K_I . O resultado desta seleção está descrito graficamente na figura 5.38, sem menção ao corpo de prova que originou o dado.

Tabela V.20 – Histograma dos valores de K_I para os corpos de prova Tubo 01, Tubo 02 e Tubo 03. K_I em MPa $\sqrt{m}$.

Bloco de K_I	Quantidade de dados
0 a 8,60	6
8,60 a 17,20	2
17,20 a 25,80	2
25,80 a 34,40	8
34,40 a 43,00	8
43,00 a 51,60	9
51,60 a 60,20	5
60,20 a 68,80	2
68,80 a 77,40	13
77,40 a 86,00	7

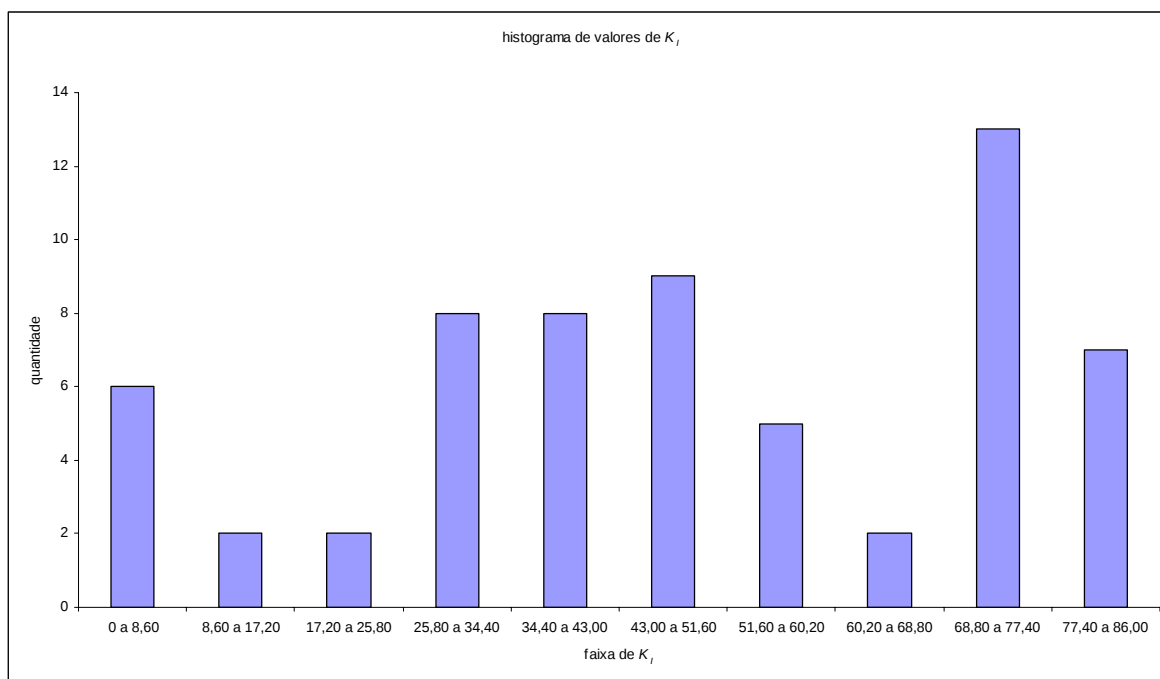


Fig. 5.37 – Histograma dos valores de K_I calculados para os corpos de prova Tubo 01, Tubo 02 e Tubo 03. K_I em MPa $\sqrt{m}$.

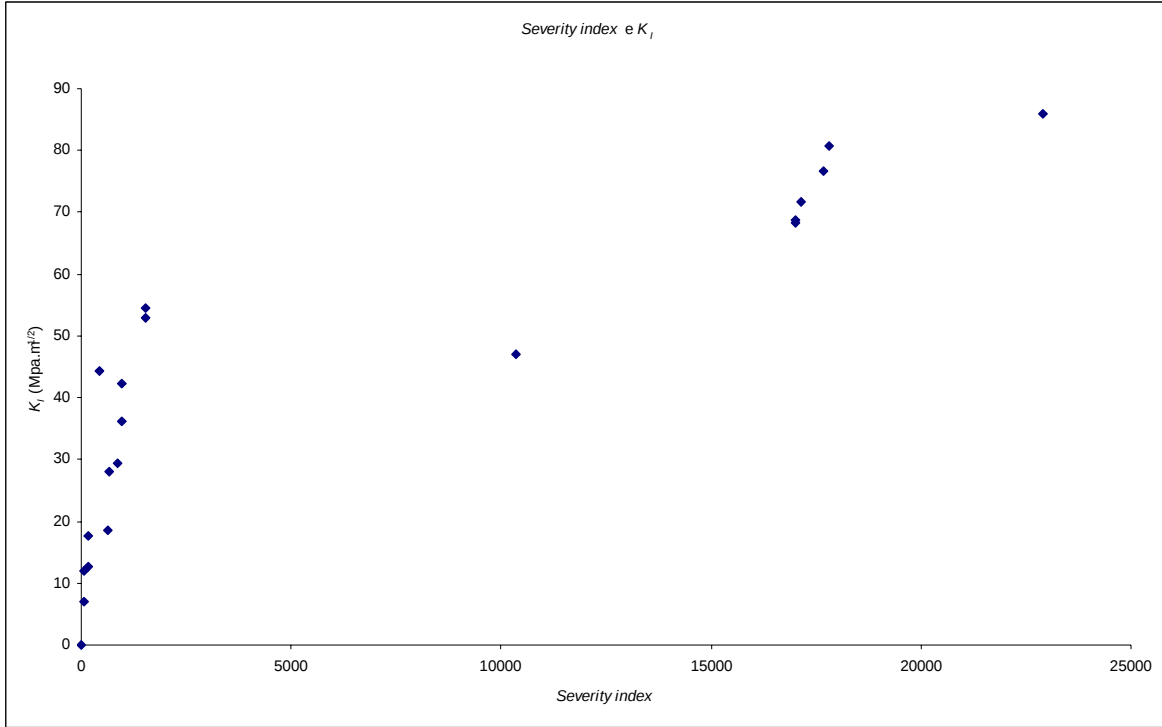


Fig. 5.38 – Dados selecionados para o ajuste de equações considerando o histograma da figura 5.37 e utilizando dois dados não repetidos em cada bloco de K_I definido na tabela V.20.

O coeficiente de correlação linear entre o parâmetro de emissão acústica *Severity index* e o parâmetro de mecânica da fratura K_I atingiu o valor de 0,75. Foram ajustadas equações para a estimativa dos valores de K_I em função do valor de *Severity index*.

O menor valor médio de erro para os dados utilizados no ajuste de curvas foi obtido com a equação V.1.

$$K_{I(EA)} = 2,80 \times 10^{-3} \cdot Severity + 25,01 \quad (V.1)$$

A constante 25,01 MPa√m da equação V.1 introduz um erro significativo para o valor de $K_{I(EA)}$, pois, a ausência de sinais de emissão acústica em um teste acarretaria em um valor de *Severity index* igual a 0 (zero) e, conseqüentemente, um valor de $K_{I(EA)}$ igual a 25,01 MPa√m. Este inconveniente pode ser contornado com a análise da figura 5.39. Na

figura 5.39 apresentam-se os dados utilizados, a equação ajustada (equação V.1) e as curvas limite para o intervalo de confiança para 95%. Pode-se notar que nem todos os dados utilizados foram posicionados dentro do intervalo de confiança de 95%. Os maiores valores de *Severity index* (acima de 15000 no gráfico da figura 5.39) estão compreendidos dentro do intervalo de confiança de 95% e considerando o teor conservativo que a inspeção de equipamentos deve utilizar para a tomada de decisão sobre a continuidade operacional de equipamentos submetidos a pressão interna, a constante de 25,01 MPa√m pode ser utilizada. Esforços devem ser feitos para aumentar a quantidade de dados para propiciar um melhor ajuste para esta equação com a conseqüente diminuição da constante. O valor desta constante em uma situação ideal deve ser igual a 0 (zero).

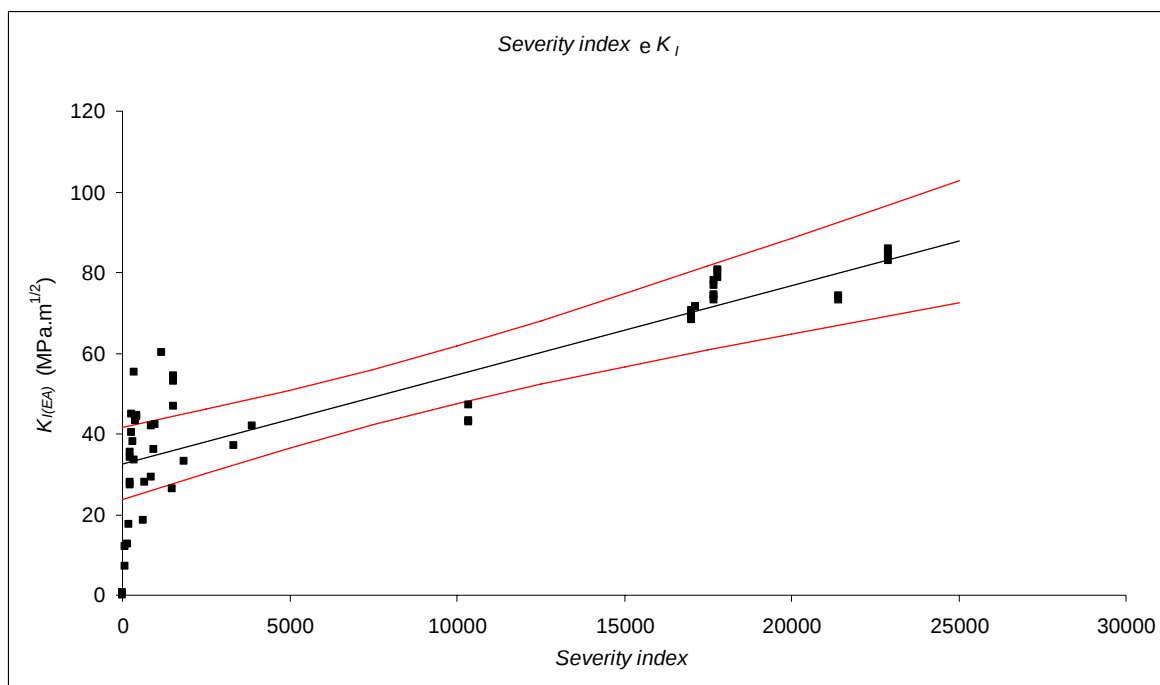


Fig. 5.39 – Gráfico *Severity index versus KI*, para os dados de todos os corpos de prova.

V.4.2 Sinais de emissão acústica

Os parâmetros de emissão acústica coletados neste estudo (tempo de subida, contagem, energia, duração e amplitude) e os parâmetros derivados destes (frequência média e contagens para o pico) indicaram ordens de grandeza diferentes para os parâmetros

contagem, energia, duração e amplitude quando associados com a propagação ou não de descontinuidades. O parâmetro tempo de subida apresenta um comportamento oposto, ou seja, apresenta os maiores valores para os menores valores de K_I aplicado nas descontinuidades.

As figuras de 5.40 a 5.45 apresentam o valor acumulado (somatório) dos parâmetros de emissão acústica durante os testes hidrostáticos para as pressões internas em função dos valores de K_I calculados e apresentados nos itens anteriores.

Antes de apresentar estes gráficos, será feita uma breve descrição da explanação das possíveis relações entre parâmetros e os fenômenos de fratura de materiais proposta por Miller [Miller, 1987]. Esta análise está descrita antes da apresentação dos gráficos que apresentam todos os dados coletados em cada corpo de prova em função do parâmetro de emissão acústica analisado.

Na figura 5.40 são apresentados os resultados do somatório dos tempos de subida dos sinais de emissão acústica detectados e filtrados com a técnica do primeiro sinal (descrita no item “5.1.1 Resultados do ensaio de emissão acústica”) em cada descontinuidade e o respectivo valor de K_I . Sinais de emissão acústica decorrentes de fratura de materiais apresentam pequenos tempos de subida. Este pequeno tempo de subida está associado ao movimento que ocorre em nível microscópico no material quando duas novas superfícies de fratura estão sendo formadas. A aceleração imposta as partículas do material na formação destas superfícies reflete-se no sinal de emissão acústica atingindo o máximo valor de amplitude logo após a geração do sinal. Como os sinais de máxima amplitude apresentam altas frequências, após a propagação em alguns metros dentro dos corpos de prova estes sinais são atenuados e os tempos de subida são deslocados para valores superiores a poucos microsegundos. O coeficiente de correlação linear encontrado entre o somatório dos tempos de subida e o valor de K_I foi de 0,59.

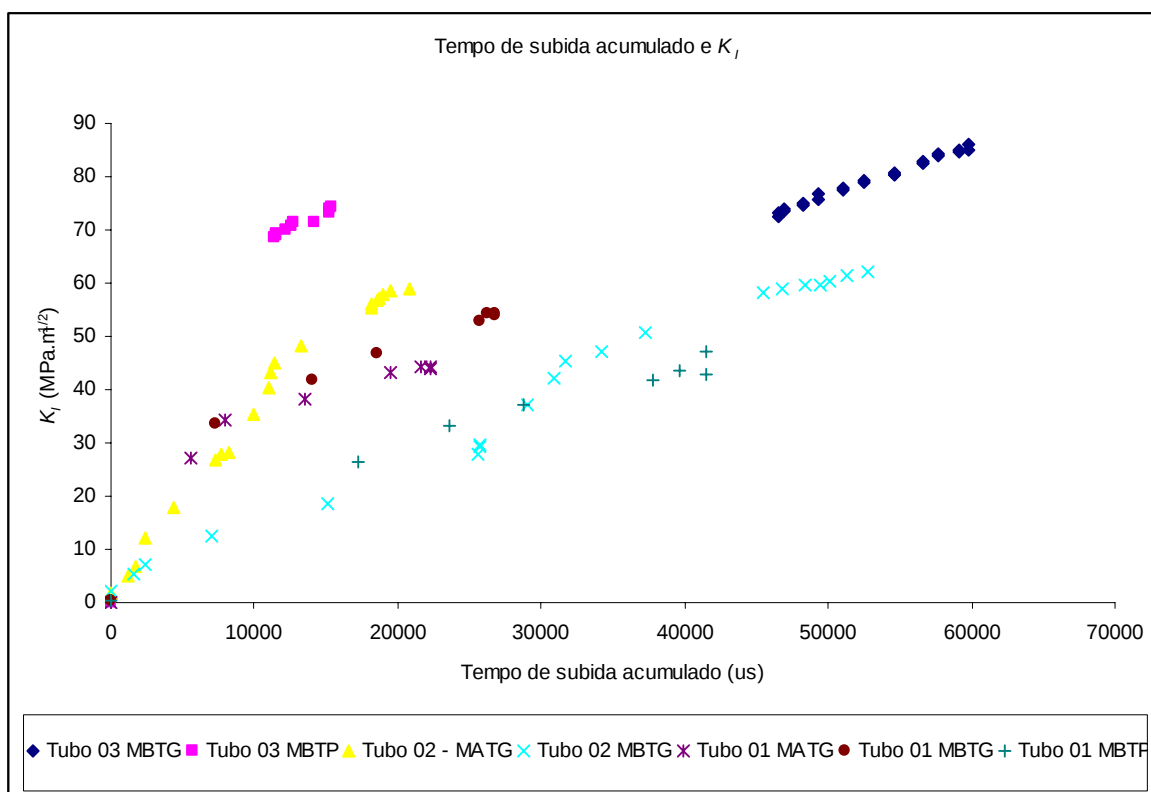


Fig. 5.40 – Gráfico tempo de subida (acumulado) *versus* K_I .

A contagem de um sinal de emissão acústica está relacionada com a frequência de oscilação da onda mecânica gerada durante o processo de emissão acústica e com a intensidade do sinal. Sinais com grande número de contagens estão relacionados com altas intensidades de emissão acústica em função do sinal ter um extenso tempo de duração antes de sua completa atenuação. Diversos profissionais da área de inspeção de equipamentos utilizam o valor de 10000 contagens como limiar para a existência de fenômenos de propagação de descontinuidades. Em função das contagens serem detectadas por um sensor a utilização de sensores que não englobem a faixa de frequências esperada para o mecanismo de falha/degradação em estudo, deve-se utilizar sensores, sempre que possível, de banda larga de frequência para permitir a detecção dos sinais. A energia liberada sob a forma de onda mecânica quando duas novas superfícies de fratura são formadas pode estar relacionada com a intensidade do sinal e sua respectiva frequência de vibração que são detectadas pelo sensor de emissão acústica e expressas pelo parâmetro contagem. Miller [Miller, 1987] cita que o número total de contagens é uma boa indicação da energia do sinal de emissão acústica e que a taxa de contagens é um indicativo da extensão da degradação estrutural. Cuidados devem ser tomados na execução de ensaios com o objetivo de desenvolver correlações, como este estudo, pois, o parâmetro contagens é fortemente influenciado pelo ajuste do equipamento de ensaio e as correlações estabelecidas só terão validade quando os mesmos ajustes forem utilizados.

Para aplicações da tecnologia de emissão acústica em engenharia civil, Miller [Miller, 1987] apresenta a expressão V.2.

$$N = \frac{Da}{\frac{16\sigma_{ys}^4}{K^4}} \quad (V.2)$$

Onde:

N é o número de contagens;

a é o comprimento da descontinuidade do tipo trinca;

D é uma constante de proporcionalidade entre o volume plastificado e a contagem de emissão acústica;

K é a intensidade da tensão da trinca; e,
 σ_{ys} é a tensão limite de escoamento.

Como já explicado anteriormente, busca-se neste estudo o estabelecimento de correlações que permitam estimar K_I em função de um ou mais parâmetros de emissão acústica para a aplicação em vasos de pressão metálicos submetidos a pressão interna. Na figura 5.41 são apresentados os resultados do somatório de contagens e o respectivo valor de K_I . O coeficiente de correlação linear encontrado entre o somatório de contagens e K_I foi 0,49.

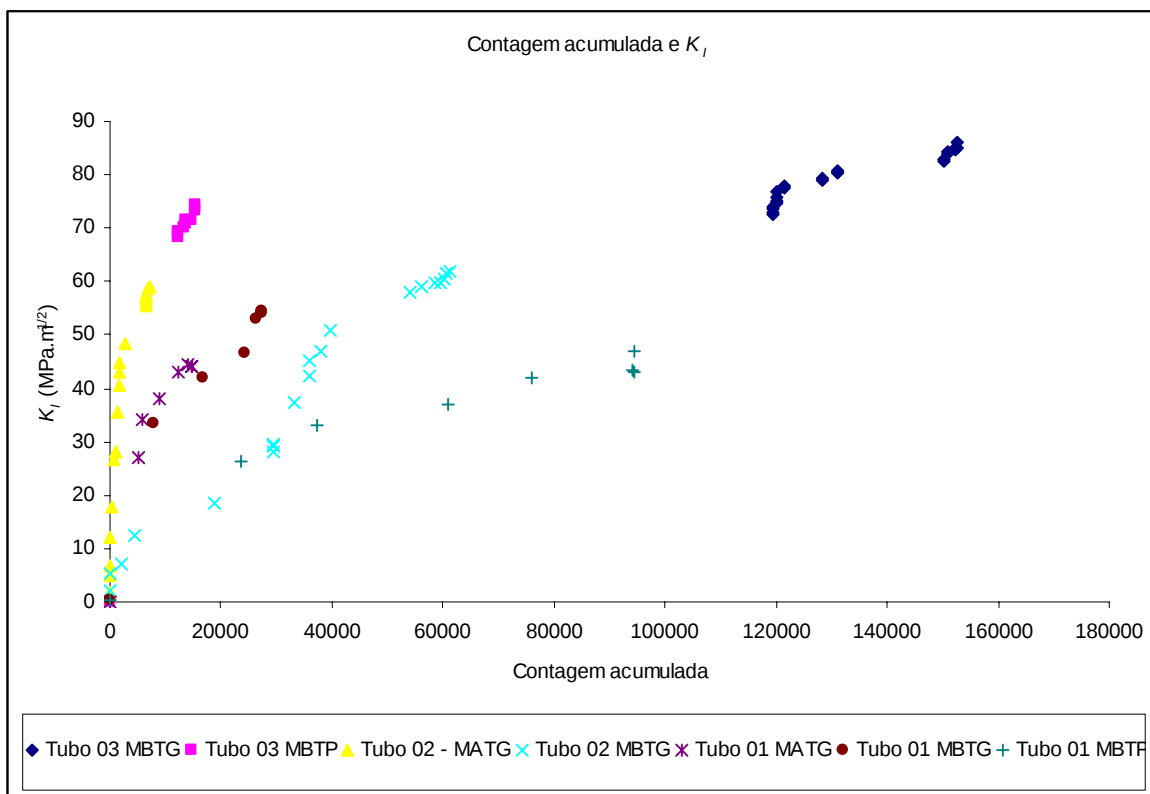


Fig. 5.41 – Gráfico contagem (acumulado) *versus* K_I .

O parâmetro energia é definido como a área da envoltória do sinal de emissão acústica. Por apresentar uma conjunção de todos os parâmetros é utilizado por praticamente todos os profissionais como controle para os ensaios de emissão acústica. Camerini [Camerini, 1990] descreveu, em sua dissertação de mestrado, procedimentos utilizados por empresas nacionais e estrangeiras (BRASITEST e CISE) utilizando o critério de energia para classificação de sinais de emissão acústica. As explicações anteriores sobre os parâmetros tempo de subida e energia e as subseqüentes sobre os parâmetros duração e amplitude formam o conceito da aplicabilidade do parâmetro energia de emissão acústica para a classificação dos sinais de emissão acústica. A correlação entre energia do sinal de emissão acústica e parâmetros de mecânica da fratura é influenciada, segundo Miller [Miller, 1987], pelos fatores: (1) a incerteza do modo de operação dos sensores; e (2) a faixa de resposta dos transdutores (banda de frequência). O mesmo conceito de validade aplicado ao parâmetro contagem aplica-se ao parâmetro energia do sinal de emissão acústica, ou seja, as correlações só têm validade quando os mesmos ajustes da instrumentação de emissão acústica são utilizados. Na figura 5.42 são apresentados os resultados do somatório de energia por descontinuidade e o respectivo valor de K_I . O coeficiente de correlação linear encontrado entre o somatório de energia e K_I foi 0,45.

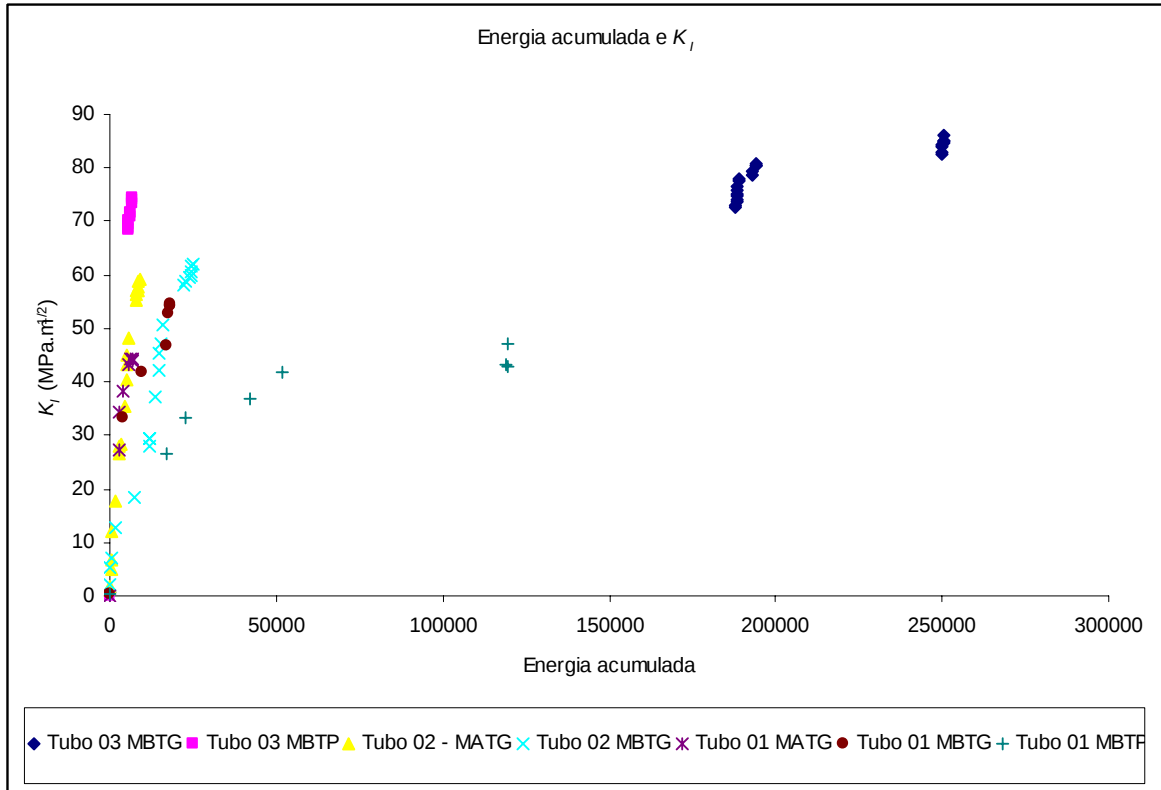


Fig. 5.42 – Gráfico energia (acumulado) *versus* K_I .

O parâmetro duração do sinal de emissão acústica pode ser relacionado com a intensidade do sinal. A energia consumida pelo material para formar duas novas superfícies de fratura, liberada sob a forma de onda mecânica no instante da formação das superfícies, propicia a propagação de uma onda mecânica tão extensa quanto a intensidade do sinal. Sendo assim, sinais de maior duração podem representar um maior consumo de energia para a formação de superfícies de fratura. Na figura 5.43 são apresentados os resultados do somatório de duração e os respectivos valores de K_I . O coeficiente de correlação linear encontrado entre o somatório de duração e K_I foi de 0,52.

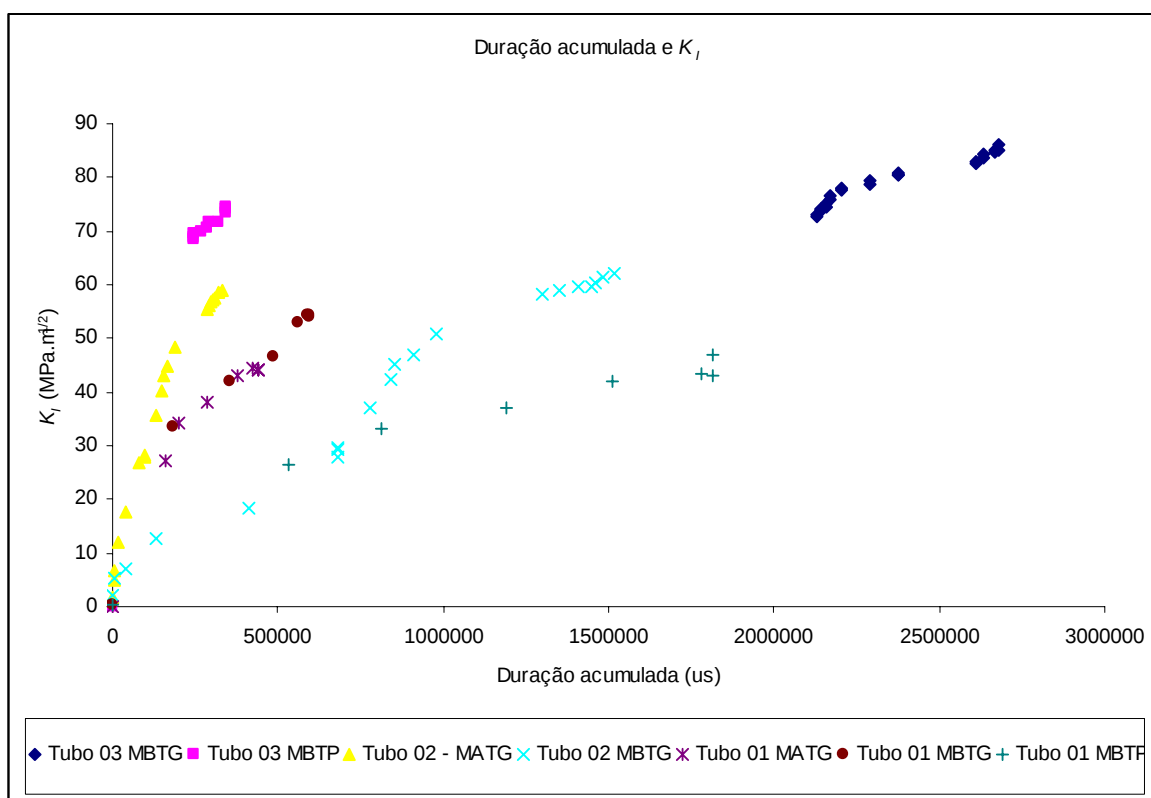


Fig. 5.43 – Gráfico duração (acumulado) *versus* K_I .

A amplitude do sinal de emissão acústica representa a máxima voltagem obtida durante a detecção do sinal. Este pico de voltagem está associada a máxima pressão imposta pela onda mecânica ao elemento sensor durante o processo de detecção. A pressão imposta ao sensor comprime o cristal piezo-elétrico do sensor que transforma esta deflexão mecânica em sinal elétrico. Considerando a onda mecânica proporcional a energia consumida para formação de novas superfícies de fratura pode-se supor a existência de uma relação entre amplitude do sinal e o processo de propagação das descontinuidades, ou seja, a formação de novas superfícies decorrente do processo de fratura do material em estudo. Valores superiores a 90 dB são utilizados na prática industrial do ensaio de emissão acústica como indicadores de processos de trincamento. Esta faixa de valores de amplitude corrobora o explicitado por Miller [Miller, 1987] sobre a possibilidade da utilização da distribuição de amplitudes para indicar o tipo de degradação. Na figura 5.44 são apresentados os resultados do somatório da amplitude dos sinais de emissão acústica detectados em cada descontinuidade e os respectivos valores de K_I . O coeficiente de correlação linear encontrado entre o somatório de amplitude do sinal de emissão acústica e K_I foi de 0,34.

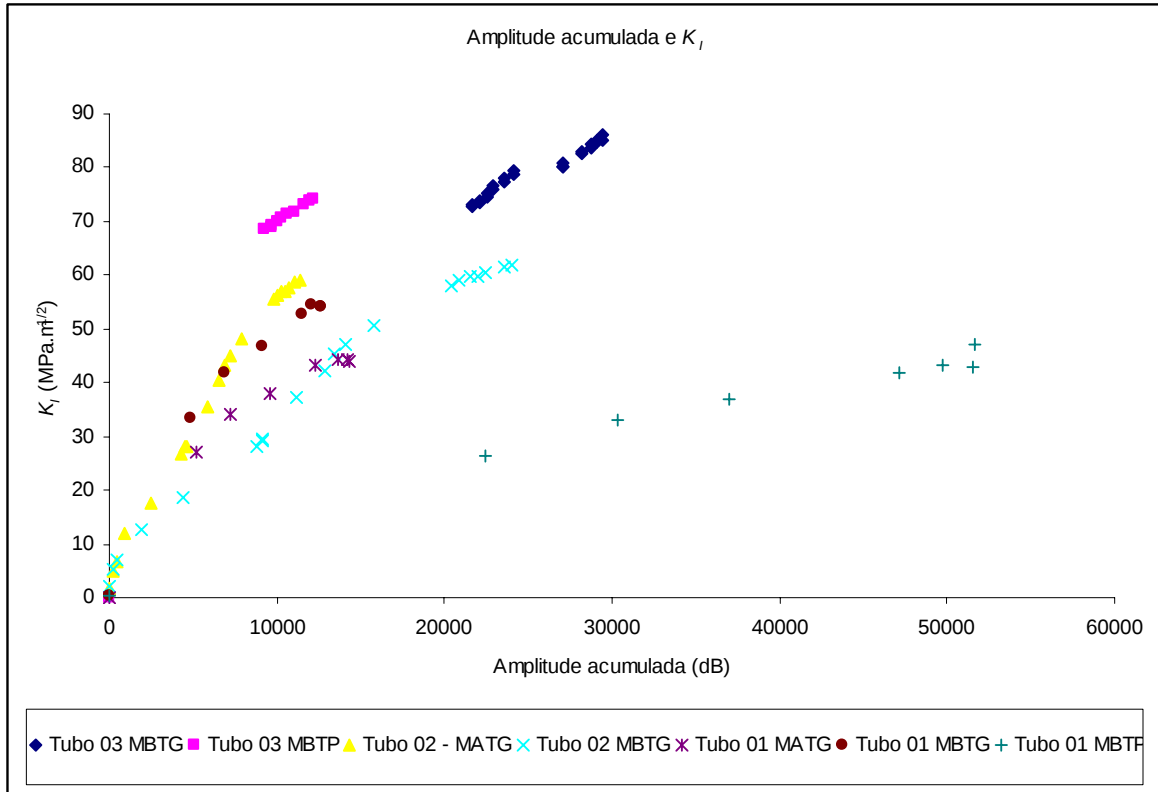


Fig. 5.44 – Gráfico amplitude (acumulado) *versus* K_I .

Os sinais de emissão acústica são captados por sensores instalados na superfície dos corpos de prova. O sinal detectado é influenciado pelo material em teste, durante a geração e propagação [Miller, 1987]. A transformação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, expresso pelo parâmetro frequência média, é calculada pela divisão entre as contagens de emissão acústica e a duração do sinal. Como dito nas páginas anteriores, a existência de uma relação entre a presença ou propagação de descontinuidades e os parâmetros contagens e duração poderia também ser expresso pelo parâmetro frequência média, pois sinais não oriundos de descontinuidades deveriam ser diferentes de sinais oriundos de descontinuidades. Análises mais robustas envolvendo a frequência do sinal de emissão acústica podem ser realizadas com a coleta da forma de onda do sinal de emissão acústica. Neste estudo foi realizada a coleta da forma de onda em dos três corpos de prova utilizados. Em função dos resultados obtidos com as correlações utilizando o critério MONPAC (apresentado no item V.4.1) e com os parâmetros de emissão acústica (próximas páginas) não investiu-se tempo na análise das formas de onda de emissão

acústica. Esta análise, quando realizada, poderia utilizar como parâmetros para correlação os parâmetros: espectro de potência, fase do sinal e potências parciais. Convém ressaltar que mesmo com o avanço da capacidade de armazenamento nos atuais computadores que gerenciam a aquisição de dados em ensaios de emissão acústica, os tamanhos de arquivos são geralmente multiplicados por aproximadamente 2000 quando formas de onda são coletados. Passa-se de arquivos de tamanho 300 kByte para 600 MByte. Para a análise de formas de onda, necessita-se de grande quantidade de processamento e transferência de dados. Industrialmente ainda não se utiliza esta forma de trabalho na condução de ensaios de emissão acústica. Na figura 5.45 são apresentados os resultados do somatório dos valores de frequência média e os respectivos valores de K_I para cada descontinuidade inserida nos corpos de prova. O coeficiente de correlação linear encontrado entre o somatório dos valores de frequência média e K_I foi de 0,36.

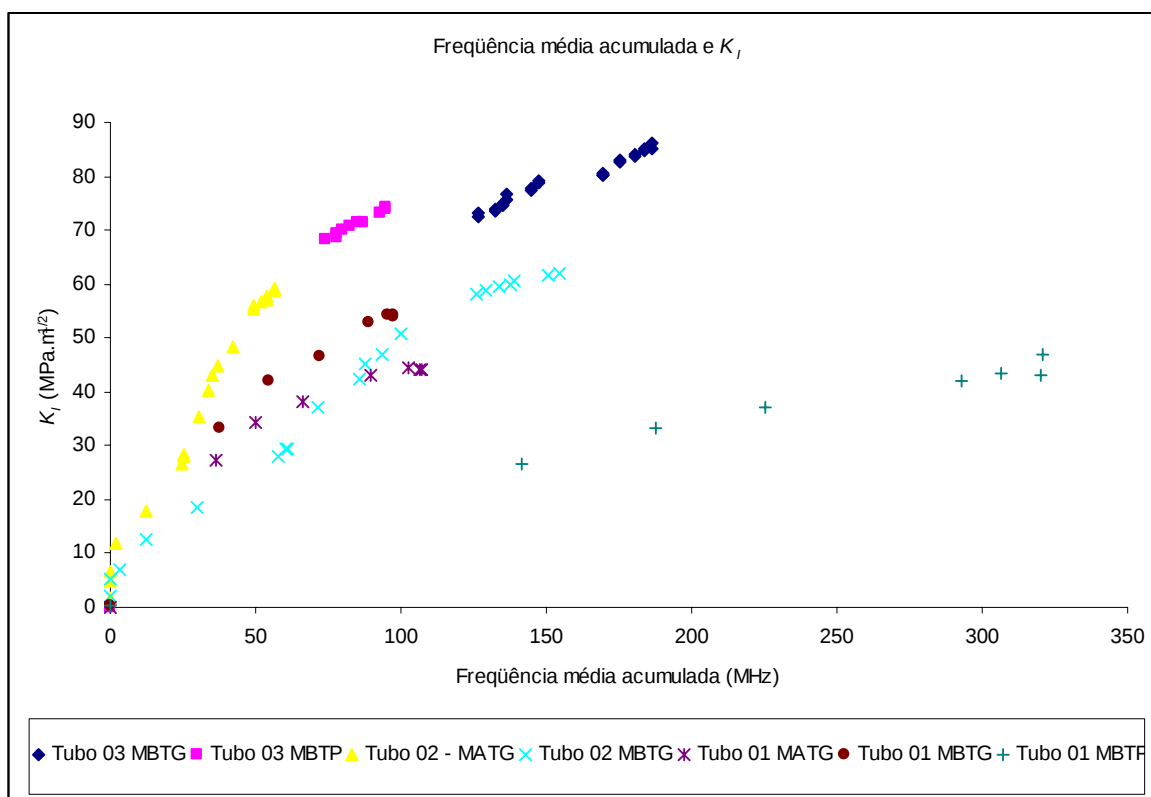


Fig. 5.45 – Gráfico frequência média (acumulado) *versus* K_I .

Ao analisarmos os resultados dos cálculos dos coeficientes de correlação linear entre o somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica (tempo de subida, contagens, energia, duração, amplitude e frequência média) e os valores de K_I pode-se concluir que não existe uma relação linear entre um parâmetro específico de emissão acústica e K_I , pois os valores do coeficiente de correlação foram inferiores a 0,90, valor aceito como mínimo para o estabelecimento de uma correlação linear [Costa Neto, 1977]. O maior valor obtido foi 0,59 para a correlação entre o somatório do tempo de subida e K_I . A análise visual dos gráficos das figuras de 5.40 a 5.45 permite intuir uma tendência entre o acréscimo do somatório dos valores dos parâmetros de emissão acústica e os valores de K_I . Para os parâmetros tempo de subida, contagem, energia e duração, os maiores valores de somatório foram encontrados para a descontinuidade de maior criticidade e que apresentou os maiores valores de K_I (Tubo 03 MBTG). Para os parâmetros amplitude do sinal e frequência média os maiores valores do somatório foram encontrados na mesma descontinuidade (Tubo 01 MBTP), a correlação destes parâmetros com K_I apresentaram o menor índice de correlação, 0,34 e 0,36, para amplitude do sinal e frequência média, respectivamente.

Embora os coeficientes de correlação obtidos tenham sido inferiores a 0,90, em função da análise visual dos gráficos das figuras de 5.40 a 5.45 apresentar a tendência de linearidade entre o acréscimo do somatório dos valores dos parâmetros de emissão acústica com o acréscimo do valor de K_I , foi realizado um ajuste de equação utilização os métodos de mínimos quadrados com regressão múltipla (equação V.3).

$$K_{I(EA)} = 3,96 \times 10^{-3} \cdot \sum tsub + 5,67 \times 10^{-4} \cdot \sum cont + 5,44 \times 10^{-4} \cdot \sum ener - 1,47 \times 10^{-4} \cdot \sum dur - 2,69 \times 10^{-3} \cdot \sum amp + 0,54 \cdot \sum freqm + 10,76 \quad (V.3)$$

A utilização do somatório dos valores por parâmetro do sinal de emissão acústica permitiu a obtenção da equação V.3 que apresenta uma constante de 10,76 MPa√m. Este valor é bem inferior ao apresentado na equação V.1 (25,01 MPa√m). Embora a presença de uma constante diferente de 0 (zero) introduza um erro na estimativa de $K_{I(EA)}$, com a utilização do somatório dos valores por parâmetro (equação V.3) este erro foi minimizado e em função disto acredita-se que a equação V.3 fornecerá melhores estimativas.

O índice de correlação obtido entre os valores calculados de K_I e os estimados utilizando a equação V.2 foi de 0,88. Na figura 5.46 apresenta-se uma análise da correlação obtida entre os valores de K_I obtidos com a medição da propagação das descontinuidades, utilizando a técnica ultra-sônica *ToFD*, o monitoramento da pressão interna aplicada e a metodologia proposta por Anderson [Anderson, 1995], descrita no item “IV.3 Material” equação IV.1, e os valores estimados de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatório dos valores dos parâmetros de emissão acústica, ou seja, a equação V.3. Os valores utilizando a metodologia proposta por Anderson estão posicionados no eixo horizontal do gráfico e os valores estimados utilizando a equação V.3 no eixo vertical. A linha reta no gráfico da figura 5.46 situa o lugar geométrico onde os valores obtidos utilizando a equação proposta neste estudo (equação V.3) seriam iguais aos valores obtidos pela metodologia proposta por Anderson [Anderson, 1995]. Pode-se notar que embora poucos valores iguais tenham sido obtidos, existe uma correlação entre esses valores (descrita acima e igual a 0,88). Esta similaridade entre os valores calculados pela metodologia aceita industrialmente para a estimativa de K_I e a metodologia proposta neste estudo permite estabelecer a utilização deste método como uma alternativa para a estimativa de K_I , pelo menos nas mesmas condições do trabalho experimental aqui realizado.

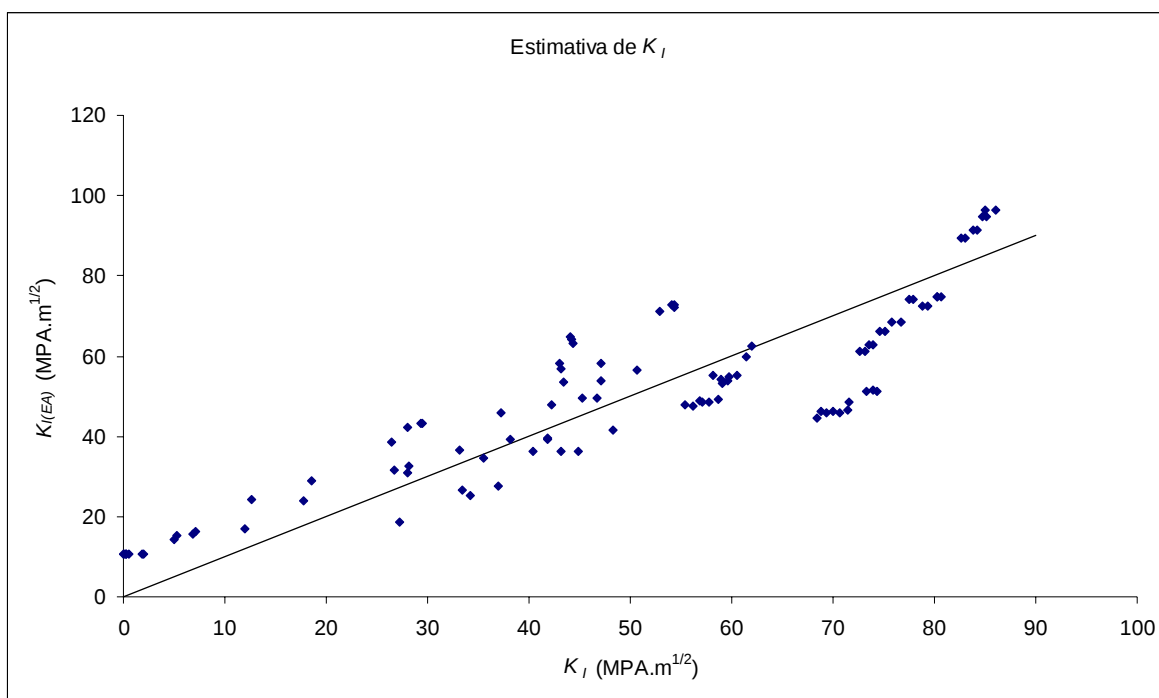


Fig. 5.46 – Gráfico K_I calculado (equação IV.1) *versus* $K_{I(EA)}$ estimado por emissão acústica (equação V.3).

A análise dos sinais de emissão acústica detectados durante o teste hidrostático permitiu identificar que os parâmetros contagem, energia, duração e amplitude apresentam ordens de grandeza semelhantes para sinais detectados nos corpos de prova com propagação de descontinuidades e valores inferiores para o corpo de prova que não apresentou propagação da descontinuidade. Em função disto foram calculados os valores médios e o desvio padrão destes parâmetros nos três corpos de prova testados. O resultado do cálculo destas estatísticas está descrito na tabela V.21. Para os parâmetros contagem, energia e duração, os valores médios são crescentes em relação a propagação das descontinuidades obtida nos corpos de prova, ou seja, maior propagação no corpo de prova Tubo 03, menor no corpo de prova Tubo 01 e nenhuma propagação no corpo de prova Tubo 02. Para o parâmetro amplitude não existe diferença entre o valor médio dos corpos de prova Tubo 01 e Tubo 02, embora este valor seja diferente, menor, quando comparado ao corpo de prova Tubo 03. Para o parâmetro tempo de subida constatou-se o que foi encontrado na análise dos sinais de emissão acústica nas figuras 5.6, 5.17 e 5.28, valor inferiores de K_I correspondem a maiores valores do tempo de subida.

Tabela V.21 – Média e desvio padrão por parâmetro de emissão acústica e corpo de prova.

Parâmetro	Tubo 01		Tubo 02		Tubo 03	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
Tempo de subida	59	140	79	158	59	143
Contagem	121	1250	76	399	201	1384
Energia	228	3536	38	221	260	3282
Duração	2463	19215	2000	6417	3166	14223
Amplitude	49	6	49	6	51	9
Frequência média	0,32	0,42	0,32	0,42	0,30	0,41

A análise descrita no parágrafo anterior utilizando a tabela V.21 foi refeita calculando-se os valores médios e o desvio padrão por descontinuidade e parâmetro de emissão acústica. Os resultado destes cálculos estão descritos nas tabelas V.22 e V.23. Os resultados obtidos com a análise por descontinuidade não foram iguais aos apresentados por corpo de prova, embora os maiores valores de contagem e duração tenham sido obtidos para a descontinuidade Tubo 03 MBTG (que apresentou a maior propagação).

Tabela V.22 – Média por descontinuidade e parâmetro de emissão acústica.

	Tempo de subida	Contagem	Energia	Duração	Amplitude	Frequência média
Tubo 01 MATG	74	41	20	1430	48	0,35
Tubo 01 MBTG	77	67	43	1731	48	0,35
Tubo 01 MBTP	50	162	345	2988	50	0,3
Tubo 02 MATG	96	32	39	1477	51	0,26
Tubo 02 MBTG	110	128	57	3137	49	0,31
Tubo 03 MBTG	90	201	318	3613	49	0,33
Tubo 03 MBTP	70	142	188	1911	48	0,32

Tabela V.23 - Desvio padrão por descontinuidade e parâmetro de emissão acústica.

	Tempo de subida	Contagem	Energia	Duração	Amplitude	Frequência média
Tubo 01 MATG	177	204	87	4277	4	0,43
Tubo 01 MBTG	172	492	383	6701	5	0,43
Tubo 01 MBTP	114	1550	4453	23850	7	0,41
Tubo 02 MATG	162	142	84	3230	9	0,41
Tubo 02 MBTG	199	521	274	8251	5	0,43
Tubo 03 MBTG	176	1224	3791	15742	7	0,43
Tubo 03 MBTP	147	1442	3084	11003	7	0,42

A equação V.3 para estimar $K_{I(EA)}$, ou seja, o valor de K_I utilizando o somatório dos valores dos parâmetros dos sinais de emissão acústica, foi obtida com um coeficiente de correlação linear de 0,88. Em função dos resultados descritos nas tabelas V.21, V.22 e V.23 optou-se por um estudo para melhorar o índice de correlação entre K_I e o somatório dos valores dos parâmetros dos sinais de emissão acústica, uma vez que os maiores valores médios dos parâmetros contagem e duração e o segundo maior valor médio do parâmetro energia foram encontrados para a descontinuidade MBTG no corpo de prova Tubo 03 (maior propagação e maior valor de K_I calculado pela expressão IV.1). A metodologia empregada consistia em filtrar do conjunto de dados sinais que fossem inferiores ao valor médio do parâmetro escolhido para o filtro. Foram utilizados os valores médios dos parâmetros contagem, energia, duração e amplitude, descritos na tabela V.21. O parâmetro tempo de subida não foi utilizado para a realização de filtro em função do explicado nos itens V.1.1, V.2.1 e V.3.1, referentes aos resultados dos ensaios de emissão acústica para os corpos de prova Tubo 03, Tubo 02 e Tubo 01, respectivamente, ou seja, o tempo de subida do sinal de emissão acústica apresenta valores menores quando existe a propagação de descontinuidades. O parâmetro frequência média não foi utilizado em função da saturação apresentada nos gráficos das figuras 5.11, 5.22 e 5.33. Foram inicialmente filtrados todos os sinais, em todos os corpos de prova, que apresentavam contagem inferior a 76 inclusive, pois este foi o menor valor médio do parâmetro contagem encontrado nos sinais coletados nos corpos de prova Tubo 01, Tubo 02 e Tubo 03, conforme a tabela V.21. Para este filtro foi obtido um coeficiente de correlação linear de 0,84. Deve ser ressaltado que este coeficiente de correlação linear foi calculado da mesma forma que o valor calculado que deu origem a equação V.3, ou seja, este coeficiente exprime o índice de correlação linear múltiplo entre os parâmetros de emissão acústica (tempo de subida, contagem, energia,

duração, amplitude e frequência média) e os valores de K_I calculados segundo a equação IV.1 descrita por Anderson [Anderson, 1995]. Como não foi obtido um valor para o coeficiente superior ao obtido sem filtro (0,88) foram filtrados os sinais com valores inferiores a 38 unidades de energia para o parâmetro energia, 2000 μ s para o parâmetro duração e 49 dB para o parâmetro amplitude do sinal. Os coeficientes de correlação obtidos foram 0,85, 0,87 e 0,78 para os parâmetros energia, duração e amplitude, respectivamente. Esta metodologia foi aplicada utilizando para filtro os valores médios obtidos nestes parâmetros nos outros corpos de prova e não produziu coeficiente de correlação linear superior ao encontrado na obtenção da equação V.3 (0,88). Como a filtragem dos sinais com valores inferiores aos parâmetros não produziu o efeito desejado, foi realizada uma nova etapa de filtragem de sinais que consistiu em filtrar os sinais que apresentassem valores inferiores ao valor médio acrescido de um desvio padrão. Para o parâmetro contagem o primeiro filtro desta nova tentativa consistia em remover sinais inferiores a 475 contagens, ou seja, o valor médio 76 acrescido do desvio padrão 399, conforme os valores das estatísticas apresentadas na tabela V.21 na coluna Tubo 02. Para o filtro de contagens suprimindo os sinais com contagens inferiores a 475 foi obtido um coeficiente de correlação de 0,81. Para os demais filtros envolvendo o valor médio e um desvio padrão por parâmetro e por corpo de prova não foram obtidos, uma vez mais, coeficientes de correlação superiores ao encontrado na obtenção da equação V.3 (0,88). A mesma metodologia foi aplicada para o valor médio e dois desvios padrão e não foram obtidos valores superiores a 0,886 para o coeficiente de correlação linear múltiplo.

O valor de 0,88 para R foi obtido utilizando os parâmetros tempo de subida, contagem, energia, duração, amplitude e frequência média. Destes, o parâmetro amplitude era o que apresentava o menor coeficiente de correlação com K_I , em função disto o coeficiente R foi recalculado excluindo-se o parâmetro amplitude. O novo valor obtido para o coeficiente R foi 0,87, indicando que a supressão de um parâmetro resultava no decréscimo do índice de correlação. Como a redução de parâmetro implicou na diminuição do coeficiente de correlação um novo parâmetro foi introduzido para a estimativa de K_I em função dos resultados do ensaio de emissão acústica. Este novo parâmetro, denominado contagens para o pico, traduz o número de contagens coletado até a máxima amplitude do sinal de emissão

acústica. Com a introdução deste parâmetro o coeficiente de correlação obtido foi de 0,94 (equação V.4). Esta equação apresenta uma constante próxima de zero (0,88), que introduz um erro muito pequeno na estimativa de K_I .

$$K_{I(EA)} = 8,95 \times 10^{-3} \cdot \sum tsub + 1,16 \times 10^{-3} \cdot \sum cont - 3,88 \times 10^{-4} \cdot \sum ener \quad (V.4) \\ + 1,67 \times 10^{-5} \cdot \sum dur - 7,40 \times 10^{-3} \cdot \sum amp + 1,06 \cdot \sum freqm \\ - 0,33 \cdot \sum contpico + 0,88$$

Nas figuras 5.47 e 5.48 são apresentados, de forma gráfica, os resultados das estimativas de K_I utilizando a equação IV.1, descrita por Anderson [Anderson, 1995] e os valores de $K_{I(EA)}$ com as equações V.4 e V.3, respectivamente. Estas duas situações de estimativa de K_I utilizando o somatório dos valores dos parâmetros dos sinais de emissão acústica foram as que apresentaram os maiores coeficientes de correlação. Nestes gráficos as duas linhas cheias representam o intervalo de confiança de 95% para o conjunto de dados empregado.

Na figura 5.47 a estimativa de $K_{I(EA)}$ foi realizada utilizando a equação V.4, ou seja, com o somatório dos valores dos parâmetros de emissão acústica: tempo de subida, contagem, energia, duração, amplitude, frequência média e contagem para pico. A correlação destes parâmetros com os valores de K_I , utilizando a equação IV.1 [Anderson, 1995] apresentou coeficiente de correlação de 0,94. De um total de 99 estimativas, 28 ficaram contidas dentro do intervalo de confiança de 95%.

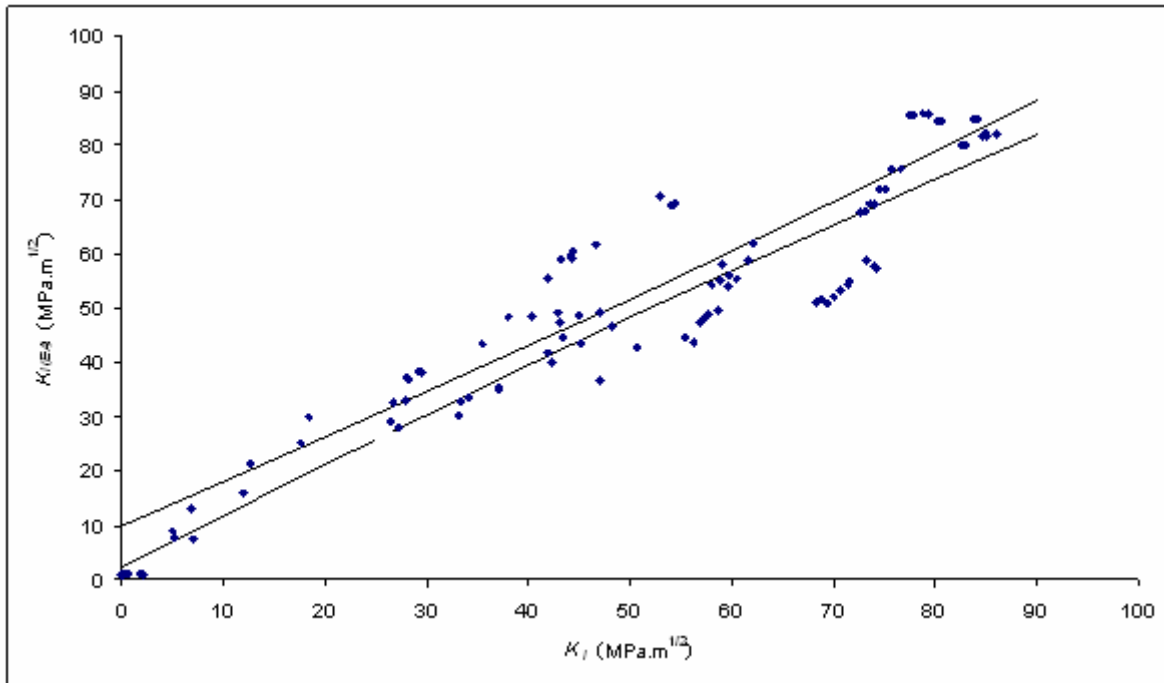


Fig. 5.47 – Gráfico K_I aplicado, segundo a equação IV.1 [Anderson, 1995], *versus* $K_{I(EA)}$, segundo a equação V.4. Parâmetros de emissão acústica utilizados: tempo de subida, contagem, energia, duração, amplitude, frequência média e contagem para pico.

Na figura 5.48 a estimativa de $K_{I(EA)}$ foi realizada utilizando a equação V.3, ou seja, com o somatório dos valores dos parâmetros de emissão acústica: tempo de subida, contagem, energia, duração, amplitude e frequência média. A correlação destes parâmetros com os valores de K_I , segundo a equação IV.1 [Anderson, 1995] apresentou coeficiente de correlação de 0,88. De um total de 99 estimativas, 23 ficaram contidas dentro do intervalo de confiança de 95%.

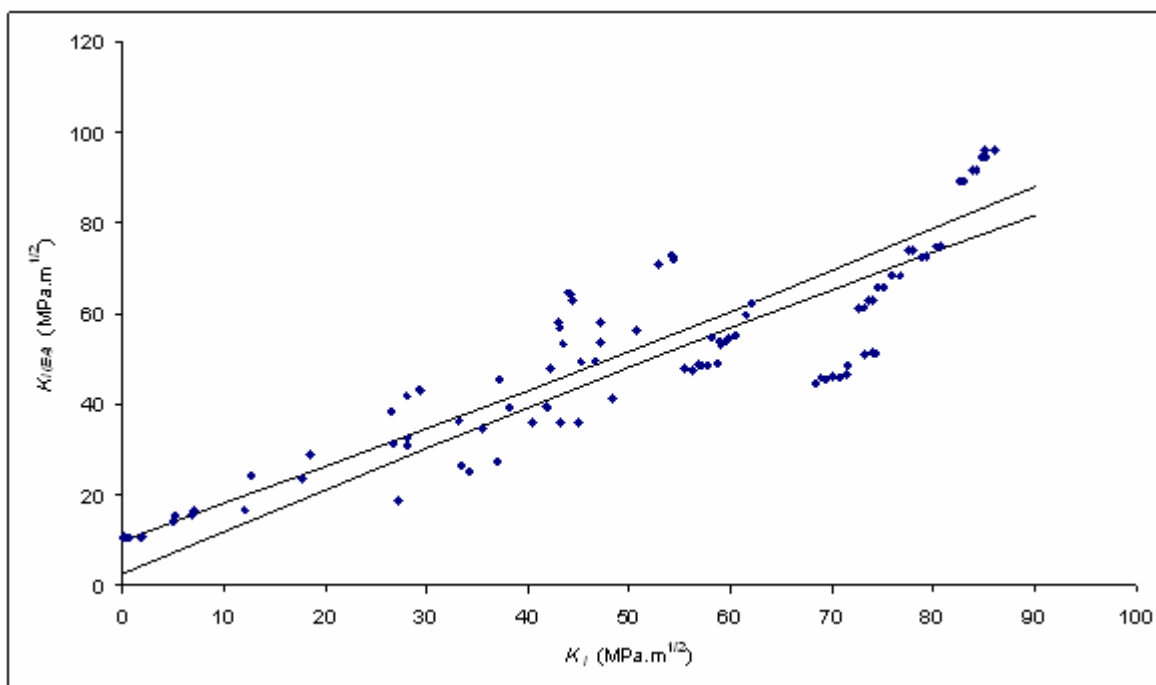


Fig. 5.48 – Gráfico K_I aplicado, segundo a equação IV.1 [Anderson, 1995], *versus* $K_{I(EA)}$, segundo a equação V.3. Parâmetros de emissão acústica utilizados: tempo de subida, contagem, energia, duração, amplitude e frequência média.

Embora exista uma dispersão entre os valores estimados por emissão acústica (equações V.3 e V.4) e os valores calculados de forma convencional (equação IV.1), as estimativas feitas com a maior quantidade de parâmetros (figura 5.47) apresentaram o menor espalhamento entre os valores calculados e os valores estimados.

Embora os coeficiente de correlação obtidos (0,94 e 0,88) para os dados apresentados nas figuras 5.47 e 5.48 tenham sido obtidos para valores de K_I de até 90 MPa $\sqrt{m}$ foi

realizada uma extrapolação, com a utilização as correlações obtidas com os dados de emissão acústica, dos valores máximos de K_I aplicados nos corpos de prova. Esta extrapolação deve ser encarada com reservas em função das equações utilizadas não terem sido obtidas para os valores de entrada utilizados e da utilização do parâmetro de mecânica da fratura K_I não ter validade para a região próxima da tensão limite de escoamento. Apenas como forma de comparação e ou validação das equações propostas esta análise pode ser considerada válida. Na tabela V.24 são apresentados os resultados desta análise para as descontinuidades ensaiadas utilizando as equações V.3 e V.4.

Para a análise da tabela V.24 devem ser considerados os seguintes aspectos:

- o corpo de prova Tubo 02 continha as menores descontinuidades;
- no corpo de prova Tubo 01 apenas a descontinuidade posicionada no metal base e com razão de aspecto 10, denominada MPTP apresentou propagação, detectada pelo ensaio ultra-sônico, ao final do teste hidrostático;
- no corpo de prova Tubo 03 a descontinuidade com razão de aspecto 20 posicionada no metal base falhou catastroficamente durante o teste hidrostático, enquanto que a descontinuidade de razão de aspecto 10 não apresentou propagação detectável pelo método ultra-sônico empregado.

Para as equações V.3 e V.4 a maior estimativa de $K_{I(EA)}$ foi obtida para a descontinuidade que falhou catastroficamente no teste hidrostático. Para a descontinuidade Tubo 03 MBTG a estimativa de $K_{I(EA)}$ foi maior utilizando a equação V.3, que pode ser traduzida como uma abordagem conservadora do processo de estimativa. A análise da tabela V.24 permite verificar que a equação V.4 apresenta valores mais próximos do calculado com a equação IV.1, embora esta estimativa seja inferior em 4 de 7 valores observados. Esta tendência introduz um risco na utilização da equação V.4, pois os valores fornecidos são sub-dimensionados. A descontinuidade Tubo 01 MBTP, que apresentou propagação ao final do teste hidrostático, teve o valor estimado de $K_{I(EA)}$, pelas duas equações, inferior aos valores das estimativas das outras descontinuidades que não apresentaram propagação, semelhante ao ocorrido com o cálculo de K_I pela equação IV.1. Embora este valor não seja suficiente para indicar a propagação das descontinuidades a

estimativa de $K_{I(EA)}$ pela equação V.3 foi superior, novamente indicando uma abordagem conservadora na utilização desta equação.

Embora a equação V.4 apresente um coeficiente de correlação linear múltiplo maior, a sua utilização não é recomendada, pois a estimativa de $K_{I(EA)}$ não é conservadora, apresentando valores inferiores aos reais para a maioria das estimativas. Em função disto a equação V.4 foi descartada na aplicação em casos reais descrita no próximo item.

Com a utilização da equação V.3 pode-se visualizar na tabela V.24 que as descontinuidades que apresentaram propagação, detectável pelo método ultra-sônico *ToFD*, Tubo 01 MBTP e Tubo 03 MBTG, apresentaram os valores de $K_{I(EA)}$, 58,1 MPa√m e 96,4 MPa√m, respectivamente. As descontinuidades Tubo 02 MATG e Tubo 03 MBTP, que não apresentaram propagação detectável pelo método ultra-sônico *ToFD*, não apresentaram estimativas de $K_{I(EA)}$ superiores a 53,2 MPa√m. As descontinuidades Tubo 01 MATG, Tubo 01 MBTG e Tubo 02 MBTG, que não apresentaram propagação detectável pelo método ultra-sônico *ToFD*, apresentaram estimativas de $K_{I(EA)}$ entre 62,4 MPa√m e 72,8 MPa√m. Estes resultados demonstram preliminarmente que:

- estimativas de $K_{I(EA)}$ abaixo de 53 MPa√m significam a não propagação de descontinuidades;
- estimativas de $K_{I(EA)}$ acima de 59 MPa√m podem significar a propagação de descontinuidades; e,
- estimativas de $K_{I(EA)}$ acima de 96 MPa√m significam a propagação crítica de descontinuidades.

Tabela V.24 – Valores estimados de $K_{I(EA)}$ em MPa√m utilizando o somatório dos valores dos parâmetros de emissão acústica e valores calculados de K_I segundo a equação IV.1. Para a equação V.4 foram utilizados os parâmetros tempo de subida, contagem, energia, duração, amplitude, frequência média e contagem para pico; para a equação V.3 foram utilizados os parâmetros tempo de subida, contagem, energia, duração, amplitude e frequência média.

Descontinuidade	$K_{I(EA)}$ - equação		K_I - equação	Observação
	V.4	V.3	IV.1	
Tubo 01 MATG	59,8	64,7	44,1	Sem propagação
Tubo 01 MBTG	68,8	72,8	54,1	Sem propagação
Tubo 01 MBTP	49,1	58,1	47,1	Propagação
Tubo 02 MATG	58,1	53,2	59,1	Sem propagação
Tubo 02 MBTG	61,9	62,4	62,0	Sem propagação
Tubo 03 MBTG	82,3	96,4	86,0	Fratura catastrófica
Tubo 03 MBTP	57,4	51,1	74,3	Sem propagação

V.5 Aplicações em casos reais

A fase de aplicação em casos reais das equações V.1 e V.3, estabelecidas no item V.4, foi realizada utilizando nove conjuntos de dados de equipamentos reais que estavam em operação durante a realização dos ensaios de emissão acústica. A equação V.1, que utiliza os valores fornecidos pelo critério MONPAC, permite uma aplicação direta ao final do ensaio de emissão acústica, pois não requer a realização do somatório dos valores. A equação V.3, que utiliza o somatório dos valores dos parâmetros de emissão acústica, requer o cálculo do somatório dos valores de emissão acústica e estes valores podem ser obtidos com a exportação dos dados de emissão acústica para uma planilha eletrônica (por exemplo, *Microsoft Excel*) ou a construção de gráficos no programa de gerenciamento dos dados de emissão acústica (por exemplo, *AEWin*). Para a utilização das duas equações é necessária a etapa de filtragem com a técnica do primeiro sinal. Os valores citados nos próximos itens para o parâmetro *Severity index* referem-se ao máximo valor obtido por canal (sensor) instalado no equipamento em teste durante a realização do ensaio. No trabalho experimental descrito nos itens anteriores deste capítulo os valores do parâmetro

Severity index foram obtidos no mesmo canal e em vários instantes de tempo de um mesmo teste e, em função disto, apresentavam variação durante o teste.

Os proprietários dos equipamentos e as equipes que realizaram os ensaios de emissão acústica não são apresentados para evitar desnecessárias exposições dos profissionais envolvidos e questionamentos sobre os resultados já apresentados ao final da campanha de testes. Os conjuntos de dados foram identificados sequencialmente.

Os ensaios de emissão acústica realizados durante os testes hidrostáticos dos equipamentos são influenciados por fatores ambientais, tais como: incidência de chuva ou partículas carregados por vento; e por perdas de estanqueidade originadas de vazamentos. Estes fatores afetam o ensaio pela geração de sinais espúrios que podem contaminar os dados genuínos de emissão acústica, caso não sejam devidamente identificados e filtrados antes da análise dos dados do teste. Os dados (sinais) de emissão acústica coletados durante a realização dos testes hidrostáticos dos conjuntos de dados 01, 02, 03, 04, 05 e 06, foram acompanhados pelo autor e não apresentaram estes sinais espúrios durante a coleta. As deformações ou trincamentos identificados ao final dos testes hidrostáticos encontram-se descritas na análise do respectivo conjunto de dados. A verificação visual destas deformações permitiram a verificação da metodologia proposta, ou seja, a associação ou não das estimativas de $K_{I(EA)}$, utilizando as equações V.1 e V.3, com deformações macroscópicas (trincamento).

Todos os equipamentos citados nos conjuntos de dados de 01 a 09 continuam em operação, excetuando-se os equipamentos dos conjuntos de dados 03 e 06 que foram enviados ao CENPES para serem utilizados como corpos de prova em projetos de pesquisa e desenvolvimento.

V.5.1 Conjunto de dados 01

O conjunto de dados 01 foi gerado durante o ensaio de emissão acústica de um vaso de pressão horizontal fabricado em 1973. Este equipamento foi projetado segundo o código

ASME Seção VIII Divisão 1 e construído utilizando material ASTM A 516 Grau 70 para o casco e ASTM A 283 Grau C para os tampos. As dimensões aproximadas do equipamento são: diâmetro 2 m, comprimento 8,3 m, espessura 5/8 polegadas. As condições de operação previstas foram pressão máxima 18,1 kg/cm² e temperatura máxima 93,3°C. O ensaio hidrostático conduzido pelo CENPES em 1996 [Carneval, 1996] impôs uma pressão interna de 30 bar, valor este superior a máxima pressão de operação. Este equipamento foi retirado de operação em função das inspeções realizadas terem revelado a presença de empolamentos superficiais devido a fissuração pelo hidrogênio. Os ensaios não destrutivos realizados com a técnica ultra-sônica pulso-eco revelaram a presença de descontinuidades do tipo fissuração induzida pelo hidrogênio. Na tabela V.25 são apresentados por canal (sensor) instalado no equipamento do conjunto de dados 01: os valores de *severity*; o somatório por parâmetros de emissão acústica; a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o parâmetro *severity* (equação V.1); e a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatório dos parâmetros de emissão acústica (equação V.3). Com o carregamento de 30 bar por pressão interna o vaso de pressão não apresentou danos estruturais, ou seja, nenhuma descontinuidade acarretou a perda da condição de estanqueidade do equipamento e não foram identificadas deformações macroscópicas. Deve-se ressaltar que a estimativa de K_I apresentou valores máximos diferentes quando as equações V.1 e V.3 foram utilizadas, 50,5 MPa√m no sensor 10 e 102,0 MPa√m no sensor 16, respectivamente. Leggatt *et alli* [Leggatt, 1999] realizaram um estudo de quatro casos de falhas e um dos materiais estudados foi o aço ASTM A516 Gr70, cujo valor de K_I utilizado foi de 70 ksi√in (aproximadamente 77 MPa√m). O valor obtido pela equação V.3 (102,0 MPa√m) é superior ao valor encontrado em literatura para o aço em questão, porém não deve ser esquecido que:

- As equações V.1 e V.3 foram estabelecidas utilizando outro material;
- A falha catastrófica nos testes laboratoriais forneceu uma estimativa de $K_{I(EA)}$ de 96,4 MPa√m.

Em função das considerações acima pode-se afirmar que as equações devem ter alguma correção para serem utilizadas em outros materiais e que os limites de estimativa para a identificação da propagação das descontinuidades deve ser estudado.

Tabela V.25 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o conjunto de dados 01 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

canal	Equação V.1		Equação V.3						
	Severity index	$K_{I(EA)}$	Tempo subida	Contagem	Energia	Duração	Amplitude	Frequência média	$K_{I(EA)}$
1	312,0	25,9	10236	16364	4690	146292	18868	159,68	76,2
3	406,1	26,1	5562	13475	5326	137481	9521	86,77	43,8
4	397,3	26,1	14457	11239	5864	208745	15609	69,34	41,9
5	481,0	26,4	5236	15553	6074	155448	9836	88,32	41,5
6	655,8	26,8	6046	14382	7529	243170	4578	21,65	10,4
7	359,1	26,0	11982	14984	4932	138393	13217	108,79	71,6
8	1270,6	28,6	12262	31794	16388	456985	21969	105,37	16,1
9	1292,3	28,6	16082	10419	40639	174001	35777	174,73	73,9
10	9098,3	50,5	27803	78901	104278	986225	26716	117,09	67,7
12	491,1	26,4	16438	11012	6734	205122	16470	91,08	59,9
13	532,4	26,5	9486	14636	6438	162735	11415	80,30	48,4
14	455,5	26,3	8530	1908	1499	51492	10455	57,77	41,6
15	357,5	26,0	10197	10131	3750	103971	17083	126,08	65,0
16	235,7	25,7	24167	12377	9033	184434	61443	329,54	102,0
17	323,4	25,9	3218	9933	4112	121596	6733	48,89	21,5
18	60,4	25,2	5629	6464	3925	176523	4439	19,06	11,1

No gráfico da figura 5.49 apresentam-se os valores de $K_{I(EA)}$ calculados segundo as equações V.1 e V.3. No eixo horizontal são apresentados os resultados utilizando a equação V.1 (*Severity index*) e no eixo vertical os resultados utilizando a equação V.3 (somatório dos parâmetros). Cada ponto no gráfico representa um canal de coleta de dados de emissão acústica instalado no vaso de pressão testado. A reta apresentada no gráfico representa a situação onde os valores calculados pelas duas equações seriam idênticos, ou seja, serve apenas como referência para analisar os resultados fornecidos pelas duas equações. Pode-se notar que a estimativa utilizando o somatório dos parâmetros do sinal de emissão acústica apresenta valores superiores, na maioria dos casos, quando comparada com a estimativa com os valores de *Severity index*. Os valores de $K_{I(EA)}$ estimados utilizando os valores de *Severity index* não apresentaram grande variação, excetuando-se o valor obtido para o canal 10, e em função disto a utilização da equação V.1 forneceu valores muito próximos,

posicionando praticamente todos os pontos no gráfico na mesma vertical próxima a 30 MPa√m. O somatório dos valores dos parâmetros dos sinais de emissão acústica apresenta uma maior variação entre canais e entre parâmetros e em função disto fornece valores com maior espalhamento na estimativa de $K_{I(EA)}$. A aplicação da equação V.3 fornece valores com maior espalhamento e superiores aos valores calculados com a equação V.1, sendo assim, pode-se afirmar que a utilização da equação V.3 permite uma abordagem mais conservadora, pois potencializa o resultado na direção de alarmar o proprietário do equipamento em teste antes da ocorrência de propagação de descontinuidades.

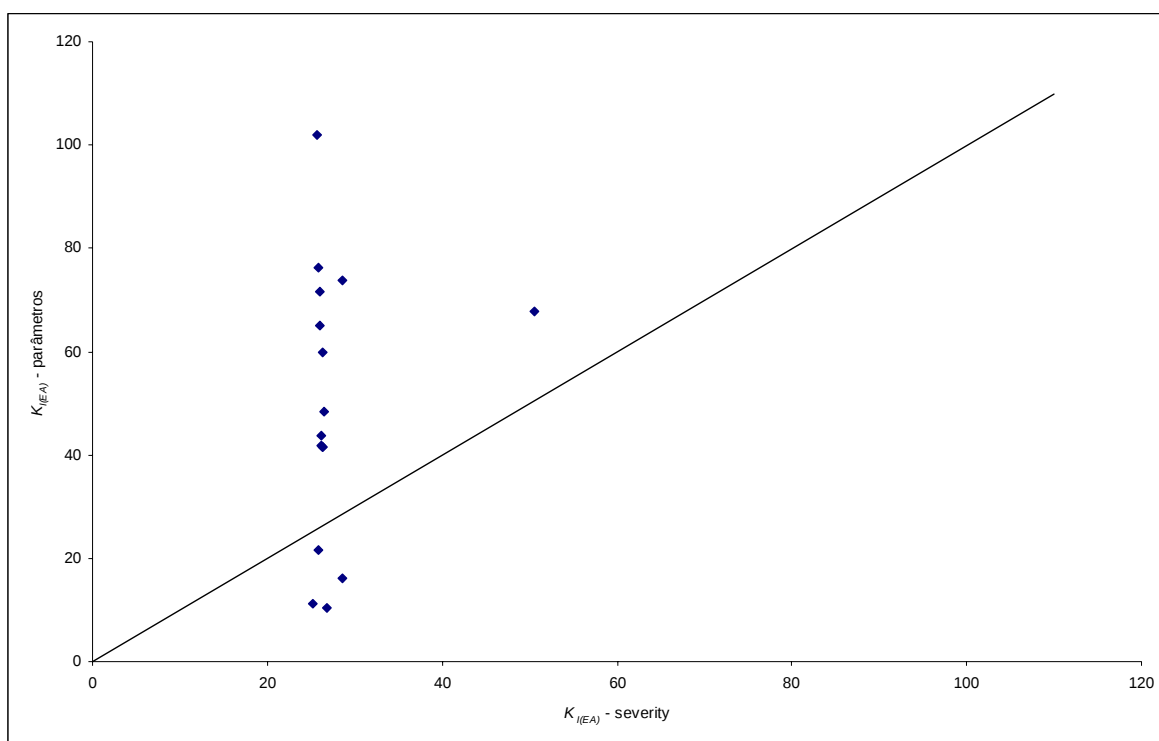


Fig. 5.49 – Gráfico de correlação entre os valores estimados para $K_{I(EA)}$, no conjunto de dados 01, pelas equações V.1 e V.3. Valores de $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

V.5.2 Conjunto de dados 02

O conjunto de dados 02 foi gerado durante o re-ensaio do equipamento do conjunto de dados 01. O ensaio hidrostático conduzido pelo CENPES em 1998 impôs a mesma pressão interna de 30 bar, embora o equipamento tenha sido carregado com pressão interna de

aproximadamente 63 bar durante o teste hidrostático em 1996 [Carneval, 1996], proporcionando deformação plástica no equipamento. Na tabela V.26 são apresentados por canal (sensor) instalado no equipamento do conjunto de dados 02: os valores de *Severity index*; o somatório por parâmetros de emissão acústica; a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o parâmetro *Severity index* (equação V.1); e a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatório dos parâmetros de emissão acústica (equação V.3). Com o carregamento de 30 bar, por pressão interna, o vaso de pressão não apresentou novos danos estruturais, ou seja, nenhuma descontinuidade acarretou a perda da condição de estanqueidade do equipamento e não foram identificadas deformações macroscópicas. Deve-se ressaltar que a estimativa de $K_{I(EA)}$ apresentou valores máximos diferentes quando as equações V.1 e V.3 foram utilizadas, 28,8 MPa√m no sensor 15 e 171,5 MPa√m no sensor 11, respectivamente. Embora este ensaio tenha sido realizado no mesmo equipamento não é possível comparar os resultados por canal de emissão acústica, pois, o posicionamento dos sensores pode não ter sido realizado da mesma forma. Mesmo assim foi percebido que o valor máximo para $K_{I(EA)}$ obtido utilizando a equação V.1 foi inferior ao obtido no conjunto de dados 01, ou seja, no primeiro teste. Para a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando a equação V.3 o valor máximo foi superior ao obtido no conjunto de dados 01 e superior ao valor estimado para o corpo de prova que apresentou fratura catastrófica do corpo de prova (tabela V.24, descontinuidade Tubo 03 MBTG, 96,4 MPa√m). Este valor estimado de $K_{I(EA)}$ é superior ao utilizado por Leggatt *et alli* [Leggatt, 1999], porém, como descrito acima o vaso de pressão testado não apresentava nenhuma descontinuidade estrutural ou perda de estanqueidade neste momento do teste.

Em função das considerações acima pode-se afirmar que as equações devem ter alguma correção para serem utilizadas em outros materiais e que os limites de estimativa para a identificação da propagação das descontinuidades deve ser estudado.

Tabela V.26 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o conjunto de dados 02 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

canal	Equação V.1		Equação V.3						
	Severity index	$K_{I(EA)}$	Tempo subida	Contagem	Energia	Duração	Amplitude	Frequência média	$K_{I(EA)}$
1	120	25,3	3003	1996	1373	52051	1561	2,46	14,0
3	508	26,4	55331	18219	17568	418908	26383	28,66	132,3
5	60	25,2	734	997	629	19411	855	2,00	10,5
6	31,1	25,1	4205	1173	558	28438	3422	6,66	18,5
9	258,2	25,7	9553	7278	3453	76567	6141	19,49	37,2
10	161,2	25,5	7392	3961	2981	69735	6392	10,03	21,8
11	81,2	25,2	57889	16735	10110	186881	43273	113,29	171,5
12	410,1	26,2	8096	6173	5735	98544	4999	6,55	25,0
13	54,1	25,2	1716	1233	804	32854	2000	4,96	11,1
14	94,9	25,3	2284	1679	1089	48949	1437	2,64	11,7
15	1349,2	28,8	32228	23232	24511	448646	18440	19,18	59,4
16	526,5	26,5	6972	5935	8608	89426	5960	9,41	22,2
17	67,9	25,2	5369	1297	945	27309	1998	3,17	25,6
18	32,4	25,1	6022	988	927	18430	3617	5,34	26,1

No gráfico da figura 5.50 apresentam-se os valores de $K_{I(EA)}$ calculados segundo as equações V.1 e V.3. No eixo horizontal são apresentados os resultados utilizando a equação V.1 (*Severity index*) e no eixo vertical os resultados utilizando a equação V.3 (somatório dos parâmetros). Cada ponto no gráfico representa um canal de coleta de dados de emissão acústica instalado no vaso de pressão testado. A reta apresentada no gráfico representa a situação onde os valores calculados pelas duas equações seriam idênticos, ou seja, serve apenas como referência para analisar os resultados fornecidos pelas duas equações. Pode-se notar a mesma tendência apresentada no primeiro teste deste vaso de pressão (conjunto de dados 01) onde a estimativa utilizando o somatório dos parâmetros do sinal de emissão acústica apresenta valores superiores, quando comparada com a estimativa com os valores de *Severity index*. Neste conjunto de dados, 5 canais de emissão acústica apresentaram a estimativa de $K_{I(EA)}$ muito próximas utilizando as duas equações (tabela V.26, canais 10, 12, 16, 17 e 18). Os valores de $K_{I(EA)}$ estimados utilizando os valores de *Severity index* não apresentaram grande variação, e em função disto a utilização da equação V.1 forneceu

valores muito próximos, posicionando praticamente todos os pontos no gráfico na mesma vertical próxima a 30 MPa√m. O somatório dos valores dos parâmetros dos sinais de emissão acústica apresenta uma maior variação entre canais e entre parâmetros e em função disto fornece valores com maior espalhamento na estimativa de $K_{I(EA)}$. Uma vez mais pode ser citada a abordagem mais conservadora da equação V.3.

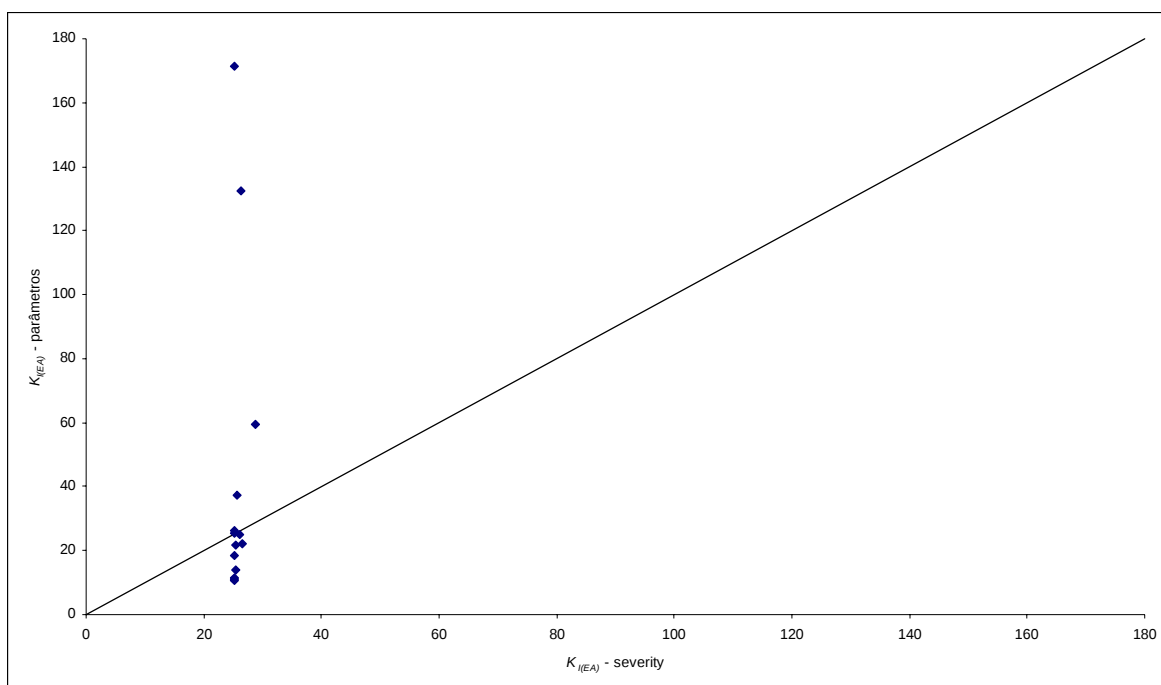


Fig. 5.50 – Gráfico de correlação entre os valores estimados de $K_{I(EA)}$, no conjunto de dados 02, pelas equações V.1 e V.3. Valores de K_I em MPa√m.

V.5.3 Conjunto de dados 03

O conjunto de dados 03 foi gerado durante o teste hidrostático de um vaso de pressão vertical retirado de operação pela presença de descontinuidades do tipo fissuração induzida pelo hidrogênio. Este vaso foi construído em aço carbono com aproximadamente 1,5 m de comprimento e 500 mm de diâmetro, com espessura de aproximadamente 10 mm. A pressão normal de trabalho estava estipulada para 1,0 kgf/cm², com máxima temperatura de operação fixada em 60°C; o fluido de processo era gás com elevado teor de H₂S. Este vaso foi examinado com o método ultra-sônico e teve como resultado a presença de fissuração

induzida pelo hidrogênio em praticamente todo o costado [Soares, 2000]. O teste hidrostático deste equipamento foi conduzido em duas etapas: na primeira etapa o equipamento foi carregado com pressão interna até 8 kgf/cm², pressão limite para imposição de tensões de membrana da ordem da tensão limite de escoamento; e, na segunda etapa o carregamento com pressão interna até o colapso do equipamento [Soares, 2000]. Na tabela V.27 são apresentados por canal (sensor) instalado no equipamento do conjunto de dados 03: os valores de *Severity index*; o somatório por parâmetros de emissão acústica; a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o parâmetro *Severity index* (equação V.1); e a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatório dos parâmetros de emissão acústica (equação V.3), para o carregamento dentro do regime elástico do equipamento. Durante esta etapa do teste não foi possível identificar visualmente qualquer deformação no equipamento ou a presença de descontinuidades. Este vaso de pressão foi construído em aço A36 e, para este material foi encontrado um registro de valor de 50 ksi $\sqrt{\text{in}}$ (aproximadamente 55 MPa $\sqrt{\text{m}}$) em um relatório escrito pelo *Federal Emergency Management Agency* [FEMA, 2000]. Nenhum dos valores estimados com as equações V.1 e V.3 foram superiores ao valor encontrado na literatura para a tenacidade à fratura do material utilizado na construção do vaso de pressão. Os valores de *Severity index* não apresentaram grande variação e em função disto os valores estimados de $K_{I(EA)}$ pela equação V.1 não apresentaram variação. O somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica apresenta variação entre os canais e os parâmetros de emissão acústica, e em função disto os valores de $K_{I(EA)}$ apresentam variação entre os canais. O valor estimado de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatórios dos parâmetros, ou seja, a equação V.3 apresentou um valor próximo (87%) do valor encontrado na literatura [FEMA, 2000] para o aço A36.

Tabela V.27 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o conjunto de dados 03, no regime elástico, utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

canal	Equação V.1		Equação V.3						
	Severity index	$K_{I(EA)}$	Tempo de subida	Contagem	Energia	Duração	Amplitude	Frequência média	$K_{I(EA)}$
4	195,9	25,6	7787	17347	3301	189957	10281	87,90	44,6
5	62,0	25,2	3373	4896	1036	64008	4132	26,40	22,4
6	63,6	25,2	2875	4732	874	58810	3844	35,07	25,1
7	393,7	26,1	3571	16914	4615	185683	5447	34,83	13,6
8	136,9	25,4	3359	9611	1678	114050	6049	64,11	31,6
9	301,6	25,9	3019	18097	3793	194060	6473	45,72	13,5
10	80,0	25,2	4487	6388	1180	82319	6149	40,99	26,0

Na tabela V.28 são apresentados por canal (sensor) instalado no equipamento do conjunto de dados 03: os valores de *Severity index*; o somatório por parâmetros dos sinais de emissão acústica; a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o parâmetro *Severity index* (equação V.1); e a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica (equação V.3), para o carregamento até o colapso do equipamento (73,8 kgf/cm²). Ao final desta etapa foram observados visualmente vazamentos próximos aos sensores 7, 8, 9 e 10, e um trincamento com vazamento entre os sensores 4 e 6. Comparando as tabelas V.27 e V.28 verifica-se que: (1) no regime elástico (tabela V.27), as estimativas de $K_{I(EA)}$ utilizando o valor de *Severity index*, não apresentaram espalhamento; (2) no regime elástico (tabela V.27), as estimativas de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica, os sensores 4 e 8 apresentaram valores superiores aos demais e inferiores ao valor de K_I encontrado na literatura [FEMA, 2000], ou seja, 55 MPa√m; (3) no colapso (tabela V.28), as estimativas de $K_{I(EA)}$ utilizando o valor de *Severity index*, o sensor 6 apresentou valor superior aos demais, porém inferior ao valor de K_I encontrado na literatura, ou seja, 55 MPa√m [FEMA, 2000]; e (4) no colapso (tabela V.28), as estimativas de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica, todos os sensores apresentaram valores extremamente superiores ao valor de K_I encontrado na literatura, ou seja, 55 MPa√m [FEMA, 2000]. Para os valores estimados utilizando o somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica (equação V.3), apenas o canal 5

apresentou valor próximo ao valor encontrado na literatura, ou seja, uma estimativa de 59,4 MPa√m para um valor de literatura de 55 MPa√m [FEMA, 2000]. Os demais canais apresentaram valores superiores em mais de 3 vezes (canal 6), quase 10 vezes (canal 7), entre 20 e 30 vezes (8, 9 e 10) e mais de 120 vezes (canal 4). Como descrito acima, foram visualizados vazamentos próximos aos canais 7, 8, 9 e 10 e trincamentos próximos aos canais 4 e 6. 4 apresentou valor extremamente superior aos demais. Neste conjunto de dados a aplicação das equações V.1 e V.3 produziu um resultado coerente com o teste hidrostático realizado, mesmo com o desenvolvimento das equações V.1 e V.3 para outro material. Outro ponto que deve ser ressaltado é que a falha catastrófica ocorrida no teste hidrostático do corpo de prova Tubo 03 forneceu uma estimativa de $K_{I(EA)}$ de 96,4 MPa√m e neste conjunto de dados, para o teste hidrostático até o colapso, todos os canais (excetuando-se o canal 5) forneceram estimativas de $K_{I(EA)}$ acima deste valor, coerentemente com o detectado visualmente no vaso de pressão testado.

Tabela V.28 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o conjunto de dados 03, até o colapso, utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

canal	Equação V.1		Equação V.3						
	Severity index	$K_{I(EA)}$	Tempo de subida	Contagem	Energia	Duração	Amplitude	Frequência média	$K_{I(EA)}$
4	1393,9	28,9	486323	216076	260913	3535210	1935404	18913,41	6583,3
5	426,4	26,2	15257	12008	8717	149043	26011	128,44	59,4
6	8172	47,9	27477	62973	107446	728017	49373	334,33	152,3
7	83,1	25,2	26861	7226	17064	140779	158058	1555,09	515,8
8	2108,2	30,9	58036	17624	33713	330453	295732	3551,49	1323,3
9	483,7	26,4	139092	34244	121094	791251	630291	4155,74	1055,1
10	284	25,8	96503	25437	42369	433383	431000	4089,56	1393,0

O gráfico apresentando a correlação entre os valores de $K_{I(EA)}$ estimados pelas equações V.1 e V.3 não foi construído em função das diferenças entre as estimativas das duas equações.

V.5.4 Conjunto de dados 04

O conjunto de dados 04 foi gerado durante o teste hidrostático de um vaso de pressão horizontal novo construído para realização de ensaios hiperbáricos. Foram coletados sinais

de emissão acústica na região central do vaso de pressão em função do histórico de trincamento durante a fabricação com o respectivo reparo. Este vaso foi construído em aço carbono e a região inspecionada apresentava 730 mm de comprimento e 2800 mm de diâmetro, com espessura de aproximadamente 240 mm. A pressão normal de trabalho estava estipulada para 300 kgf/cm². Na tabela V.29 são apresentados por canal (sensor) instalado no equipamento do conjunto de dados 04: os valores de *Severity index*; o somatório por parâmetros de emissão acústica; a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o parâmetro *Severity index* (equação V.1); e a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatório dos parâmetros de emissão acústica (equação V.3), para o teste hidrostático realizado. Durante o teste hidrostático não foram identificadas, visualmente, descontinuidades ou trincamentos no vaso de pressão. O aço utilizado para a construção deste vaso de pressão não foi identificado, e em função disto não é possível realizar uma comparação entre o valor de K_I do material e o valor de $K_{I(EA)}$ estimado pelas equações V.1 e V.3. Foram instalados 14 sensores de emissão acústica no equipamento e apenas dois destes sensores forneceram valores utilizando o critério MONPAC (canais 4 e 7). A estimativa de $K_{I(EA)}$ com estes valores, ou seja, utilizando a equação V.1, forneceu valores próximos a 25 MPa√m. O somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica forneceu valores em cinco sensores (canais 2, 3, 4 e 7) e a estimativa utilizando estes valores, com a equação V.3, forneceu valores próximos a 11 MPa√m. As estimativas fornecidas pelas equações V.1 e V.3 foram de valores próximos aos valores das constantes nas duas equações. Esta constatação indica para sinais de emissão acústica pouco significativos, pois, não foram suficientes para aumentar a estimativa de $K_{I(EA)}$ além do valor da constante nas equações formuladas.

Tabela V.29 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o conjunto de dados 04 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

canal	Equação V.1		Equação V.3						
	Severity index	$K_{I(EA)}$	Tempo de subida	Contagem	Energia	Duração	Amplitude	Frequência média	$K_{I(EA)}$
1	-	25,0	-	-	-	-	-	-	10,8
2	-	25,0	68	45	23	2340	51	0,02	10,6
3	-	25,0	444	27	15	1217	48	0,02	12,2
4	65,8	25,2	3870	1192	776	80711	1150	0,37	12,4
5	-	25,0	-	-	-	-	-	-	10,8
6	-	25,0	402	17	19	2431	49	0,01	11,9
7	25,4	25,1	14	30	16	3846	90	0,02	10,0
8	-	25,0	-	-	-	-	-	-	10,8
9	-	25,0	-	-	-	-	-	-	10,8
10	-	25,0	-	-	-	-	-	-	10,8
11	-	25,0	-	-	-	-	-	-	10,8
12	-	25,0	-	-	-	-	-	-	10,8
13	-	25,0	-	-	-	-	-	-	10,8
14	-	25,0	-	-	-	-	-	-	10,8

No gráfico da figura 5.51 apresentam-se os valores de $K_{I(EA)}$ calculados segundo as equações V.1 e V.3. No eixo horizontal são apresentados os resultados utilizando a equação V.1 (*Severity index*) e no eixo vertical os resultados utilizando a equação V.3 (somatório dos parâmetros). Cada ponto no gráfico representa um canal de coleta de dados de emissão acústica instalado no vaso de pressão testado. A reta apresentada no gráfico representa a situação onde os valores calculados pelas duas equações seriam idênticos, ou seja, serve apenas como referência para analisar os resultados fornecidos pelas duas equações. Para este conjunto de dados pode-se notar uma inversão na tendência apresentada no conjunto de dados 01 e 02, ou seja, neste conjunto de dados as maiores estimativas de $K_{I(EA)}$ foram obtidas utilizando os valores de *Severity index*. Conforme descrito no parágrafo anterior isto pode ser explicado pela ocorrência de sinais de emissão acústica pouco significativos que não produziram estimativas superiores ao valor das constantes das equações V.1 e V.3. Como a constante da equação V.1 é superior a constante da equação V.3, respectivamente

25,0 MPa√m e 10,8 MPa√m, este valor foi preponderante no resultados das estimativas de $K_{I(EA)}$.

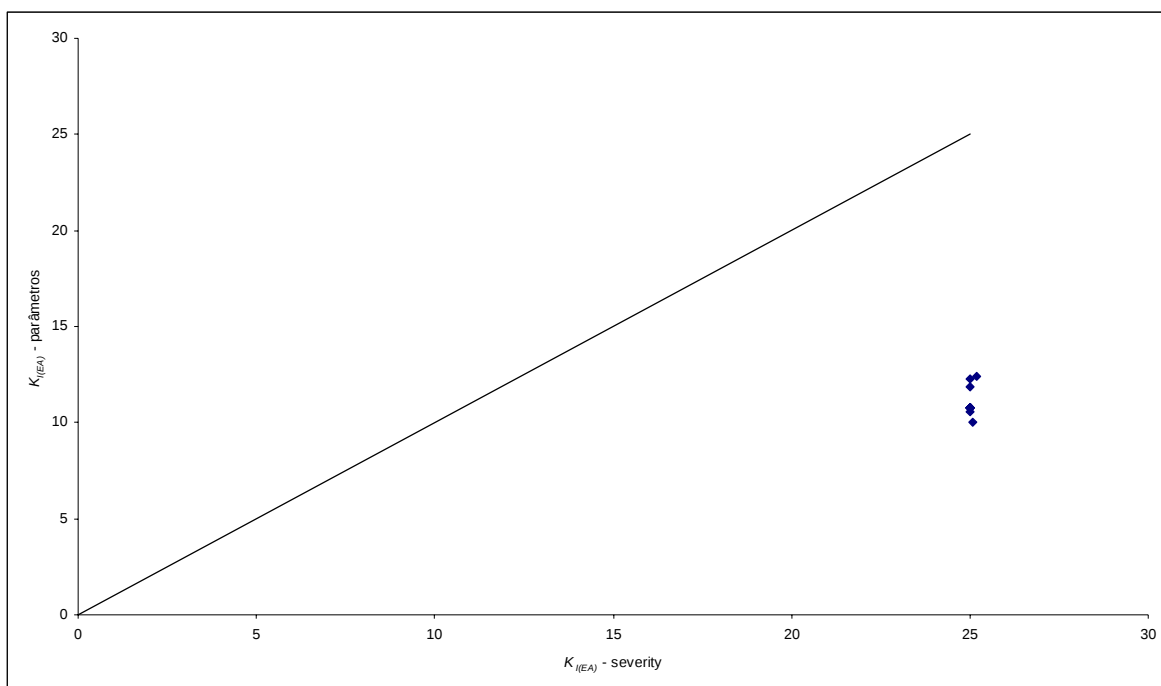


Fig. 5.51 – Gráfico de correlação entre os valores estimados de $K_{I(EA)}$, no conjunto de dados 04, pelas equações V.1 e V.3. Valores de K_I em MPa√m.

V.5.5 Conjunto de dados 05

O conjunto de dados 05 foi gerado durante o teste hidrostático de um vaso de pressão horizontal. Foram coletados sinais de emissão acústica no carregamento hidrostático com pressão máxima de 32 kgf/cm², para uma condição de trabalho de 21 kgf/cm². Este vaso foi construído em aço ASTM A 516 Grau 60 com diâmetro interno de 1400 mm, comprimento 4500 mm, espessura 19 mm. Na tabela V.30 são apresentados por canal (sensor) instalado no equipamento do conjunto de dados 05: os valores de *Severity index*; o somatório por parâmetros dos sinais de emissão acústica; a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o parâmetro *Severity index* (equação V.1); e a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatório dos parâmetros de emissão acústica (equação V.3), para o teste hidrostático realizado. Durante o teste

hidrostático não foi possível identificar visualmente qualquer trincamento no equipamento ou a presença de descontinuidades e a perda de estanqueidade.

Na tabela V.30 pode-se perceber que três valores estimados de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatório dos parâmetros de emissão acústica apresentaram valores negativos. O equipamento do conjunto de dados 05 não era totalmente cilíndrico, existia um acessório neste equipamento com aproximadamente 400 mm de diâmetro e 700 mm de comprimento, soldado ao equipamento. Este dispositivo transforma a geometria do equipamento e pode ter sido a origem de valores negativos para a estimativa de $K_{I(EA)}$, uma vez que a equação V.3 foi determinada em componentes cilíndricos. Os valores estimados de $K_{I(EA)}$ utilizando a equação V.1, ou seja, com os valores de *Severity index*, não apresentaram grande variação em função dos valores obtidos pelo critério MONPAC não apresentarem variação entre eles. A estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando a equação V.3, ou seja, utilizando o somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica apresentou um valor máximo de 52,9 MPa√m. Embora não tenha sido identificado na literatura um valor de K_I para o aço ASTM A 516 Grau 60, o valor encontrado para o mesmo aço com grau 70 no trabalho publicado por Leggatt et alli [Leggatt, 1999] de 77 MPa√m foi utilizado apenas para comparação. Todas as estimativas de $K_{I(EA)}$ forneceram valores inferiores ao valor de literatura e inferiores ao valor da estimativa de $K_{I(EA)}$ para a menor propagação encontrada neste estudo (96,4 MPa√m)

Tabela V.30 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o conjunto de dados 05 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

canal	Equação V.1		Equação V.3						
	Severity index	$K_{I(EA)}$	Tempo de subida	Contagem	Energia	Duração	Amplitude	Frequência média	$K_{I(EA)}$
1	-	25,0	25560	20149	8968	502755	13078	14,63	26,8
2	117,9	25,3	10352	11117	4170	236498	4684	4,06	15,0
3	11,2	25,0	21499	10205	5740	310762	12844	14,90	32,4
4	-	25,0	24756	19154	5607	319656	12916	22,51	52,9
5	61,3	25,2	19427	4523	3693	216252	10047	8,58	37,9
6	18,1	25,1	54802	82350	31054	1622136	29080	30,93	-9,4
7	-	25,0	11012	21420	8220	426003	5213	4,99	-3,1
8	329,9	25,9	18807	37726	16060	795629	11735	10,37	-27,9
9	73,2	25,2	16030	2804	2915	177724	8650	7,40	31,9
10	-	25,0	9739	5356	3329	235694	3683	2,69	11,0
11	-	25,0	8654	9856	5102	377880	3880	1,92	-11,7

No gráfico da figura 5.52 apresentam-se os valores de $K_{I(EA)}$ calculados segundo as equações V.1 e V.3. No eixo horizontal são apresentados os resultados utilizando a equação V.1 (*Severity index*) e no eixo vertical os resultados utilizando a equação V.3 (somatório dos parâmetros). Cada ponto no gráfico representa um canal de coleta de dados de emissão acústica instalado no vaso de pressão testado. A reta apresentada no gráfico representa a situação onde os valores calculados pelas duas equações seriam idênticos, ou seja, serve apenas como referência para analisar os resultados fornecidos pelas duas equações. Para este conjunto de dados pode-se notar que embora valores negativos tenham sido estimados, existe uma distribuição aproximadamente igual entre valores acima e abaixo da reta para valores idênticos.

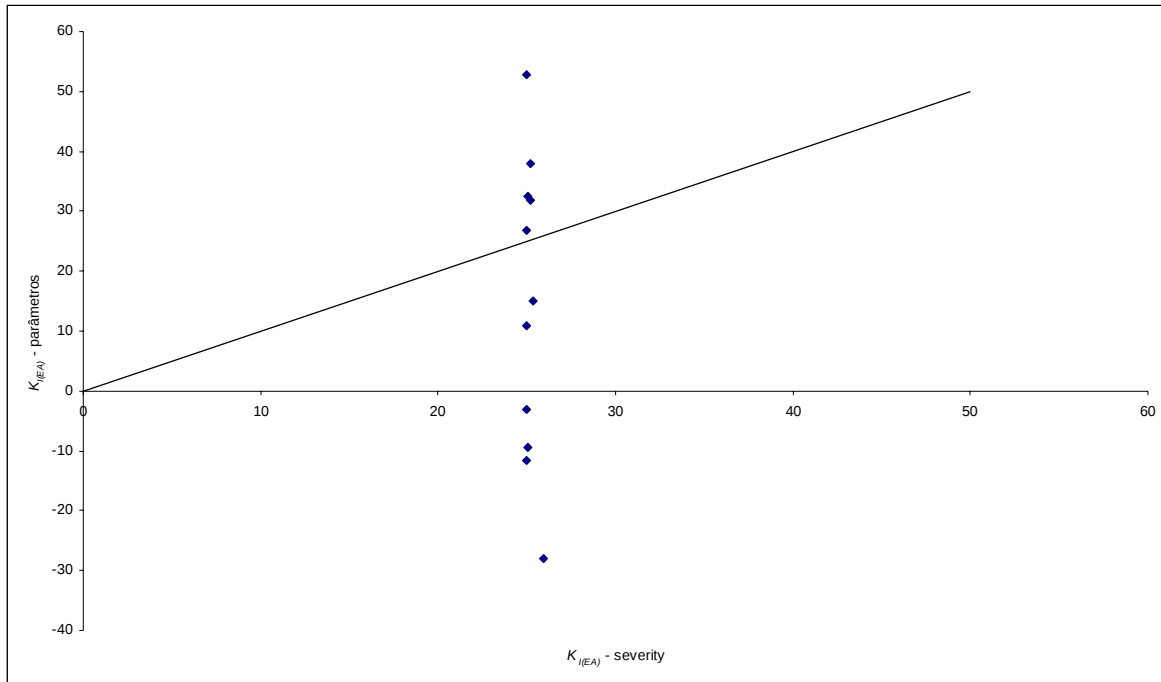


Fig. 5.52 – Gráfico de correlação entre os valores estimados de $K_{I(EA)}$, no conjunto de dados 05, pelas equações V.1 e V.3. Valores de K_I em MPa√m.

V.5.6 Conjunto de dados 06

O conjunto de dados 06 foi gerado durante um segundo teste hidrostático do vaso de pressão horizontal do conjunto de dados 04. Neste segundo teste hidrostático foram coletados sinais de emissão acústica em todo o costado do vaso de pressão. Este teste foi realizado após a instalação do vaso de pressão em sua posição de operação. Este vaso foi construído em aço carbono com 7290 mm de comprimento e 2800 mm de diâmetro, com espessura de aproximadamente 240 mm. A pressão normal de trabalho estava estipulada para 300 kgf/cm². Na tabela V.31 são apresentados por canal (sensor) instalado no equipamento do conjunto de dados 06: os valores de *Severity index*; o somatório por parâmetro dos sinais de emissão acústica; a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o parâmetro *Severity index* (equação V.1); e a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica (equação V.3), para o teste hidrostático realizado. Durante o teste hidrostático não foi possível identificar visualmente qualquer trincamento ou a

presença de descontinuidades e vazamentos que acarretassem em perda da condição de estanqueidade do vaso de pressão.

Ao compararmos os dois resultados do critério MONPAC primeiramente devemos considerar que os sensores não foram posicionados nas mesmas posições, ou seja, não é possível realizar a comparação canal por canal. Porém, pode-se notar que houve um aumento da atividade acústica que está representada por valores de *Severity index* maiores que o conjunto 04 além de termos valores de *Severity index* para todos os canais de emissão acústica instalados. Em relação a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatório dos parâmetros de emissão acústica a mesma tendência de incremento acontece pois todos os valores são superiores ao valor da constante da equação V.3, ou seja, $10,76 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

Tabela V.31 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o conjunto de dados 06 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

canal	Equação V.1		Equação V.3						
	<i>Severity index</i>	$K_{I(EA)}$	Tempo de subida	Contagem	Energia	Duração	Amplitude	Frequência média	$K_{I(EA)}$
1	69,8	25,2	28	31	124	1832	519	5,33	12,1
2	69,7	25,2	2558	727	1916	10489	11002	58,71	22,6
3	58,1	25,2	1986	1072	2021	15710	12566	90,51	32,6
4	33,9	25,1	149	6	24	149	124	1,53	11,8
5	36,5	25,1	508	148	564	1432	3714	32,35	20,3
6	87,5	25,3	235	45	142	475	812	8,83	14,3
7	40,9	25,1	764	141	226	3380	821	3,44	13,1
8	80,3	25,2	5385	1636	3053	21161	18030	97,28	35,0
9	49,0	25,1	1103	363	924	4795	4581	25,12	16,2
10	33,4	25,1	86	10	24	436	86	0,19	10,9
11	38,9	25,1	1060	260	277	4059	887	3,69	14,2
12	65,0	25,2	94	29	124	168	708	8,12	13,6
13	78,2	25,2	584	473	676	13425	1647	10,81	13,1
14	78,6	25,2	1132	745	724	19633	934	5,16	13,4

No gráfico da figura 5.53 apresentam-se os valores de $K_{I(EA)}$ calculados segundo as equações V.1 e V.3. No eixo horizontal são apresentados os resultados utilizando a equação

V.1 (*Severity index*) e no eixo vertical os resultados utilizando a equação V.3 (somatório dos parâmetros). Cada ponto no gráfico representa um canal de coleta de dados de emissão acústica instalado no vaso de pressão testado. A reta apresentada no gráfico representa a situação onde os valores calculados pelas duas equações seriam idênticos, ou seja, serve apenas como referência para analisar os resultados fornecidos pelas duas equações. Os valores do critério MONPAC não apresentaram grande variação entre os canais e em função disto a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando a equação V.1 posiciona todos estes sinais em uma linha praticamente vertical no gráfico da figura 5.53. O somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica apresentou variação entre os parâmetros e entre os canais e produziu um maior espalhamento destes valores para a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando a equação V.3. Neste conjunto de dados a maior parte das estimativas de $K_{I(EA)}$ utilizando os valores do critério MONPAC apresentou valor superior a estimativa utilizando o somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica. Nenhuma das estimativas, utilizando as equações V.1 e V.3, foram superiores ao valor da estimativa para a falha catastrófica ocorrida no corpo de proba Tubo 03, ou seja $96,4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$.

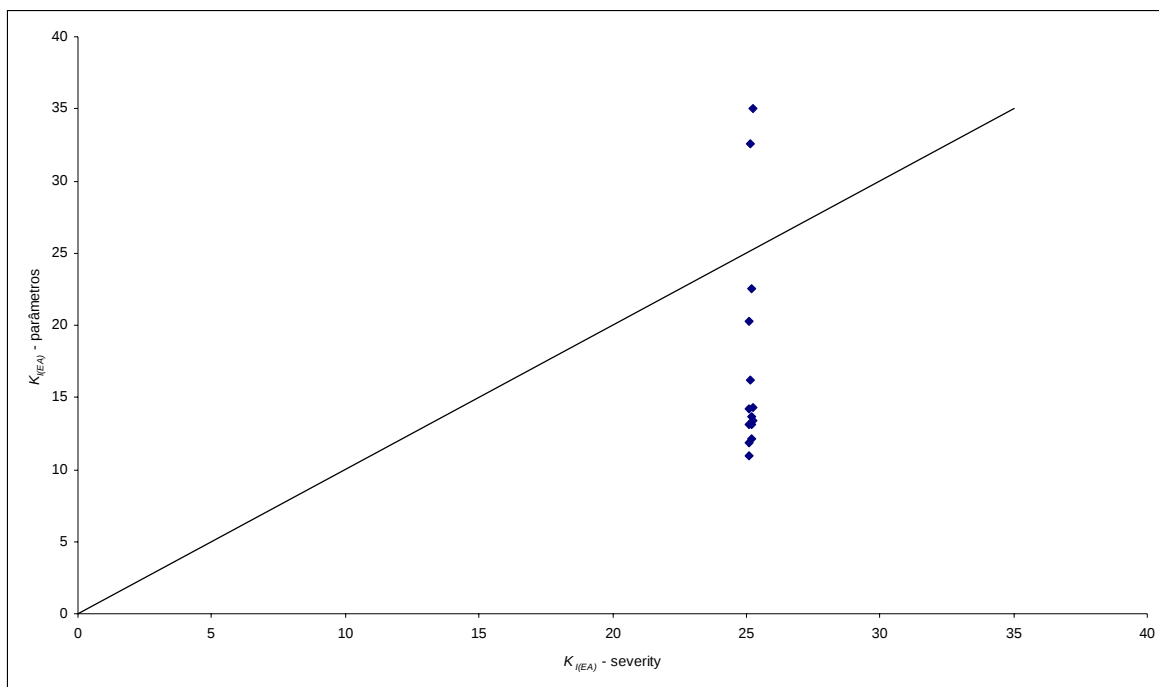


Fig. 5.53 – Gráfico de correlação entre os valores estimados de $K_{I(EA)}$, no conjunto de dados 06, pelas equações V.1 e V.3. Valores de K_I em $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

V.5.7 Conjunto de dados 07

O conjunto de dados 07 foi gerado durante o teste hidrostático do vaso de pressão vertical para armazenamento de hidrogênio. Este vaso foi construído em aço carbono especificação ASTM A 515 Grau 70, com 11375 mm de comprimento, 2089 mm de diâmetro e 44,5 mm de espessura. A pressão normal de trabalho estava estipulada para 36 kgf/cm² e o teste hidrostático foi conduzido até a máxima pressão de 54 kgf/cm². Na tabela V.32 são apresentados por canal (sensor) instalado no equipamento do conjunto de dados 07: os valores de *Severity index*; o somatório por parâmetros dos sinais de emissão acústica; a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o parâmetro *Severity index* (equação V.1); e a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica (equação V.3), para o teste hidrostático realizado. Este teste hidrostático foi realizado em uma refinaria de petróleo e não foi acompanhado pelo autor. Ensaio não destrutivo foram realizados nas regiões classificadas como “E” pelo relatório do ensaio de emissão acústica e indicaram a presença de uma descontinuidade superficial com 10 mm de comprimento e aproximadamente 2 mm de profundidade [Soares, 2003]. O carregamento com pressão interna de 54 kgf/cm² nesta descontinuidade significa a aplicação de um K_I de 9,4 MPa√m.

Tabela V.32 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o conjunto de dados 07 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

canal	Equação V.1		Equação V.3						
	Severity index	$K_{I(EA)}$	Tempo subida	Contagem	Energia	Duração	Amplitude	Frequência média	$K_{I(EA)}$
1	26,0	25,1	3644	496	478	12020	1604	9,90	24,9
2	48,1	25,1	2477	1421	662	32303	1869	2,47	13,3
3	108,0	25,3	10056	4194	1864	91241	4946	6,78	30,8
4	712,6	27,0	49951	26215	19097	1136216	27857	13,67	-1,3
5	109,6	25,3	7483	4349	1941	95479	8367	15,45	15,6
6	17,9	25,1	8086	601	744	45396	4710	2,88	25,7
7	10,2	25,0	3298	570	413	25444	2160	3,05	16,4
8	14,1	25,0	2339	187	182	12027	890	0,48	16,3
9	78,8	25,2	4418	1870	7808	33448	22435	73,64	7,6
10	51	25,1	21081	2800	2782	192430	11863	13,12	44,1
11	126,7	25,4	15638	5087	3760	143764	13053	24,82	34,6
12	66,3	25,2	6556	1093	1271	66235	3682	3,39	20,2
13	18,0	25,1	4533	5345	1645	93388	2241	6,02	16,1
14	26,8	25,1	4958	1060	744	59299	2342	1,49	17,2

A estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando as equações V.1 e V.3 apresentaram valores superiores ao calculados utilizando a formulação proposta por Anderson (descrita no capítulo 4). Deve-se ressaltar que para este conjunto de dados foram encontrados valores negativos para a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando as equações V.1 e V.3. Um dos possíveis fatores para a obtenção de valores diferentes do calculado e principalmente negativos pode estar associado a diferença de materiais com a conseqüente diferença dos valores de propriedades mecânicas. O material ASTM A 515 Grau 70 apresenta uma tensão limite de escoamento de 256 MPa e o material utilizado para o estabelecimento das correlações entre K_I e emissão acústica, API XL 60, apresenta 483 MPa de tensão limite de escoamento.

No gráfico da figura 5.54 apresentam-se os valores de $K_{I(EA)}$ calculados segundo as equações V.1 e V.3. No eixo horizontal são apresentados os resultados utilizando a equação V.1 (*Severity index*) e no eixo vertical os resultados utilizando a equação V.3 (somatório dos parâmetros). Cada ponto no gráfico representa um canal de coleta de dados de emissão

acústica instalado no vaso de pressão testado. A reta apresentada no gráfico representa a situação onde os valores calculados pelas duas equações seriam idênticos, ou seja, serve apenas como referência para analisar os resultados fornecidos pelas duas equações. Os valores do critério MONPAC não apresentaram grande variação entre os canais e em função disto a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando a equação V.1 posiciona todos estes sinais em uma linha praticamente vertical no gráfico da figura 5.54. O somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica apresentou variação entre os parâmetros e entre os canais e produziu um maior espalhamento destes valores para a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando a equação V.3. Pode-se notar uma maior dispersão para a estimativa utilizando o somatório dos parâmetros do sinal de emissão acústica quando comparada com a estimativa com os valores de *Severity index*. Para este conjunto de dados a maior parte dos valores estimados com o somatório dos parâmetros do sinal de emissão acústica apresentaram resultados inferiores aos estimados utilizando os valores de *Severity index*. Nenhuma das estimativas, utilizando as equações V.1 e V.3, foram superiores ao valor da estimativa para a falha catastrófica ocorrida no corpo de prova Tubo 03, ou seja 96,4 MPa√m., embora todas as estimativas de $K_{I(EA)}$ (excetuando-se o resultado negativo para o canal 4 e o canal 9, utilizando a equação V.3) foram superiores ao valor calculado para a descontinuidade detectada após a realização do teste hidrostático, o que confere a esta estimativa um resultado extremamente conservador.

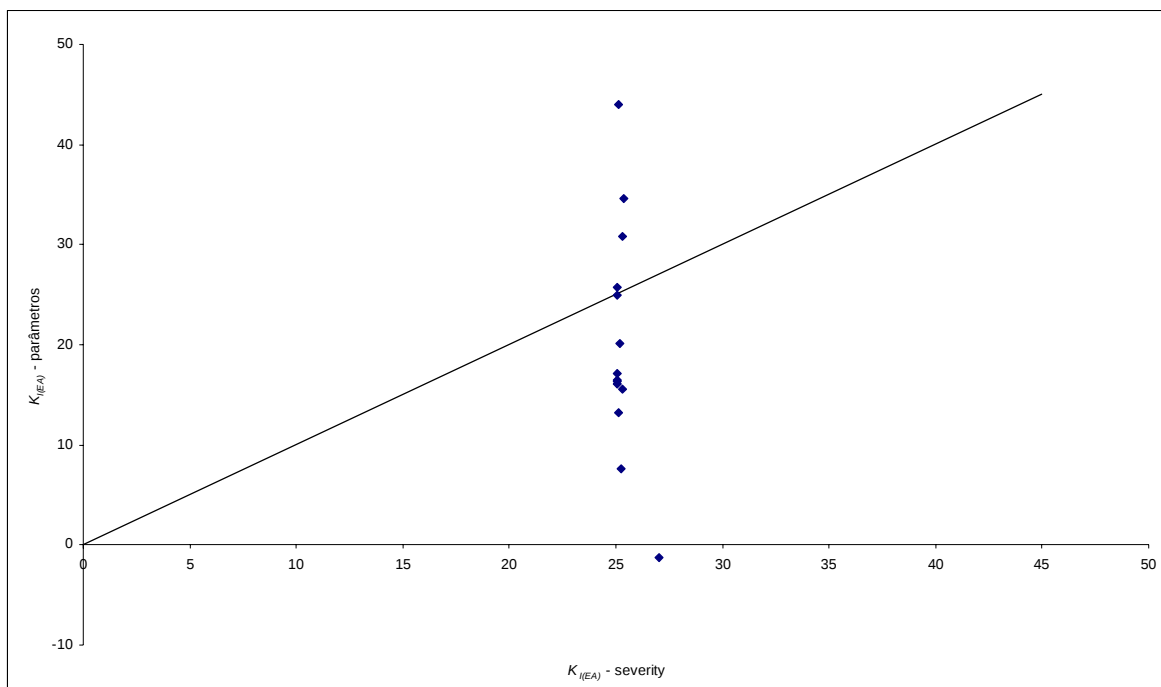


Fig. 5.54 – Gráfico de correlação entre os valores estimados de $K_{I(EA)}$, no conjunto de dados 07, pelas equações V.1 e V.3. Valores de K_I em $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

V.5.8 Conjunto de dados 08

O conjunto de dados 08 foi gerado durante o teste hidrostático de tubulão de vapor. Este equipamento foi construído em aço carbono especificação ASTM A 516 Grau 60, com 10868 mm de comprimento, 1829 mm de diâmetro e 111 mm de espessura. A pressão normal de trabalho estava estipulada para 94 kgf/cm^2 e o teste hidrostático foi conduzido até a máxima pressão de 105 kgf/cm^2 . Na tabela V.33 são apresentados por canal (sensor) instalado no equipamento do conjunto de dados 08: os valores de *Severity index*; o somatório por parâmetros de emissão acústica; a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o parâmetro *Severity index* (equação V.1); e a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatório dos parâmetros de emissão acústica (equação V.3), para o teste hidrostático realizado. Este teste hidrostático foi realizado em uma refinaria de petróleo e não foi acompanhado pelo autor. Ensaio não destrutivo foram realizados nas regiões classificadas como “E” pelo relatório do ensaio de emissão acústica e indicaram a presença das seguintes descontinuidades internas conforme descrito na tabela V.34 [Soares, 2003].

Tabela V.33 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o conjunto de dados 08 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

canal	Equação V.1		Equação V.3						
	Severity index	$K_{I(EA)}$	Tempo de subida	Contagem	Energia	Duração	Amplitude	Frequência média	$K_{I(EA)}$
1	-	25,0	269	12	29	301	46	0,04	11,7
2	65,1	25,2	2170	204	733	6537	912	0,69	16,8
3	69,5	25,2	1852	326	717	8355	592	0,50	16,1
4	79,7	25,2	1593	164	482	6105	405	0,27	15,6
5	223,1	25,6	12549	2751	5862	80057	5978	5,26	40,1
6	221,1	25,6	6402	793	2277	35767	1831	0,69	28,0
7	362,9	26,0	10306	2248	4406	58785	2640	1,66	40,4
8	426,4	26,2	2119	787	1603	23003	1001	0,63	14,7
9	-	25,0	184	3	19	184	45	0,02	11,4
10	700,1	27,0	22781	15743	28582	316472	16207	12,62	41,9
11	-	25,0	-	-	-	-	-	-	10,8
12	788,9	27,2	30080	5563	13934	204869	9445	4,96	87,6
13	81,0	25,2	678	100	136	1003	490	2,51	13,5
14	-	25,0	1001	756	265	2207	257	2,15	15,4

Tabela V.34 – Descontinuidades internas detectadas no equipamento do conjunto de dados 08 após a realização de ensaios não destrutivos e valores de K_I aplicado, calculado pela equação IV.1, nas descontinuidades para o carregamento com pressão interna de 105 kgf/cm².

Profundidade (mm)	Comprimento (mm)	K_I (MPa√m)
3,8	60,5	10,1
2	11	6,5
3,2	20	8,5
2	60	7,5
2	210	7,6
3,9	280	10,6
2	45	7,6

A estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando as equações V.1 e V.3 apresentaram valores superiores ao calculados utilizando a formulação proposta por Anderson (descrita no capítulo 4). Deve-se ressaltar que para este conjunto de dados os valores estimados com as equações V.1 e V.3 foram até vinte vezes superiores aos estimados pela equação IV.1. Possíveis fatores para a obtenção de valores diferentes do calculado pode estar associados:

- a diferença de materiais com a conseqüente diferença dos valores de propriedades mecânicas, o material ASTM A 516 Grau 70 apresenta uma tensão limite de escoamento de 256 MPa e o material utilizado para o estabelecimento das correlações entre K_I e emissão acústica, API XL 60, apresenta 483 MPa de tensão limite de escoamento;
- a diferença de geometria entre os corpos de prova e o equipamento real, ou seja, maiores diâmetros e comprimento, que provocam a detecção do sinal de emissão acústica em distâncias superiores as utilizadas no desenvolvimento das equações V.1 e V.3.

No gráfico da figura 5.55 apresentam-se os valores de $K_{I(EA)}$ calculados segundo as equações V.1 e V.3. No eixo horizontal são apresentados os resultados utilizando a equação V.1 (*Severity index*) e no eixo vertical os resultados utilizando a equação V.3 (somatório dos parâmetros). Cada ponto no gráfico representa um canal de coleta de dados de emissão acústica instalado no vaso de pressão testado. A reta apresentada no gráfico representa a situação onde os valores calculados pelas duas equações seriam idênticos, ou seja, serve apenas como referência para analisar os resultados fornecidos pelas duas equações. Os valores do critério MONPAC apresentaram variação de uma ordem de grandeza, porém esta variação propicia uma variação de apenas 2 MPa $\sqrt{m}$ no resultado da estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando a equação V.1, e em função disto estes resultados são posicionados praticamente em uma mesma vertical no gráfico da figura 5.55. O somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica apresentou variação entre os parâmetros e entre os canais e produziu um maior espalhamento destes valores para a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando a equação V.3. Pode-se notar uma maior dispersão para a estimativa utilizando o somatório dos parâmetros do sinal de emissão acústica quando comparada com a estimativa

com os valores de *Severity index*. Para este conjunto de dados, praticamente não houve diferença entre quantidade de valores superestimados ou sub-estimados, utilizando o somatório dos parâmetros do sinal de emissão acústica ou os valores de *Severity index*. Nenhuma das estimativas, utilizando as equações V.1 e V.3, foram superiores ao valor da estimativa para a falha catastrófica ocorrida no corpos de prova Tubo 03, ou seja 96,4 MPa√m, embora todas as estimativas de $K_{I(EA)}$, utilizando as equações V.1 e V.3, tenham fornecido valores superiores ao valor calculado para a descontinuidade detectada após a realização do teste hidrostático (utilizando a equação IV.1), o que confere a esta estimativa um resultado extremamente conservador.

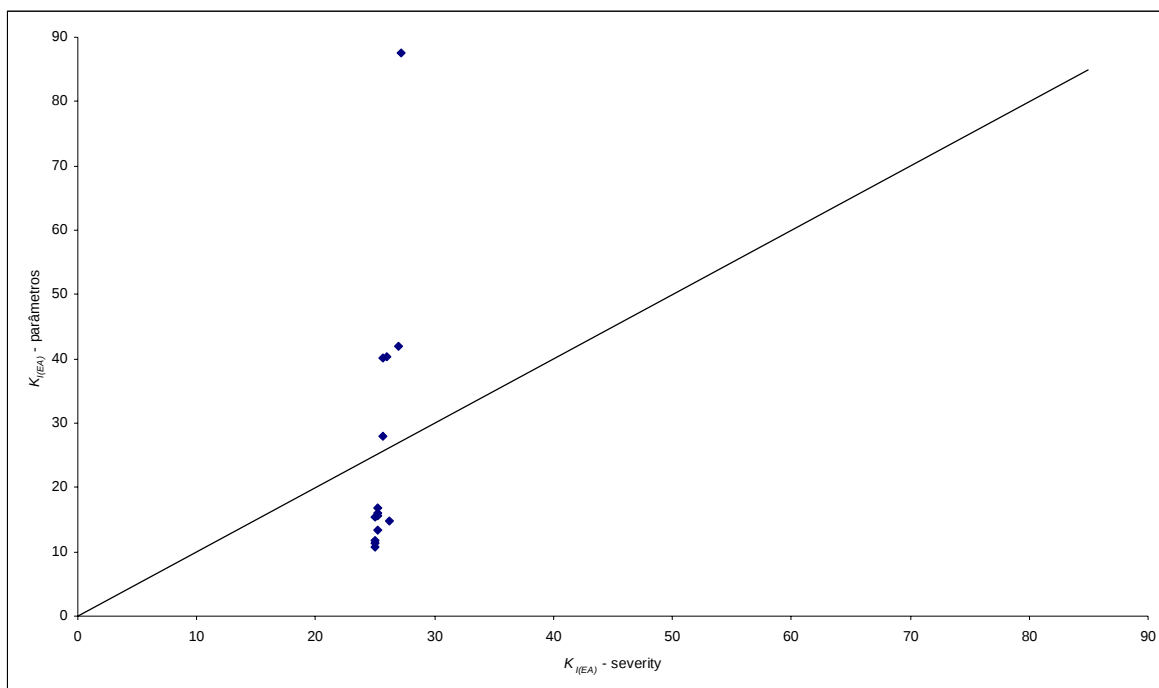


Fig. 5.55 – Gráfico de correlação entre os valores estimados de $K_{I(EA)}$, no conjunto de dados 08, pelas equações V.1 e V.3. Valores de K_I em MPa√m.

V.5.9 Conjunto de dados 09

O conjunto de dados 09 foi gerado durante o teste hidrostático de um vaso de pressão. Este equipamento foi construído em aço carbono especificação ASTM A 204 Grau A, com 15309 mm de comprimento, 2489 mm de diâmetro e 12 mm de espessura. A pressão

normal de trabalho estava estipulada para 17,5 kgf/cm² e a temperatura de operação estimada em 997°C. O teste hidrostático foi conduzido até a máxima pressão de 18,6 kgf/cm². Na tabela V.35 são apresentados por canal (sensor) instalado no equipamento do conjunto de dados 09: os valores de *Severity index*; o somatório por parâmetros de emissão acústica; a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o parâmetro *Severity index* (equação V.1); e a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando o somatório dos parâmetros de emissão acústica (equação V.3), para o teste hidrostático realizado. Este teste hidrostático foi realizado em uma refinaria de petróleo e não foi acompanhado pelo autor. Ensaios não destrutivos foram realizados nas regiões classificadas como “D” pelo relatório do ensaio de emissão acústica e indicaram a presença das seguintes descontinuidades internas conforme descrito na tabela V.36 [Soares, 2003].

Tabela V.35 – Resultados de emissão acústica e estimativa de $K_{I(EA)}$ para o conjunto de dados 09 utilizando as equações V.1 e V.3. $K_{I(EA)}$ em MPa√m.

canal	Equação V.1		Equação V.3						
	<i>Severity index</i>	$K_{I(EA)}$	Tempo de subida	Contagem	Energia	Duração	Amplitude	Frequência média	$K_{I(EA)}$
28	440,3	26,2	337503	38673	145196	669362	333449	407,62	669,2
29	125,1	25,4	3350	1160	1404	11730	4230	10,37	12,3
30	-	25,0	-	-	-	-	-	-	10,8
31	13,8	25,0	567	128	100	1245	320	0,59	12,1
32	107,7	25,3	14497	3053	2767	42684	7053	10,34	46,1
33	115,6	25,3	30559	2664	4494	108266	13129	14,23	84,4
34	9,0	25,0	607	1147	1732	8238	11272	30,9	-16,8
35	-	25,0	-	-	-	-	-	-	10,8
36	-	25,0	-	-	-	-	-	-	10,8
37	164,9	25,5	419321	67182	67484	1714911	134345	98,51	1131,6

Tabela V.36 – Descontinuidades internas detectadas no equipamento do conjunto de dados 09 após a realização de ensaios não destrutivos e valores de K_I aplicado, calculado segundo a equação IV.1, nas descontinuidades para o carregamento com pressão interna de 18,6 kgf/cm².

Profundidade (mm)	Comprimento (mm)	K_I (MPa√m)
5,0	2,0	3,4
2,0	11	14,6
3,2	20	18,9
2	60	16,7
2	210	16,9
3,9	280	23,5
2	45	16,9

A estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando as equações V.1 e V.3 apresentou valores superiores ao calculados utilizando a formulação proposta por Anderson (equação IV.1 descrita no capítulo 4). Deve-se ressaltar que para este conjunto de dados os valores estimados pelas equações V.1 e V.3 foram mais de duas e mais de 60 vezes, respectivamente, aos calculados pela equação IV.1. Possíveis fatores para a obtenção de valores diferentes do calculado pode estar associados:

- a diferença de materiais com a conseqüente diferença dos valores de propriedades mecânicas, o material ASTM A 204 Grau A apresenta uma tensão limite de escoamento de 255 MPa e o material utilizado para o estabelecimento das correlações entre $K_{I(EA)}$ e emissão acústica, API XL 60, apresenta 483 MPa de tensão limite de escoamento;
- a diferença de geometria entre os corpos de prova e o equipamento real, ou seja, maiores diâmetros e comprimento, que provocam a detecção do sinal de emissão acústica em distâncias superiores as utilizadas no desenvolvimento das equações V.1 e V.3.
- o equipamento do conjunto de dados 09 apresenta uma superfície cônica que também deve afetar a propagação dos sinais de emissão acústica e conseqüente

filtro utilizando a metodologia do “primeiro sinal” além de fornecer diferente metodologia de cálculo para o valor de K_I .

No gráfico da figura 5.56 apresentam-se os valores de $K_{I(EA)}$ calculados segundo as equações V.1 e V.3. No eixo horizontal são apresentados os resultados utilizando a equação V.1 (*Severity index*) e no eixo vertical os resultados utilizando a equação V.3 (somatório dos parâmetros). Cada ponto no gráfico representa um canal de coleta de dados de emissão acústica instalado no vaso de pressão testado. A reta apresentada no gráfico representa a situação onde os valores calculados pelas duas equações seriam idênticos, ou seja, serve apenas como referência para analisar os resultados fornecidos pelas duas equações. Os valores do critério MONPAC apresentaram variação de uma ordem de grandeza, porém esta variação propicia uma variação de apenas 2 MPa√m no resultado da estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando a equação V.1, e em função disto estes resultados são posicionados praticamente em uma mesma vertical no gráfico da figura 5.56. O somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica apresentou variação entre os parâmetros e entre os canais e produziu um maior espalhamento destes valores para a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando a equação V.3. Pode-se notar uma maior dispersão para a estimativa utilizando o somatório dos parâmetros do sinal de emissão acústica quando comparada com a estimativa com os valores de *Severity index*. Para este conjunto de dados, praticamente não houve diferença entre quantidade de valores superestimados ou sub-estimados, utilizando o somatório dos parâmetros do sinal de emissão acústica ou os valores de *Severity index*. Nenhuma das estimativas, utilizando as equações V.1 e V.3, foram superiores ao valor da estimativa para a falha catastrófica ocorrida no corpo de prova Tubo 03, ou seja 96,4 MPa√m, embora praticamente todas as estimativas de $K_{I(EA)}$, utilizando as equações V.1 e V.3, tenham fornecido valores superiores ao valor calculado para as descontinuidades detectadas após a realização do teste hidrostático (utilizando a equação IV.1), o que confere a esta estimativa um resultado extremamente conservador.

Deve ser ressaltado que em função do enorme espalhamento de resultados obtidos com este conjunto de dados e em função das considerações acima descritas (geometria, forma e propriedades mecânica), este conjunto de dados não pode ser considerado válido para as

análises efetuadas, sendo considerado apenas para enfatizar a necessidade de contínuo desenvolvimento das correlações envolvendo sinais de emissão acústica e parâmetros de mecânica da fratura.

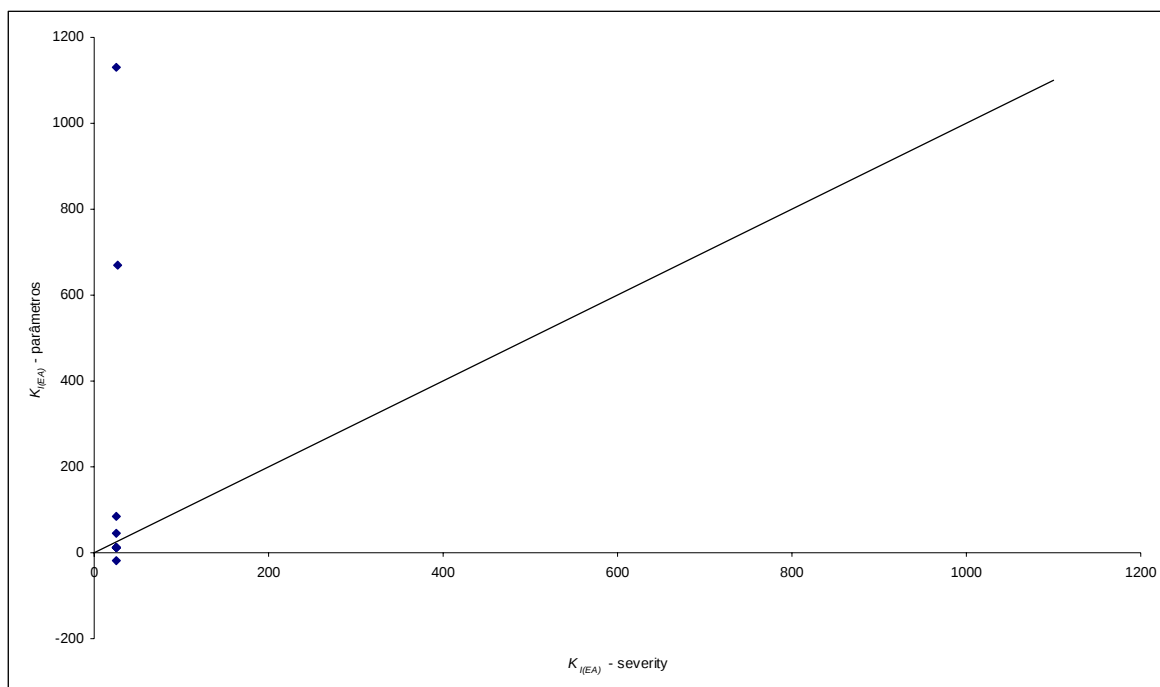


Fig. 5.56 – Gráfico de correlação entre os valores estimados de $K_{I(EA)}$, no conjunto de dados 09, pelas equações V.1 e V.3. Valores de K_I em $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

V.6 Considerações finais

A taxa de pressurização empregada nos testes hidrostáticos foi semelhante entre os testes, aproximadamente 1 bar/minuto, e proporcionou a geração de sinais de emissão acústica em quantidade suficiente para a realização do estudo proposto.

As descontinuidades que apresentaram propagação foram carregadas com valores de tensão de membrana superiores aos valores da tensão de colapso calculadas utilizando o fator de Folias. Algumas descontinuidades carregadas com tensão de membrana superior a tensão de colapso não apresentaram propagação. Este comportamento evidencia a necessidade de acoplar métodos de monitoração não destrutiva durante o carregamento

hidrostático de equipamentos do tipo de vaso de pressão que contenham descontinuidades, similares aos corpos de prova utilizados neste estudo, pois, a simples utilização das equações propostas para o cálculo da tensão de colapso pode induzir a conclusões falsas sobre a integridade do equipamento ensaiado.

Os dados brutos de emissão acústica coletados durante os testes hidrostáticos possibilitam a análise qualitativa dos testes.

Quando ocorreu propagação de descontinuidades, detectada pela técnica de ultra-som *ToFD*, os valores do parâmetro de emissão acústica tempo de subida foram sempre inferiores a 760 μ s. Os maiores valores de tempo de subida foram detectados no corpo de prova que apresentou os menores valores de K_I , em função disto pode-se supor a existência de uma relação inversamente proporcional entre o tempo de subida do sinal de emissão acústica e o valor de K_I . Para o parâmetro contagem, os valores máximos dos sinais nos corpos de prova com e sem propagação foram respectivamente 65000 μ s e 7000 μ s. Para o parâmetro energia, os valores máximos dos sinais nos corpos de prova com e sem propagação foram respectivamente 65000 e 5000. Para o parâmetro duração, os valores máximos dos sinais detectados nos corpos de prova com e sem propagação foram respectivamente 600000 μ s e 80000 μ s. Para o parâmetro amplitude, a diferença entre os valores máximos nos corpos de prova com e sem propagação foi aproximadamente 15 dB.

Durante a realização dos testes hidrostáticos a análise dos dados de emissão acústica segundo o critério MONPAC revelou que o parâmetro *Historic Index* não apresenta variação durante a realização dos ensaios. O parâmetro *Historic Index* representa a quantidade de sinais de emissão acústica coletada em um intervalo definido de tempo e como a taxa de aplicação do carregamento por pressão interna nos testes hidrostáticos foi *quasi* linear durante os ensaios pode-se supor que a invariabilidade do parâmetro *Historic Index* está associada a invariabilidade da taxa de carregamento.

O parâmetro *Severity Index* representa a intensidade dos sinais de emissão acústica coletada em um intervalo definido de tempo e em função disto acredita-se que este

parâmetro pode estar relacionado com a criticidade das descontinuidades, conforme demonstrado pelo autor em trabalhos anteriores [Soares, 2004].

Os ensaios hidrostáticos realizados permitiram a coleta de uma grande quantidade de sinais. Para promover uma redução da quantidade de sinais utilizou-se a metodologia “primeiro sinal”, descrita no item V.1.1. A redução de dados obtida com esta metodologia proporcionou uma maior focalização das análises e a obtenção das equações estabelecidas.

A pequena quantidade de sinais localizados nas regiões das descontinuidades inviabilizou o estabelecimento de correlações entre Mecânica da Fratura e os sinais localizados (denominados de eventos pela terminologia de emissão acústica) de emissão acústica.

Os testes hidrostáticos realizados permitiram a coleta de sinais de emissão acústica que ao serem sincronizados com os dados de pressão e medidas de propagação das descontinuidades com a técnica ultra-sônica *ToFD* permitiram a identificação da alteração dos valores dos sinais de emissão acústica quando associados a propagação de descontinuidades. A alteração dos valores dos sinais corroborou o conceito estabelecido industrialmente de que existe uma relação entre emissão acústica e criticidade de descontinuidades.

Pode-se considerar que os testes realizados permitiram o estudo, em parte, desta relação.

A aplicação das equações desenvolvidas em corpos de prova cilíndricos semelhantes a vasos de pressão com a presença de descontinuidades e sem a presença de acessórios (conexões, flanges e etc.) em vasos de pressão reais não produziu bons resultados. Esta aplicação foi realizada em vasos de pressão construídos com diferenças de materiais, geometria e dimensões. Deve-se ressaltar também que as descontinuidades existentes em alguns dos conjuntos de dados utilizados no item V.5 foram geradas em serviço e também não obedeciam ao formato semi-elíptico utilizado nos corpos de prova.

Dentre os autores citados na revisão bibliográfica, os resultados obtidos podem ser analisados em conjunto com os trabalhos desenvolvidos por:

- Camerini [Camerini, 1990], que determinou a existência de comportamento padrão e repetitivo para a propagação de trincas em aços estruturais;
- Instituto Japonês de Normalização [*opus cit* Mori, 2003], com a proposição de análise de sinais de emissão acústica baseada em agrupamento de sinais e somatório de energia e contagens;
- Ju, Jang e Kwon [Ju, 2003], que estudaram a relação entre testes de impacto e a propagação de descontinuidades em aços utilizados na construção de centrais nucleares na China;
- Chen [Chen, 2004], que coletou sinais de emissão acústica durante ensaios para determinação de propriedades de resistência a fadiga em alumínio e aço A-36;
- Soares [Soares, 2004], que analisou 210 ensaios de emissão acústica realizados em escala industrial.

Embora Camerini [Camerini, 1990] tenha trabalhado com o objetivo de detectar trincas antes do CTOD de iniciação ser atingido, os resultados deste estudo demonstraram, nos corpos de prova confeccionados, um padrão repetitivo que permitiu estabelecer as equações V.1 e V.3 com coeficientes de correlação próximos a 0,90. As dúvidas de Camerini [Camerini, 1990] em relação aos procedimentos industriais, que rejeitam sinais abaixo de 40 dB e a utilização de valores de energia como critério de análise, foram contornadas com a utilização do critério MONPAC e com o somatório dos valores dos parâmetros dos sinais de emissão acústica após a utilização da filtragem com a metodologia “primeiro sinal”. O critério MONPAC apresenta a atividade acústica em intervalos regulares de tempo e o somatório representa a atividade total durante o ensaio.

Nos resultados apresentados neste capítulo trabalhou-se com o critério MONPAC e com o somatório dos parâmetros de emissão acústica tempo de subida, contagem, energia, duração, amplitude e frequência média. A norma japonesa *JIS Z 2342-2002 Method for acoustic emission testing of pressure vessels during pressure tests and classification of test*

results [opus cit Mori, 2003] utiliza a concentração de eventos e o somatório dos valores de energia e contagens. Este somatório deve ser relacionado com o carregamento aplicado. A metodologia empregada neste estudo também relacionou o somatório dos valores dos parâmetros de emissão acústica com o carregamento aplicado, para estabelecer as equações V.1 e V.3. Na norma JIS Z 2342-2002 o resultado fornecido pelo ensaio de emissão acústica é o enquadramento das regiões ativas em classes de criticidade, enquanto que neste estudo pode-se estimar o valor de $K_{I(EA)}$ aplicado no equipamento em teste.

Ju, Jang e Kwon [Ju, 2003] realizaram estudo com resultados semelhantes quando estudaram a tenacidade à fratura de aços utilizando técnicas de impacto e propagação de descontinuidades com a utilização da técnica de emissão acústica. Ju, Jang e Kwon [Ju, 2003] trabalharam com o parâmetro, de emissão acústica, energia e observaram picos em momentos característicos do teste. Nos testes realizados neste estudo o valor máximo de energia foi aproximadamente 13 vezes quando corpos de prova com e sem propagação de descontinuidades são comparados.

Chen [Chen, 2004] coletou sinais de emissão acústica em corpos de prova do tipo CT, em alumínio e aço A36, para determinação de propriedades de resistência à fadiga. Da mesma forma que neste estudo, Chen [Chen, 2004] buscou uma relação com o parâmetro K_I de mecânica da fratura. Para os corpos de prova em aço Chen não obteve sinais em quantidade suficiente para o estabelecimento de relação entre emissão acústica e mecânica da fratura, tal fato pode ser creditado a geometria do corpo de prova, que não permite a instalação de diversos sensores e ao tempo de ensaio. Os testes hidrostáticos realizados (descritos anteriormente neste capítulo) duravam algumas horas. Deve ser ressaltado que Chen [Chen, 2004] observou uma proporcionalidade entre incremento do comprimento da trinca e contagens, também observada neste estudo quando o somatório dos valores dos sinais de emissão acústica foi empregado.

Com os testes realizados comprovou-se qualitativamente as conclusões propostas pelo autor em trabalho anterior [Soares, 2004] de que: a) existe uma relação entre o critério MONPAC e a presença de descontinuidades; b) não existe uma separação clara entre as

classes do critério MONPAC, quando comparado aos resultados de mecânica da fratura; e, c) existe uma correlação *quasi* linear entre emissão acústica e mecânica da fratura (K_I) para as inspeções realizadas em vasos de pressão.

O objetivo deste trabalho consistia em pesquisar a existência de relações entre a criticidade de descontinuidades e os sinais de emissão acústica gerados por esta mesma descontinuidade quando exposta a um dado carregamento. Com o procedimento experimental utilizado foi possível estimar a criticidade das descontinuidades inseridas nos corpos de prova. Esta estimativa foi obtida utilizando a metodologia usual de teste hidrostático para dutos acrescida da coleta de sinais de emissão acústica durante o incremento de pressão. Após o teste hidrostático foi realizada uma filtragem temporal dos dados de emissão acústica utilizando o filtro denominado “primeiro sinal” (*first hit*, na maioria dos *softwares* de controle de aquisição de dados de emissão acústica) e, em seguida, duas metodologias de análise dos sinais de emissão acústica foram utilizadas. A primeira metodologia consistiu no uso do método mais utilizado industrialmente para análise de ensaios de emissão acústica, o critério MONPAC. A segunda metodologia, original para este tipo de estudo, utilizou o somatório por parâmetros dos sinais de emissão acústica. As duas metodologias foram sincronizadas com as medições de propagação da profundidade das descontinuidades, realizada pelo método ultra-sônico ToFD, e com a monitoração da pressão interna aplicada. A medição da profundidade e a pressão interna foram utilizadas para o cálculo do parâmetro de mecânica da fratura K_I . Este parâmetro foi correlacionado com os resultados de emissão acústica nas duas metodologias de análise para o desenvolvimento de equações que pudessem estimar a criticidade das descontinuidades, ou seja, um valor de K_I estimado por emissão acústica, chamado neste estudo de $K_{I(EA)}$. As duas equações obtidas, V.1 e V.3, apresentaram coeficientes de correlação próximos a 0,90 e em função disto podem ser utilizadas para a estimativa de $K_{I(EA)}$ nas mesmas condições empregadas no trabalho experimental.

As duas equações propostas fornecem resultados diferentes quando comparadas entre si e apresentam diferenças na praticidade de sua aplicação:

- a equação V.1 utiliza valores já fornecidos pelos *softwares* de aquisição e análise de ensaios de emissão acústica, ou seja, o parâmetro *Severity index* do critério MONPAC, e em função disto é de utilização mais direta;
- a equação V.3 utiliza o somatório por parâmetros dos sinais de emissão acústica, que pode ser obtido de forma gráfica nos *softwares* de aquisição e análise ou em planilhas eletrônicas após a exportação dos dados, e em função disto introduz mais uma etapa na análise dos dados.

A equação V.3 forneceu resultados mais coerentes com as observações feitas nos corpos de prova deste estudo e em função disto deve-se buscar a sua utilização em outros testes para o aprimoramento e correções necessárias para ser transformada em um critério de análise de sinais de emissão acústica coletados durante a execução de testes hidrostáticos em dutos.

Em função do exposto no parágrafo anterior considera-se que o trabalho desenvolvido atendeu ao objetivo traçado, pois, o procedimento experimental empregado permitiu a estimativa da criticidade das descontinuidades presentes nos corpos de prova.

VI. CONCLUSÕES

As análises efetuadas no capítulo anterior permitem estabelecer as seguintes conclusões:

- O formato utilizado para os corpos de prova, segmento de duto com descontinuidades inseridas artificialmente, permite a geração de sinais de emissão acústica;
- As dimensões das descontinuidades inseridas artificialmente propiciaram testes hidrostáticos com e sem propagação das descontinuidades, gerando conjuntos de dados apropriados para a análise;
- Os carregamentos realizados com pressão hidrostática interna nos corpos de prova permitiram a obtenção de uma extensa gama de valores para o parâmetro de mecânica da fratura K_I ;
- A propagação de descontinuidades pode ser identificada pelo ensaio de emissão acústica;
- Os valores dos parâmetros do sinal de emissão acústica permitem a identificação da propagação de descontinuidades;
- Os sinais detectados de emissão acústica são o resultado da propagação na estrutura em teste dos sinais gerados nas descontinuidades e, em função disto, são afetados pelo material, forma, carregamento e presença de acessórios ou obstáculos;
- O critério mais utilizado industrialmente para avaliar equipamentos carregados com pressão interna utilizando a técnica de emissão acústica, MONPAC, classifica qualitativamente as estruturas testadas em relação a criticidade de regiões com a presença de descontinuidades;
- Os valores obtidos para o parâmetro *Severity index*, fornecido pelo critério MONPAC, quando correlacionados com os valores K_I aplicados durante a execução dos testes hidrostáticos dos corpos de prova apresentaram uma relação *quasi* linear que permite a estimativa de $K_{I(EA)}$ em função deste parâmetro;
- O somatório dos parâmetros dos sinais de emissão acústica após filtragem com o método de primeiro sinal quando correlacionados com os valores de K_I aplicados durante a execução dos testes hidrostáticos dos corpos de prova apresentaram uma

relação que permite a estimativa de $K_{I(EA)}$ em função dos parâmetros do sinal de emissão acústica;

- Para os corpos de prova utilizados, cilíndricos com descontinuidades inseridas e sem a presença de acessórios, foram estabelecidas duas equações que permitem a estimativa dos valores de $K_{I(EA)}$ em função dos valores de *Severity index* oriundo do critério MONPAC e do somatório dos valores dos parâmetros dos sinais de emissão acústica. Os valores estimados com estas equações foram denominados $K_{I(EA)}$;
- A extrapolação destas equações para outros materiais e outras formas não apresentou os mesmos resultados que os obtidos nos corpos de prova utilizados neste estudo;
- É possível estimar os valores de K_I em dutos construídos em aço API XL 60.

Como conclusão final propõe-se a utilização da equação V.3 para a estimativa de $K_{I(EA)}$ utilizando sinais de emissão acústica coletados durante a realização de testes hidrostáticos em dutos pressurizados internamente e a comparação do valor fornecido por esta equação com os valores tabelados para o material em teste como critério adicional na análise de resultados de testes hidrostáticos.

VII. RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Os materiais e metodologias empregados, descritos no capítulo IV, permitiram a obtenção dos resultados descritos no capítulo V e as conclusões descritas no capítulo VI, porém, ao final deste estudo, temas para pesquisa e desenvolvimento na área de estimativa de parâmetros de mecânica da fratura utilizando sinais de emissão acústica podem ser propostos. Dentre outros podem ser citados:

- Realizar testes com o mesmo material alterando espessura, profundidade de descontinuidades, razões de aspecto e diâmetro, para aumentar a quantidade de dados e aprimorar as equações formuladas;
- Realizar testes com diversos materiais nas mesmas condições deste estudo para pesquisar se as equações obtidas podem ser extrapoladas para outros materiais;
- Pesquisar uma propriedade acústica que permita correlacionar sinais de emissão acústica de diferentes materiais;
- Pesquisar a relação entre a atenuação do sinal de emissão acústica e os valores dos diversos parâmetros do sinal de emissão acústica;
- Desenvolver corpos de prova em escala reduzida que reproduzam as condições de carregamento interno com descontinuidades superficiais externas do tipo trinca;
- Estudar o efeito da mudança de forma dos objetos em teste nos valores dos sinais de emissão acústica e nos valores do critério MONPAC;
- Estudar o efeito da presença de acessórios, tais como flanges e bocais, nos valores dos sinais de emissão acústica e nos valores do critério MONPAC;
- Coletar dados de campo de equipamentos reais que tenham sido inspecionados por emissão acústica e por ensaios não destrutivos complementares, e que contenham o dimensionamento completo de descontinuidades para proposição de um índice de correção para as equações propostas.

Referencias bibliográficas

ABNT, NBR 15181 - Ensaios não destrutivos - Emissão Acústica - Terminologia, **Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT**, São Paulo, Brasil, 2004.

ABNT, NBR 15194 - Emissão acústica em vasos de pressão metálicos durante o ensaio de pressão - Procedimento, **Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT**, São Paulo, Brasil, 2005.

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

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

Anderson, T. L., *Fracture mechanics – Fundamentals and applications – second edition*, **CRC Press**, Estados Unidos da América, 1995.

Anderson, Ted L. e Osage, David A., *API 579: a comprehensive fitness-for-service guide*, **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, vol. 77, pp 953-963. Estados Unidos da América, 2000.

API, *API Specification 5L*, **American Petroleum Institute**, ed. 43, Estados Unidos da América, 2004

ASTM, ASTM E 1820 - *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*, **American Society for Testing Materials - ASTM**, Estados Unidos da América, 2001.

Bayray, Mulu, *Investigation of acoustic emission waveforms on a pressure vessel*, **Journal of Acoustic Emission**, vol. 19, pp 241-257, Estados Unidos da América, 2001

Beattie, A.G., *Acoustic emission monitoring of a high pressure test of a steel reactor containment vessel model*, **Journal of Acoustic Emission**, vol. 21, pp 95-111, Estados Unidos da América, 2003

Blackburn, P. R., *AE Re-testing of cylinders for transportation of compressed gases*, **Materials Evaluation**, vol. 46, nº 2, Estados Unidos da América, 1988.

Camerini, Cláudio Soligo, *Relação entre emissão acústica e CTOD para um aço estrutural*, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, Brasil, 1990

Carneval, Ricardo de Oliveira, *et alli*, *Inspeção não-destrutiva em vaso de pressão V-2058 (REPLAN) retirado de operação pela presença de danos por hidrogênio – 13º Relatório parcial do projeto 020586, RT 650-17509, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello, PETROBRAS, Rio de Janeiro, Brasil, 1996.*

Carneval, Ricardo de Oliveira e Soares, Sergio Damasceno, *Inspeção com a técnica time of flight diffraction (ToFD) para determinação de altura de descontinuidade na esfera ES 5901 da TRANSPETRO/Brasília, CT-002/05, documento interno, PETROBRAS/CENPES, Brasil, 2005.*

Chelladurai, T., Sankaranarayanan, A. S., e Purushothaman, K. K., *Advances in structural integrity evaluation and residual strength prediction of pressure vessels using acoustic emission technique*, **Proceedings of the 15th World Conference for Non Destructive Testing**, Roma, Itália, 2000.

Chen, Hung-Liang (Roger) e Choi, Jeong-Hoon, *Acoustic emission study of fatigue cracks in materials used for AVLB*, **Journal of Acoustic Emission**, vol. 23, n. 4, pp 133-151, Estados Unidos da América, 2004.

Cole, Phillip e Gautrey, Stephen, *Experience with acoustic emission monitoring of new vessels during initial proof test*, **Journal of Acoustic Emission**, vol. 22, pp 22-29, Estados Unidos da América, 2004.

Costa Neto, Pedro Luiz de Oliveira, **Estatística**, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, Brasil, 1977.

Evangelista, G. E. e Santos, J. V., *Inspeção em operação de tubulações da FAFEN-LRJ através de técnicas convencionais e não convencionais de END*, 5ª **COTEQ**, ABENDE, São Paulo, Brasil, 2001.

Feres Filho, Pedro, *Detecção prematura de degradação de equipamentos através da técnica de emissão acústica*, **XV Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos**, pp 199-203, ABENDE, São Paulo, Brasil, 1996.

Feres Filho, P. *et alli*, *Avaliação da criticidade de defeitos considerando o efeito da temperatura de operação*, 5ª **COTEQ**, ABENDE, São Paulo, Brasil, 2001.

Ficha de Campo Emissão Acústica – Rel. nº 7112, **Physical Acoustics South America**, São Paulo, Brasil, 2005.

Hippert Jr, Eduardo, *Investigação experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e aplicação de curvas de resistência J-Δa para previsão de colapso em dutos*, Tese, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2004

Hsu, Nelson N., Simmons, John A. e Hardy, Stephen C., *Na approach to acoustic emission signal analysis – theory and experiment*, **Materials Evaluation**, outubro 1977, pp 100–106, Estados Unidos da América, 1977.

Ju, Jang-Bog, Jang, Jae-il e Kwon, Dongil. *Evaluation of fracture toughness by small-punch testing techniques using sharp notched specimens*, **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Elsevier, v. 80, pp 221-228, Estados Unidos da América, 2003.

Krautkrämer, Josef e Krautkrämer, Herbert, *Ultrasonic Testing of Materials*, **Springer-Verlag**, Estados Unidos da América, 1977

Leggart, R. H., Muhammed, A., Smith, A. T., e Cheaitani, M. J., *Using fracture mechanics to claim exemption from PWHT – four case studies*, **TWI**, *TWI Report 679/1999*, Reino Unido, 1999.

Long, Xin, Cai, Guangjun e Svensson, Lars-Erik, *Investigation of fracture and determination of fracture toughness of modified 9Cr–1Mo steel weld metals using AE technique*, **Materials Science and Engineering**, vol A270, pp 260–266, Estados Unidos da América, 1999.

Miller, Ronnie K. e McIntire, Paul, *Nondestructive Testing Handbook - Volume Five, Acoustic Emission Testing*, **American Society for Nondestructive Testing – ASNT**, Estados Unidos da América, 1987.

Mori, Y., Shiwa, M., Nakano, M. E Iwai, K., *New concept of AE standard: JIS Z 2342-2002 “Methods for acoustic emission testing of pressure vessels during pressure tests and classification of test results”*, **Journal of Acoustic Emission**, vol. 21, pp 197-205, Estados Unidos da América, 2003.

Morofuji, K. *et alli*, *Quantitative study of acoustic emission due to leaks from water tanks*, Journal of Acoustic Emission, vol.21, pp 213-222, Estados Unidos da América, 2003.

Rosinski, S.T. e Server, W.L., *Application of the master curve in the ASME code*, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 77, pp 591-598.

Santin, Jorge Luiz, *Ultra-som técnica e aplicação*, Editora São Cristóvão, Paraná, Brasil, 2003.

Scruby, C.B., *Quantitative acoustic emission techniques*, **Segundo Encuentro Latinoamericano de Emisión Acústica**, GLEA, pp 153-170, Buenos Aires, Argentina, 2001.

Soares, Sergio Damasceno, *et alli*, *Avaliação de ensaios não-destrutivos não convencionais realizados no vaso F-6005, retirado de operação da RLAM – 2º Relatório parcial do projeto 600004, RT 650-23190*, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello, **PETROBRAS**, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.

Soares, Sergio Damasceno, **Emissão Acústica – apostila**, Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos – ABENDE, São Paulo, Brasil, 2001.

Soares, Sergio Damasceno, *Could acoustic emission testing show a pipe failure in advance*, *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, vol. 23, pp 1280-1287, Estados Unidos da América, 2003.

Soares, Sergio Damasceno, *Banco de dados dos ensaios de emissão acústica nas unidades da PETROBRAS – análises efetuadas e resultados obtidos*, Anais do II INSPEQ, **Universidade PETROBRAS**, Brasil, 2003.

Soares, S. D. e Donato, G. V. P., *PETROBRAS's acoustic emission database – analysis and obtained results*, **Proceedings of the 16th World Conference on Nondestructive Testing**, Montreal, Canada, 2004.

State of the art report on base metals and fracture – Program to reduce the earthquake hazards of steel moment-frame structures, FEMA-355A, **FEMA**, Estados Unidos da América, 2000. Disponível no endereço: <http://nehrp.nist.gov/pdf/fema355a.pdf>

Teixeira, José Cláudio Guimarães, Avaliação de defeitos planares em dutos, Relatório Final do Projeto 600377, RT TMEC 015/03, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello, PETROBRAS, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

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.

Velloso, Ingryd, Metodologia de teste hidrostático baseado no “Stress Test” aplicado em tubo de aço API 5LX-60, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

Yoon, Dong-Jin *et alli*, *AE parameter analysis for fatigue crack monitoring*, **Proceedings of the 15th World Conference on Nondestructive Testing**, Roma, Italia, 2000.

Yoshida, K., Akematsu, Y. Sakamaki, K. e Horikawa, K., *Effect of pinhole shape with divergent exit on AE characteristics during gas leak*, **Journal of Acoustic Emission**, vol. 21, pp 223-229, Estados Unidos da América, 2003.

Yuyama, Shigenori, *Fundamentals aspects of acoustic emission applications to the problems caused by corrosion*, **Corrosion Monitoring in Industrial Plants Using Nondestructive Testing and Electrochemical Methods**, ASTM STP 908, G. C. Moran e P.

Labine, Eds., *American Society for Testing and Materials*, pp 43-74, *Philadelphia*, Estados Unidos da América, 1986.

Yuyuma, S. e Nishida, T., *Acoustic emission evaluation of corrosion damages in buried pipes of refinery*, ***Journal of Acoustic Emission***, vol. 21, pp 187-196, Estados Unidos da América, 2003

Anexo – Trabalhos publicados

Elsevier Editorial System(tm) for International Journal of Pressure
Vessels and Piping
Manuscript Draft

Manuscript Number: IPVP-D-07-00122

Title: Determination of the fracture mechanics parameter, K, applied in pipelines, with the use of the acoustic emission technique

Article Type: Original Article

Keywords:

Corresponding Author: Eng. Sergio Damasceno Soares, M.Sc.

Corresponding Author's Institution: PETROBRAS R&D Center

First Author: Sergio Damasceno Soares, M.Sc.

Order of Authors: Sergio Damasceno Soares, M.Sc.; João Marcos A Rebello, D.Sc.

Abstract: The use of hydrostatic tests in segments of pipelines offers many advantages as a tool for the regeneration of pipelines. Although the hydrostatic test is widely used, the pipeline sometimes fails right after returning to operational conditions. Many studies have been carried out in an attempt to propose hydrostatic test methodologies that enable the maximum possible reliability for the pipeline returning to operational condition. This study presents analyses performed with acoustic emission signals collected in hydrostatic tests, in pipelines segments containing artificially inserted discontinuities. Discontinuities with different dimensions were inserted in order to simulate the presence of cracks, and allow the alteration of fracture mechanics parameter KI values. The analyses carried out have demonstrated the existence of a correlation between KI and the level of acoustic activity in each discontinuity, once the methodology used, supported a variation of KI by means of the variation in the load and consequent propagation of discontinuities. The relations obtained between KI and the acoustic emission signals parameters reached correlation rates of approximately 95%. The results found have demonstrated the feasibility for the use of this methodology to indicate the presence of critical areas in the pipeline segments tested.

Determination of the fracture mechanics parameter, K_I , applied in pipelines, with the use of the acoustic emission technique.

* Sergio Damasceno Soares ¹

João Marcos Alcoforado Rebello ²

¹ PETROBRAS – R&D Center – CENPES; ² Federal University of Rio de Janeiro.

Abstract

The use of hydrostatic tests in segments of pipelines offers many advantages as a tool for the regeneration of pipelines. Although the hydrostatic test is widely used, the pipeline sometimes fails right after returning to operational conditions. Many studies have been carried out in an attempt to propose hydrostatic test methodologies that enable the maximum possible reliability for the pipeline returning to operational condition. This study presents analyses performed with acoustic emission signals collected in hydrostatic tests, in pipelines segments containing artificially inserted discontinuities. Discontinuities with different dimensions were inserted in order to simulate the presence of cracks, and allow the alteration of fracture mechanics parameter K_I values. The analyses carried out have demonstrated the existence of a correlation between K_I and the level of acoustic activity in each discontinuity, once the methodology used, supported a variation of K_I by means of the variation in the load and consequent propagation of discontinuities. The relations obtained between K_I and the acoustic emission signals parameters reached correlation rates of approximately 95%. The results found have demonstrated the feasibility for the use of this methodology to indicate the presence of critical areas in the pipeline segments tested.

Key words: acoustic emission, fracture mechanics, hydrostatic tests.

Introduction

There are reports on metallurgical technical literature about combination of material strain with the consecutive emission of loud noises. By the 20th Century, the physical principle of the loud noise emission during material strain was studied by Joseph Kaiser [Tensi, 2004] and has become part of the non-destructive tests applied to industrial materials. The discovery that materials exposed to stress emit noises when they are in a failing process opened a range of applications for the technique called acoustic emission. The acoustic emission technique is based on the detection of acoustic sources that are emitted during the propagation of discontinuities, that is, the results obtained with the inspection method by acoustic emission are the expected for real time monitoring of structures. Because it is a qualitative method, the acoustic emission method does not provide the sizing of discontinuities. Whereas the acoustic emission is related to the energy release occurred during rearrangement of stress fields in the extremity of discontinuities, many researchers seek the possible relation between acoustic emission and dimension of discontinuities, and so forth, the possibility of using the methodology for the evaluation of criticality in discontinuities. The study reported in this article describes the existing relation between the acoustic emission and

the criticality in discontinuities for pipelines segments with artificially inserted discontinuities and hydrostatically tested. Linear correlation coefficients close to 95% were found during the performed analyses.

Bibliography Review

CTOD tests (crack tip opening displacement) were performed in 1990 together with acoustic emission [Camerini, 1992], with the purpose of verifying existence or non-existence of a pattern and repetitive behavior for the propagation of cracks in structural steel. The results obtained [Camerini, 1992] indicated the capacity for detection of cracks before the initiation CTOD was obtained, although the signals generated in the cracks showed low energy. In this study, it was used the ASTM A-516-Gr60 steel, material usually applied in the construction of pressure vessels, at the time, for rendering a high toughness. CTOD tests were performed in four points. During the CTOD test, two moments of very high acoustic activity were detected besides the behavior of amplitude decreasing with the load increment. The two moments of intense acoustic activity identified [Camerini, 1992] would occur within a large interval prior to the collapse of the specimen (the first), and the other in the collapse of the specimen. So it was researched the relation between the moment of intense acoustic activity and the initiation CTOD (CTOD for the initial propagation of the inserted discontinuity). It was identified that the highest moment of acoustic activity would happen with CTOD values quite inferior to the initiation CTOD and, when the initiation CTOD load was reached, the acoustic activity would be in sharp decline. The detection of acoustic emission signals before the initiation CTOD value is reached may signify that the methodology applied allows detection of the propagation of discontinuities before the discontinuities themselves are detected by the methodology that determinates the initiation CTOD. This fact would confirm bibliographical reports [Miller, 1987] on the possibility of detection by acoustic emission, of microscopic mechanisms of strain. In industrial scale, the most applied methodology for the signal analysis of acoustic emission is called MONPAC. The MONPAC criteria, developed by companies association MONSANTO and the Physical Acoustics Corporation – PAC, involves collecting and analyzing data on acoustic emission in controlled conditions of pressurization and adjustments of the instrumentation used. The acoustic emission data classification is carried out taking two parameters into consideration: *historic index* and *severity*. The *historic index* parameter is related to the evolution of the activity during the acoustic emission test, and the *severity* parameter is related to the signal energy of acoustic emission. These parameters are calculated by the summation of the amount of detected signals within defined periods of time and the energy of signals, respectively. To help reading interpretation of results, the *historic index* and *severity* parameters are displayed in graphs bearing five distinct areas, which represent the action that must be performed by the owner of the tested equipment. Figure 1 displays a regular result for the data analysis under criteria MONPAC. In this graph are presented the values obtained for *historic index* and *severity index* parameters for each sensor used. The graph is divided in six areas: *no significant emissions*, A, B, C, D and E. In relation to the obtained classification for each channel, the MONPAC criteria establish actions. For example, acoustic emission tests with “D” and “E” classification require non-destructive tests for the detection and sizing of possible existing discontinuities. [Feres, 2001] In another paper [Soares, 2003], hydrostatic tests were performed until failure in specimens built with segments of pipelines, as part of a program to propose new methodologies on hydrostatic tests for pipelines. For the execution of tests, semi-elliptical surface discontinuities simulating cracks were introduced in the specimens with the dimensions: 3 x 60 mm, 7 x 140 mm and 20 x 200 mm, depth and length, respectively. The specimens were

monitored by means of acoustic emission during the pressurization cycle. The specimens were manufactured in API XL 60 steel with 20 inches diameter, 14,5 mm wall thickness and 3000 mm length. The propagation of the discontinuities inserted was monitored by means of an ultrasound system. The acoustic emission sensors were installed in the cylindrical part of the specimens, near the closing caps, and with a distance of approximately 2800 mm between them. The direct incidence angular beam ultrasonic technique was used in the monitoring of discontinuities propagation. The tests have shown that the acoustic emission technique indicates with anticipation the presence of critical discontinuities in the object tested prior to the imposition of critical value loads. Specimens compact-tension type were manufactured in aluminum (2014-T6 and 7050-T76511) and A36 steel, and were tested in order to have their resistance properties to fatigue determined [Chen, 2004]. Along the test, acoustic emission signals were collected for the study of a possible relation with fracture mechanics parameter K_I . The acoustic emission sensors used in the tests depicted a frequency band ranging between 200 kHz and 750 kHz. For the aluminum specimens it was observed that the discontinuity growth in the specimens went along with the growth of the total counts as the test progressed. For the specimens manufactured in steel, although bearing the same growth tendency between the crack length and the counts, the relation did not present the same consistency. The relation between the acoustic signal intensity and the energy required to provoke the fracture in the specimen has been studied and displayed the same proportionality behavior registered for the counts of acoustic emissions and the quantity of signals parameters. In 2004 it was published an article about an analysis conducted on a database that had been created with results from tests performed in the PETROBRAS system [Soares, 2004]. The application of the database enabled the utilization of real existing information by the team of the inspection area, which helped the decision-making concerning the operational continuity of the tested equipment. Besides geometrical information and equipment building characteristics, the database encompassed results from nondestructive inspections performed after the acoustic emission test. The results from the non-destructive inspection were used to establish correlations between acoustic emission and the fracture mechanics. The acoustic emission tests were based in the MONPAC criteria. Distinct conclusions were drawn up after the data analysis of 210 database equipment, mainly: (1) there is a relation between the MONPAC criteria and the presence of discontinuities. Almost all the equipment that had been classified as “E” presented discontinuities and less than 50% of the equipment that had been classified as “A” presented discontinuities; (2) there is no clear separation between the MONPAC criteria classes, when compared to the results for fracture mechanics; (3) there is a *quasi* linear correlation between the acoustic emission and the fracture mechanics for the inspections performed in pressure vessels; and, (4) the acoustic emission technique could be used as a screening tool for selection of areas for non-destructive tests. [Soares, 2004]

Materials and methods

Segments of steel pipelines API XL 60 (table I) specification, with seam, nominal diameter 20 inches, 1500 mm length and wall thickness of 14,5 mm were employed in the specimens identified as “tubo 01”, “tubo 02” and “tubo 03”, longitudinal surface discontinuities with semi-elliptical format, and with the purpose of simulating cracks, were inserted by electro-erosion milling. The discontinuities were identified in relation to their position, base metal (MB) and weld metal (MA), and aspect ratio, big (TG) and small cracks (TP). In table II are described the discontinuities inserted in each specimen. Figure 2 displays one of the manufactured specimens, with sensors for the collection of acoustic emission signals and ultrasound transducers for measuring depth of the inserted

discontinuities. For each inserted discontinuity, an acoustic emission sensor positioned near the center of discontinuity area was mounted. The propagation of discontinuities was monitored by means of time of flight diffraction (ToFD) ultrasonic technique.

Table I – Mechanical properties of the API XL 60 steel. [Teixeira, 2003]

Property	Value (MPa)
Yield strain limit (MPa)	483
Strength stress limit	598
Modulus of Elasticity	216505
K_{Jc} (MPa $\sqrt{m}$)	222

Table II – Depth and length, in mm, of the inserted discontinuities.

Specimen	Depth	Length	Location	Identification
Tubo 03	7,0	140	Base metal	MBTG
	7,0	70	Base metal	MBTP
	7,0	140	Heat affected zone	MATP
	7,0	70	Heat affected zone	MATG
Tubo 02	3,91	72	Base metal	MBTG
	3,81	36	Base metal	MBTP
	3,53	72	Heat affected zone	MATP
	3,58	36	Heat affected zone	MATG
Tubo 01	1,9	38	Base metal	MBTG
	1,9	19	Base metal	MBTP
	1,9	38	Heat affected zone	MATP
	1,9	19	Heat affected zone	MATG

Before inserting discontinuities, two aspect ratio ($a/2c$) were considered: 10 and 20. The discontinuities were inserted with “ a ” depths of 1/4, 3/8 and 1/2 of “ t ” thickness.

The K fracture mechanics parameter applied to the specimens was calculated based on the diagram of figure 3 described by Anderson [Anderson, 1995], which best expresses the load imposed on the discontinuities inserted by electro-erosion milling. Acoustic emission data was collected with the AEWin software, developed by Physical Acoustics Corporation – PAC, and with resonant sensors 150 kHz frequency peak and 100% range. This software enables collection of the main characteristics of an acoustic emission signal: rise time, amplitude, counts, interval and energy. The discontinuities inserted were monitored and measured by ultrasonic technique *time of flight diffraction* (ToFD) in intervals of time of 1 second. [Carneval, 2005] The specimens were hydrostatically tested with pressure curves that allow pressures equivalent to 90% of the yield strain limit. The internal pressure application rate remained between 1 and 2% of the maximum pressure per minute. The pressure was monitored and measured in intervals of time of approximately 30 seconds.

Results Obtained

Acoustic emission data may be collected from all sensors installed into the specimen. Therefore, it was applied a filter based on time with the purpose of reducing data, not allowing the reflection of the same acoustic signal detected in more than one sensor to be used in the analysis. This filter uses the propagation velocity value of acoustic emission signal and the longer distance of the specimen, which commonly is the diagonal distance of the planned specimen. Signals which are detected in other sensors within the required programming time in the largest distance of the specimen allow the accurate location of their source, are filtered. This methodology is applied for acoustic emission signals analysis. Figures 4 and 5 graphically display the data of the three specimens for K_I and r_p (radius of the plastified zone). In order to facilitate the graph display, the distinction between the discontinuities inserted in the specimens was not made.

Linear correlation coefficients between acoustic emission *Severity index* and fracture mechanics K_I and r_p achieved the same value of 0,84. Equations were adjusted in order to estimate K_I values according to the *Severity index* value. Due to this, K_I value might be estimated based on *Severity index* values, according to equation I.

$$K_{I(EA)} = 2,20 \times 10^{-3} \cdot \text{Severity} + 32,68 \quad (I)$$

Figure 6 displays the data used to determine the values, the adjusted equation (equation I) and limit curves for a confidence level of 95%. It may be noticed that not all data used were placed within the confidence level of 95%. Linear correlation coefficients between acoustic emission parameters and K_I were calculated. Although obtained correlation coefficients were less than 0,90, an equation was adjusted using the minimal square method with multiple regression (equation II).

$$K_{I(EA)} = 3,89 \times 10^{-3} \cdot \sum tsub + 6,50 \times 10^{-4} \cdot \sum cont + 5,19 \times 10^{-4} \cdot \sum ener - 1,50 \times 10^{-4} \cdot \sum dur - 2,54 \times 10^{-3} \cdot \sum amp + 0,52 \cdot \sum freqm + 10,37 \quad (II)$$

Where,

tsub is the rise time, *cont* is the count, *ener* is the energy, *dur* is the duration, *amp* is the amplitude and *freqm* is the average frequency of acoustic emission signals.

Figure 7 displays the data obtained from equation II. The obtained correlation coefficient between the K_I calculated values and the values used in equation II was of 0,886.

The specimen tubo 03 presented the larger discontinuity propagation (1,5 mm). The specimen tubo 02 presented a propagation of 0,52 mm and specimen tubo 01 presented no discontinuity propagation. The analysis of acoustic emission signals detected during the hydrostatic test allowed to identify that count, energy, duration and amplitude parameters presented similar values in tubo 03 and tubo 01 and lower values for the specimen that presented no discontinuity propagation (tubo 02). Due to this, average values and standard deviation of these parameters in the three tested specimens (table III) were calculated.

Regarding the count, energy and duration parameters, the average values are rising in relation to discontinuities propagation obtained in specimens, that is, the large propagation in specimen tubo 03, small in specimen tubo 01 and no propagation in specimen tubo 02. For amplitude parameter there was no difference between the average of tubo 01 and tubo 02, although these values were lower when compared with specimen pipe 03. Concerning rise

time parameter, it was verified that the value calculated in acoustic emission signals, the lowest values of K_I correspond to the largest values of rise time.

Table III – Parameter and specimen average and standard deviation.

	Tubo 01		Tubo 02		Tubo 03	
Parameter	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation	Average	Standard deviation
Rise time	59	140	79	158	59	143
Count	121	1250	76	399	201	1384
Energy	228	3536	38	221	260	3282
Duration	2463	19215	2000	6417	3166	14223
Amplitude	49	6	49	6	51	9
Average frequency	0.32	0.42	0.32	0.42	0.30	0.41

Aiming at increasing linear correlation coefficient “ R ”, the collected signals were filtered according to the average values, and one or two standard deviation were add to these average values. Low average values less a standard deviation were not filtered because they did not supply any collected data. No R values over 0,886 (coefficient obtained without filtering) were obtained for the applied filters.

The value 0,886 for R was obtained according to parameters of rise time, count, energy, duration, amplitude and average frequency. Among these parameters, amplitude parameter was the one that presented the lowest correlation coefficient with K_I , due to this, coefficient R were calculated under the exclusion of amplitude parameter. The new value obtained for coefficient R was 0,881, indicating that the omission of a parameter results in the decrease of the correlation index. As the reduction of the parameter resulted in the decrease of the correlation coefficient, a new parameter was introduced for estimating K_I in relation to the results of acoustic emission tests. This new parameter, named count to peak, translates the collected count numbers up to the maximum signal amplitude of the acoustic emission. With the introduction of this parameter, the correlation coefficient obtained was 0,940. The addition or omission of a parameter results in a new correlation equation between the parameters, that is, for correlation coefficient of 0,940, the equation II previously described cannot be applied.

In order to estimate the K_I according to acoustic emission parameters: rise time, count, energy, duration, amplitude, average frequency and count to peak, a correlation coefficient of 0,940 was obtained. In a total of 99 estimates, 28 were included within the confidence level of 95%.

In order to estimate the K_I according to acoustic emission parameters: rise time, count, energy, duration, amplitude, average frequency, a correlation coefficient of 0,886 was obtained. In a total estimate of 99, 23 were included within the confidence level of 95%.

Even though there is dispersion between the acoustic emission estimated and conventional calculated values, the estimate calculated using the largest number of parameters presented low difference between the calculated values and estimated values.

Even though the obtained correlation coefficient (0,940 and 0,886) obtained for K_I values were up to 90 MPa $\sqrt{m}$, an extrapolation occurred, using the obtained correlation with acoustic emission data of maximum values of K_I applied to the specimens. Such extrapolation must be carefully examine because these equations used to obtain the values were not based on the used input values, besides this, the use of fracture mechanic parameter K_I has no apply in the region next to the yield stress limit. This analysis may be considered as valid only as a form of comparison or validation. Table IV displays the results of this analysis corresponding to the tested discontinuities analysis.

Consider the following aspects to analyze table IV:

- the specimen tubo 02 presented the smallest discontinuities;
- in specimen tubo 01 only discontinuity placed in the metal base and with a aspect ratio of 10 presented a propagation that was detected by the ultrasonic test during the hydrostatic test;
- in specimen tubo 03 the discontinuity with aspect ratio of 20, positioned in the base metal, failed catastrophically during the hydrostatic test, while the discontinuity aspect ratio of 10 presented no detectable propagation by the applied ultrasonic method.

For correlation coefficient of 0,940, executing the estimated values for tubo 03 discontinuity with aspect ratio of 20, all the results were coherent to the values provided above. For correlation coefficient of 0,886 all the results were compatible with the previous statements. Due this result, we opted not to recalculate the equation II and use it to calculate K_I , using acoustic emission signals.

Table IV – K_I estimated values in MPa $\sqrt{m}$ using acoustic emission parameters. For correlation coefficient 0,940, the parameters used were: rise time, count, energy, duration, amplitude, average frequency, and count to peak; for correlation coefficient 0,886, the parameters used were: rise time, count, energy, duration, amplitude, and average frequency.

Discontinuity	Correlation Coefficient		Note
	0,940	0,886	
Tubo 01 matg	87,9	100,8	No propagation
Tubo 01 mbtg	106,0	94,0	No propagation
Tubo 01 mbtp	176,6	117,4	Propagation
Tubo 02 matg	65,8	58,9	No propagation
Tubo 02 mbtg	70,8	70,7	No propagation
Tubo 03 mbtg	241,1	144,8	Catastrophic fracture in the specimen
Tubo 03 mbtp	-17,4	110,4	No propagation

Conclusions

Collected data and performed analyzes allow the establishment of the following conclusions:

- there is a relation between acoustic emission signals and the presence of discontinuities in specimens;
- there is a relation between acoustic emission and propagation or non-propagation of the discontinuities;
- the criterion industrially used to analyze the acoustic emission tests analysis, correctly rates the existing discontinuities when considering the criticality of the discontinuities;

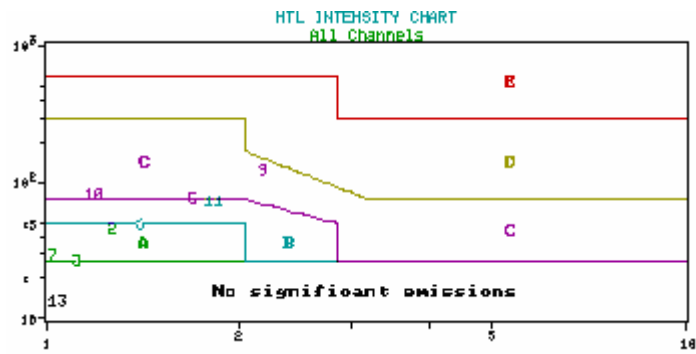
- for the collected data, it is possible to define K value applied to the discontinuities according to acoustic emission parameters.

I would like to thank

Engineer José Cláudio Guimarães Teixeira, from PETROBRAS – R&D Center, and Engineer Ronaldo Vieira for making the experimental part of this work viable.

References

- Anderson, T. L., **Fracture mechanics – Fundamentals and applications – second edition**, CRC Press, USA, 1995.
- Camerini, C.S., Rebello, J.M.A., Soares, S.D., Relationship between acoustic emission and CTOD testing for a structural steel, **NDT&E International**, vol. 25, n. 3, pp 127-133, USA, 1992
- Carneval, R.O. e Soares, S.D., **Inspection with time of flight diffraction technique(ToFD) for determination of height of discontinuity at sphere ES 5901 at TRANSPETRO/Brasília**, CT-002/05, internal document, PETROBRAS/CENPES, Brazil, 2005, (portugues only).
- Chen, H.L. (Roger) e Choi, J.H., *Acoustic emission study of fatigue cracks in materials used for AVL B*, **Journal of Acoustic Emission**, vol. 23, n. 4, pp 133-151, USA, 2004.
- Feres Filho, P. *et alli*, **Criticality flaw evaluation considering temperature operation effect**, 5ª COTEQ, ABENDE, São Paulo, Brasil, 2001, (portugues only).
- Miller, R.K. e McIntire, P., **Nondestructive Testing Handbook - Volume Five, Acoustic Emission Testing**, American Society for Nondestructive Testing – ASNT, USA, 1987.
- Soares, S.D., *Could acoustic emission testing show a pipe failure in advance*, **Review of Quantitative Nondestructive Evaluation**, vol. 23, pp 1280-1287, USA, 2003.
- Soares, S. D. e Donato, G. V. P., **PETROBRAS's acoustic emission database – analysis and obtained results**, *Proceedings of the 16th World Conference on Nondestructive Testing*, Montreal, Canada, 2004.
- Teixeira, J.C.G., Evaluation of planar defects in pipelines, **Project 600377 Final Report, RT TMEC 015/03**, PETROBRAS/CENPES, Rio de Janeiro, Brazil, 2003, (portugues only).
- Tensi, H.M., The Kaiser-effect and its scientific background, **Journal of Acoustic Emission**, vol 22, pp S1-S16, USA, 2004.



Intensity Table for Graph #2				
Channel	Hits	Historic Index	Severity	Grade
2	291	1.26	46.90	A
3	83	1.11	26.60	A
5	793	1.69	75.60	C
6	540	1.40	49.50	B
7	10	1.80	29.20	A
9	474	2.17	124.00	C
10	19	1.18	93.00	C
11	1333	1.81	73.00	B
13	19	1.03	13.50	N

Fig. 1 – Example of the MONPAC criteria graph. [Soares, 2004]



Fig. 2 – Specimen prepared for hydrostatic test.

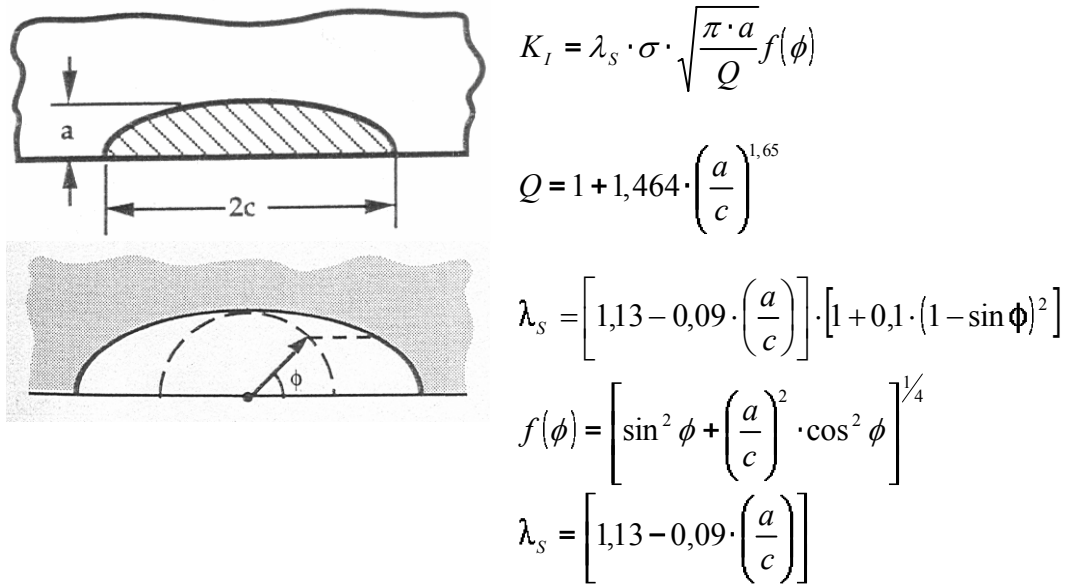


Fig. 3 – Loading applied to the specimen in regions presenting discontinuities. [Anderson, 1995]

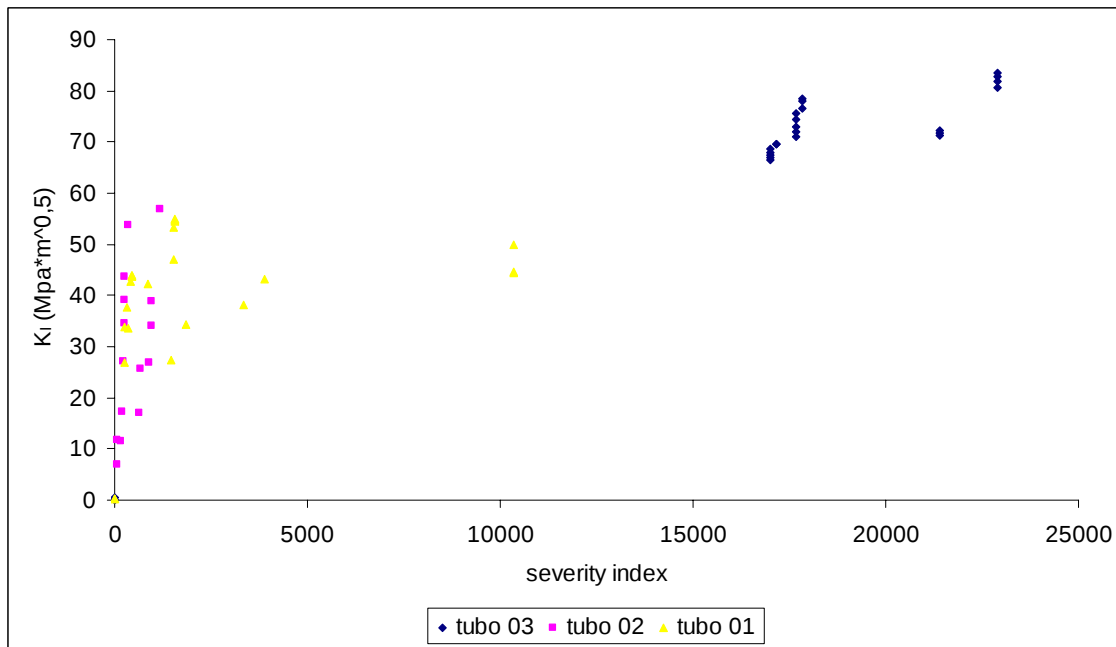


Fig. 4 – Severity index versus K_I .

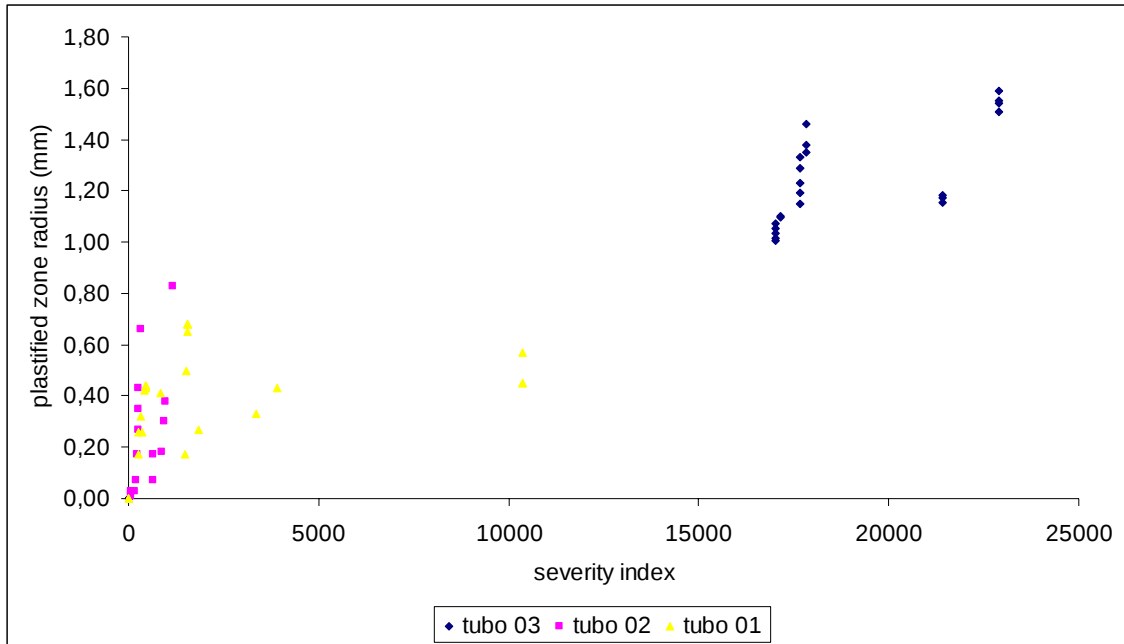


Fig. 5 – *Severity index* versus radius of the plastified zone in the crack extremity.

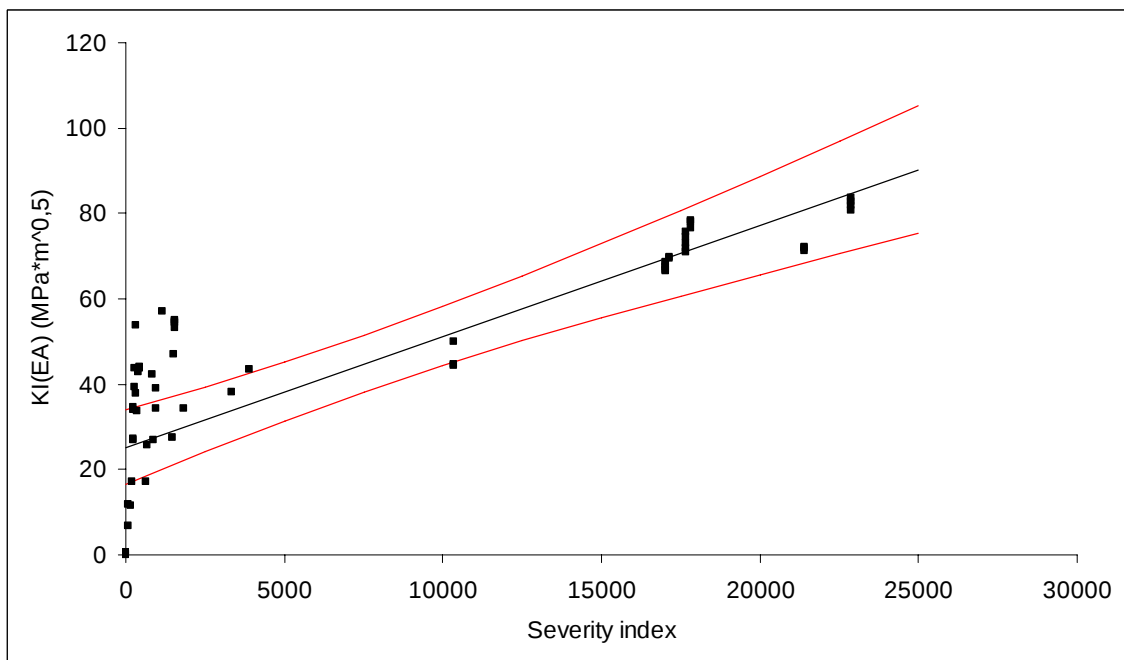


Fig. 6 – *Severity index* versus K_I for all data.

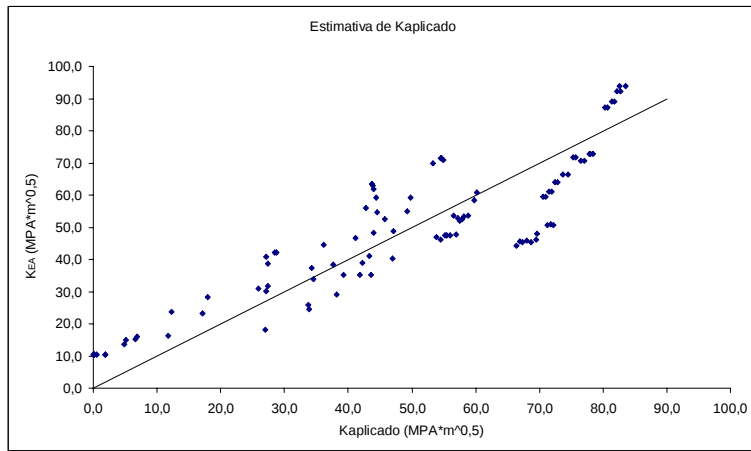


Fig. 7 – Calculated K_I versus estimated K_I with acoustic emission.

PETROBRAS Criteria for Acoustic Emission and Fracture Mechanics Relationship

Sergio Damasceno Soares / PETROBRAS R&D Center - CENPES

João Marcos A. Rebello / Federal University of Rio de Janeiro

ABSTRACT

During the last years, PETROBRAS has used acoustic emission technique as an inspection tool. In this period, acoustic emission concept was changed from a revolutionary technique to a global inspection technique with the aim of indicate areas to complimentary inspection.

In the last years more than 600 acoustic emission exams was done in equipments like pressure vessels, reactors, tanks, spheres and etc. In 2002 the results of acoustic emission exams and nondestructive tests done in this equipments was collected to build a database of PETROBRAS environment. Analysis made in this database shown that exist a clear relationship between acoustic emission and severity of flaws.

INTRODUCTION

Acoustic emission technique is based on acoustic signals source detection that is emitted during discontinuity propagation. Discontinuities sizing are not provided by acoustic emission, a qualitative method, only active discontinuities during the structure loading are indicated. Sizing should be obtained and defined by others nondestructive methods.

Acoustic emission is related with energy release that occurs during stress field realignment in crack tip, so a several researchers are seeking the feasible relationship between acoustic emission and discontinuity dimensions, and criticality. This research addresses this relationship. It is not objective of this research stop the use of others nondestructive methods as equipment inspection tools. Definition of this relationship will be possible with an extensive use of others Nondestructive methods for accurately sizing, with Materials Engineering providing mechanics properties, and Fracture Mechanics providing equations and materials behaviors when submitted to typical loadings in operational condition. This relationship, that has a big amount of variables, will not provide a accurate value of discontinuity criticality. For critical results a verification of real dimensions to update the Fracture Mechanics update will be needed.

BACKGROUND

Acoustic emission is defined as a phenomenon where transient elastic waves are generated by instantaneous release of mechanic energy from source located in a material under exam [ABNT, 2004]. Acoustic emission sources include mechanisms of strain and fracture [Miller, 1987]. The inspection method with acoustic emission is capable of early structural flaw detection allowing continuous and real time monitoring of industrial structures. Areas that contain discontinuities could develop stress above yield stress limit as a result of stress concentration. In this situation, the propagation of

discontinuities acts as an acoustic emission signal source.

Main characteristics of acoustic emission parameters are [ABNT, 2004]:

- Amplitude; maximal signal voltage value;
- Counts; number of times that one acoustic emission signal trespass reference level or threshold during the data collection;
- Energy; the measure of acoustic emission signal rectified area;
- Rise time; time needed to obtain the maximal value of amplitude
- Duration; time between the start and finish of one acoustic emission signal detection.

There are several ways to analyze an acoustic emission field test. One of these types of analysis is based in MONPAC criteria. MONPAC criteria have two parameters: historic index and severity index. Historic index parameter is related with acoustic emission activity evolution during the test. Severity index parameter is related with acoustic emission signal energy. These parameters are calculated in defined time intervals. The values obtained allow the grade showed in table 1. MONPAC procedure involves data collection and data analysis in controlled and specific conditions of loading, using specific adjusts in acoustic emission equipment. Parameters historic index and severity index are shown in charts with five distinct areas that represent the action that the owner of equipment should do. Figure 1 shows a typical result of data analysis with MONPAC criteria. In this chart the values obtained for parameters historic index and severity index in each sensor (channel) installed at component under exam are shown. The chart is divided in six regions: no significant emissions, A, B, C, D e E. The location of sensor into the chart will be related with the region grade and with the action written in table 1. Acoustic emission results graded as “D” and or “E” requires that nondestructive inspection to detection and sizing of discontinuities that could be exists into the sensor neighborhood.

Table 1 – Active area Grade. [Feres, 2001]

Grade	Recommended action
A	No action is recommended.
B	Registry for future references in new monitoring.
C	Attention level, decrease the interval between inspections is recommended.
D	Indication of defects presence. Perform nondestructive inspection.
E	Presence of significant defects, perform nondestructive inspection.

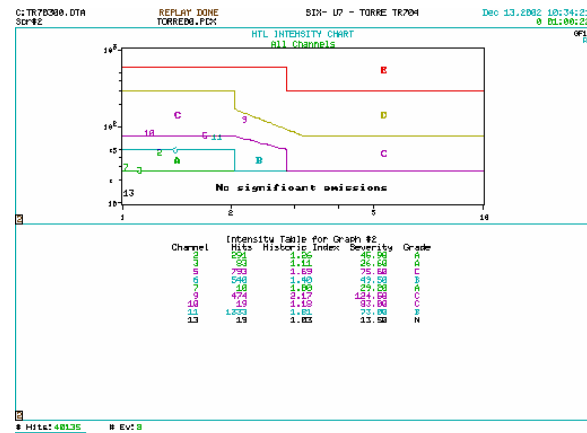


Fig. 1 –MONPAC criteria chart. [Soares, 2004]

In 2004 an article was published about analysis conducted in a database of acoustic emission tests performed in PETROBRAS units [Soares, 2004]. Beyond geometrical information and constructive characteristics, the database has results of nondestructive inspection performed after acoustic emission exam. Nondestructive results were used to establish relationships between acoustic emission and fracture mechanics. Acoustic emission tests were performed using MONPAC criteria. Figure 2 shows fracture mechanic results for collected data of equipment inspection of pressure vessels. [Soares, 2004]

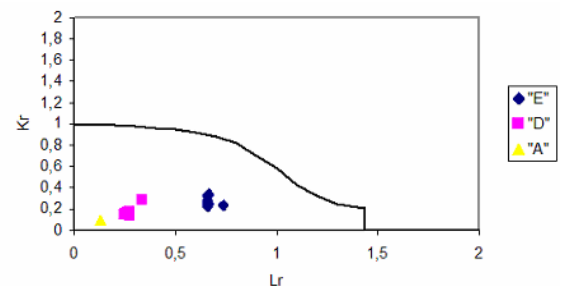


Fig. 2 – Comparison between results of MONPAC criteria and fracture mechanics for pressure vessels. [Soares, 2004]

OBTAINED RESULTS

Preliminary studies [Soares, 2004] shown that exist a relationship between results of acoustic emission performed in industrial scale, presence of discontinuities and respective criticality. Figure 2 showed a chart that present the relationship between acoustic emission result and discontinuities criticality [Soares, 2004].

The analyses performed using the database published by Soares will be shown with the purpose of establish a relationship between fracture mechanics and acoustic emission. This relationship

could help increase the assessing operational safety of equipments after acoustic emission inspection.

Reports of acoustic emission filed tests, sequential numbers 1412, 2424 and 2428, were used to obtain this relationship together with fracture mechanics analysis performed with nondestructive exams results in areas selected by acoustic emission test [Soares, 2003]. The same analysis were conducted with results obtained in a pipe sample called tubo 02. Acoustic emission field testes used (reports 1412, 2424 and 2428) were conducted in a same kind of equipment, pressure vessel, and in a previous work shown the relationship presented in figure 2.

Report 1412 was written for an inspection performed in a pressure vessel made of ASTM A515-Gr70 with 2089 mm of diameter, wall thickness 44,5 mm and 36 kgf/cm² of operating pressure. Data of report 2424 were collected in a pressure vessel made of ASTM A516-Gr60, diameter 1828,8 mm, wall thickness 111 mm, length 10868 mm and operating pressure of 94 kgf/cm². data collected and described in report 2428 were collected in a pressure vessel, material ASTM A204-GrA, diameter 2489 mm, length 15309 mm, wall thickness 12 mm and operating pressure of 4 kgf/cm². Sample tubo 02 was build in API XL 60 with 20 inches of diameter, 1,5 m of length and 14,5 mm of wall thickness [Teixeira, 2003].

Acoustic emission data were converted to spreadsheet file format to allow the extraction of statistical basic parameters: average, standard deviation, variation coefficient and asymmetry coefficient. After statistic parameters calculation, the next phase was check the existence of linear relationship between statistical parameters of acoustic emissions and fracture mechanics results [Soares, 2003]. Linear relationships existents were transformed in equations to allow the estimative of fracture mechanics parameters without need of perform nondestructive exams to discontinuities sizing.

Acoustic emission data were collected using MONPAC methodology and a data filtering.

Conventional result of acoustic emission exam

In figure 2 a failure analysis diagram (FAD) was shown for data published by Soares in 2004. This diagram represents the consolidation of nondestructive exams performed in areas defined by acoustic emission result and pressure vessel data book. Fracture mechanics parameters Lr and Kr were

calculated for discontinuities detected in analyzed equipments [Soares, 2004].

Data presented in figure 2 diagram were obtained from acoustic emission reports 1412, 2424 and 2428. Table 2 shown the values of fracture mechanics parameters Lr and Kr calculated for discontinuities detected in areas indicated by acoustic emission exam. [Soares, 2004].

Table 2 – FAD calculated parameters.

Report	Severity index	Kr	Historic index	Lr
1412	712,6	0,232	3,547	0,736
2424	700,1	0,327	1,398	0,664
2428	440,3	0,279	1,237	0,336

Nondestructive examination were conducted in areas with the highest grade obtained with MONPAC criteria. For reports 1412, 2424, and 2428, these areas were selected close to acoustic emission sensors “4”, “10” and “28”, respectively. Table 2 shown values of parameters Kr e Lr of this sensors.

Adjusts of 1st grade equations using minimal square method were performed using table 2 data. Only 1st grade equations were adjusted in function of small amount of points. Equations 1 and 2, for Kr and Lr, respectively, are shown below.

$$K_r = 0,21 \cdot (\text{severity}) \quad (1)$$

$$L_r = 0,246 \cdot (\text{historic}) \quad (2)$$

Figures 3a and 3b shows in a graphic format the result obtained with the estimative of fracture mechanics parameters Kr and Lr using equations 1 and 2.

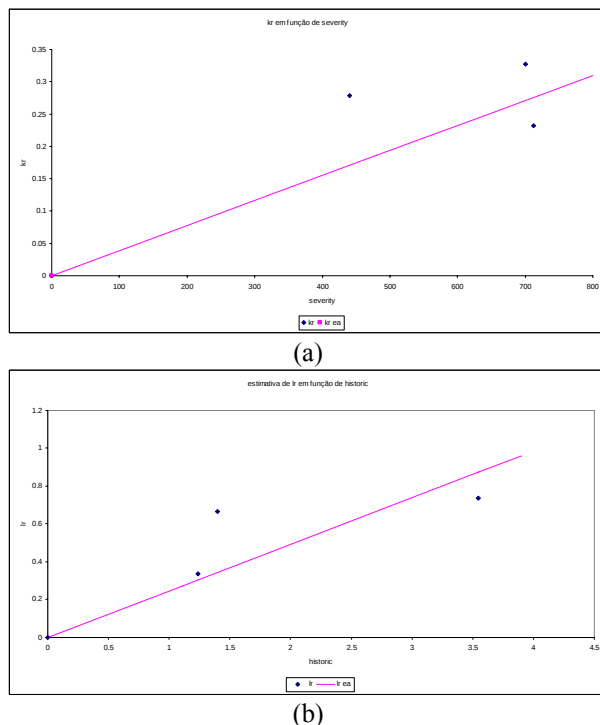


Fig. 3 – Relationship charts: (a) severity and Kr; and (b) severity and Lr

In sample tubo 02 longitudinal planar discontinuities were insert by electro-erosion with the aim of simulate cracks. These discontinuities had two aspect ratio ($a/2c$): 10 and 20. Discontinuities were inserting with $3/8$ of wall thickness.

During the hydrostatic test of tubo 02 acoustic emission signals were collected and the discontinuity propagation was measured with ultrasonic technique. Table 3 shows results of acoustic emission and fracture mechanics of hydrostatic test of sample tubo 02. Values of Kr and Lr were obtained from ultrasonic measurements and from pressure monitoring. Acoustic emission parameter “historic index” did not show changes, so, values of historic index were discarded. Equations 3 and 4 were adjusted.

Table 3 – Calculated values of Kr and Lr for inserted discontinuities and acoustic emission result from tubo 02.

canal 1			
Time (s)	Kr	Lr	Severity
2030	3,86	0,36	637,00
3370	4,21	0,54	660,40
5619	4,27	0,83	971,20
8989	4,25	1,15	1171,80
canal 3			
Time (s)	Kr	Lr	Severity
1327	4,03	0,25	74,50
3604	4,63	0,59	232,70
5936	4,59	0,92	265,90
7277	4,61	1,04	334,60

$$K_r = 0,005 \cdot (severity) \quad (3)$$

$$L_r = 0,001 \cdot (historic) \quad (4)$$

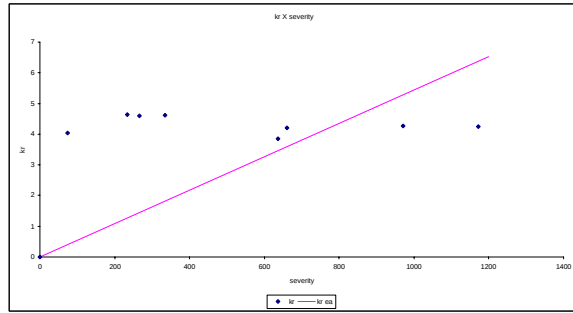
Figures 4a and 4b shown in a graphic format the result obtained with the estimative of fracture mechanics parameters Kr and Lr using equations 3 and 4.

Results using acoustic emission parameters values

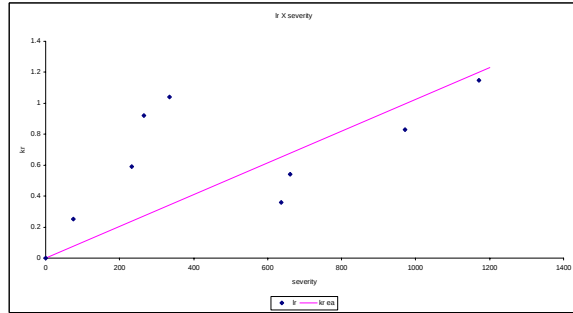
Acoustic emission data collected during the tests that generate reports 1412, 2424 and 2428 were analyzed by channel and parameter of acoustic emission. Statistical parameters average, standard deviation, variation coefficient and asymmetry coefficient were calculated by channel and parameter. Results of this calculation are described in table 4 for the sensor that had the highest MONPAC grade in reports 1412, 2424 and 2428.

Relationship coefficients were calculated between acoustic emission parameters and fracture mechanics results (described in table2). For relationship coefficient above 0.95, in modulus, equations were adjusted using the minimal square method, to infer fracture mechanics parameters. The average of amplitude was used to estimate Kr, as described in equation 5. For estimation of Lr were adjusted equations for: average of rise time; standard deviation of rise time and amplitude; coefficient of variation of rise time and amplitude. Value of Lr was inferred from equation 6 that corresponds to an

average of the values obtained from equations described above.



(a)



(b)

Fig. 4 – Relationship charts: (a) severity and Kr; and, (b) severity and Lr.

$$K_r = 0,005 \cdot M_{amp} \quad (3)$$

$$L_r = \frac{1}{5} \left(\begin{matrix} 0,006 \cdot M_{subida} + 0,006 \cdot D_{subida} + \\ 0,124 \cdot D_{amp} + 0,059 \cdot Cv_{subida} + 6,397 \cdot Cv_{amp} \end{matrix} \right) - 0,03 \quad (4)$$

Where:

- M_{amp} , average of parameter amplitude;
- M_{subida} , average of parameter rise time;
- D_{subida} , standard deviation of parameter rise time;
- D_{amp} , standard deviation of parameter amplitude;
- Cv_{subida} , coefficient of variation of parameter rise time;
- Cv_{amp} , coefficient of variation of parameter amplitude.

After establish equations 5 and 6 the next phase was use these equations to verify if results provided by them presets coherence with real values. For report 1412 the highest values should be obtained in channel “4”, but channels “9” and “3” shown the highest values for Kr and Lr, respectively. For report 2424 the highest values for Kr and Lr should be obtained in channel “10” and “12”, although channel “10” has the highest value for Kr, channel “7” presents the highest value for Lr. For report 2428 the

highest value of Kr was obtained in correct channel (“28”), but the highest value for Lr was obtained in different channel (“32”).

Table 4 – Results os statistical calaculation of reports 1412, 2424 and 2428.

1412				
Param	Avg	Std dev	Variat coef	Asym coef
Rise time	90	108	1,20	2,67
Counts	41	197	4,80	180,2
Energy	32	108	3,38	154,3
Duration	2003	6131	3,06	107,7
Amplitude	46	5	0,11	1,95
Average frequency	19	16	0,84	2,28
ASL	30	0	0	-1,35
2424				
Rise time	116	140	1,21	1,51
Counts	54	88	1,63	3,22
Energy	100	134	1,34	3,30
Duration	1168	1405	1,20	2,07
Amplitude	56	6	0,11	0,42
Average frequency	41	21	0,51	1,09
ASL	13	0	0	1,68
2428				
Rise time	60	40	0,67	2,06
Counts	7	10	1,43	12,85
Energy	26	23	0,88	14,82
Duration	125	141	1,13	7,41
Amplitude	58	3	0,05	3,30
Average frequency	71	39	0,55	1,13
ASL	32	1	0,03	-0,58

The small amount of data to calculate coefficient of relationship and adjust of equations could be the reason of inconsistent values for Kr and Lr from data used. It will be considered inconsistent the values of Kr and Lr above of values used to adjust equations.

Results of acoustic emission parameter filtering

There is an extension range between average value and maximal value of acoustic emission parameters (this range, sometimes is above six standard deviation). Analysis of all acoustic emission signals is a hard work and probably there are spurious signals together with data set that will not be useful to establish the integrity condition of component under the exam. To reduce the amount of data it was performed filter using parameters energy and counts. These parameters were chosen because they were used by Japanese standard JIS-Z-2343-2002 (opus cit Mori, 2003) to analyze acoustic emission data. The

data set of report 2428 presents the discontinuity with the lower criticality when compared with reports 1412 and 2424. Because of it the values for filtering data were defined to contemplate this dataset. It were selected acoustic emission signals that presents values of energy and counts above the average value described in table 4 report 2428. The objective of this filter was remove signals of acoustic emission with low energy and low counts and in function of it reduce the amount of data.

All signals considered valid were clustered by channel and summation of collected values by acoustic emission parameter was done. Summation was chosen to maximize the differences between the three datasets.

Table 5 shows values obtained in this summation, by parameter, for sensors with the highest MONPAC grade. Values of summation in table 5 were concatenated with table 2 to obtain new relationship equations between acoustic emission and fracture mechanics.

Table 5 – Results of summation after data filtering.

Parameter	Report		
	1412	2424	2428
Rise time	25709	38629	129144
Counts	33920	20244	23160
Energy	22596	35910	64144
Duration	1484801	426200	386382
Amplitude	9958	16373	93569
Average frequency	3463	12450	103780
ASL	5618	3751	49600

Coefficients of relationship did not reach the threshold of 0.95, then, the highest coefficient of relationship (parameter energy for Kr and parameter counts for Lr) was used to establish a new equation. Equation 7 was adjusted to infer Kr from summation of energy. Equation 8 was adjusted to onfer Lr from summation of counts.

$$K_r = 5,90 \times 10^{-6} \sum energy \quad (7)$$

$$L_r = 2,20 \times 10^{-5} \sum counts \quad (8)$$

Equations 7 and 8 were applied to summation of acoustic data of datasets 1412, 2424 and 2428 with the objective to verify the validity of proposed equations. In dataset 1412, the highest value of Kr and the second highest value of Lr were obtained in expected channel. The highest values for Kr and Lr were obtained in dataset of reports 2424 and 2428.

Table 6 presents real values used to adjust equations and estimated values using equations 7 and 8. The amount of data to establish equations are the same that uses to establish equations 5 and 6, but the results could be considered better because there is less inconsistency in the results.

Table 6 – Comparison between real values and estimated values by equations 7 and 8.

Report (channel)	Real values		Estimated values	
	Kr	Lr	Kr	Lr
1412 (4)	0,232	0,736	0,133	0,786
2424 (10)	0,327	0,664	0,212	0,446
2428 (28)	0,279	0,336	0,378	0,510

Acoustic emission data collected during the hydrostatic test of sample tubo 02 were analyzed by channel and parameter of acoustic emission. Statistical parameters average, standard deviation, coefficient of variation and coefficient of asymmetry were calculated by channel and parameter. Results of this calculation are described in table 7 for sensor close to the discontinuity that presented propagation during the hydrostatic test.

Table 7 – Results of statistical calculus of data collected in sample tubo 02.

Channel 1				
Parameter	Avg	Std dev	Variat coef	Asymm coeff
Rise time	183	165	0,90	1,37
Counts	6	8	1,47	1,86
Energy	62	76	1,23	0,75
Duration	1332	1562	1,15	1,66
Amplitude	56	11	0,20	0,48
Channel 3				
Rise time	518	731	1,41	0,00
Counts	72	140	1,95	0,18
Energy	34	57	1,68	0,13
Duration	3015	4655	1,55	0,09
Amplitude	50	5	0,09	142,58

Acoustic emission signals that had energy and counts values higher than the average value described in table 7 were selected. The reason of this procedure was reduce the amount of data without remove the highest acoustic emission signals.

All valid signals were put together by channel and summation of collected values by parameter was done. Summation was used to emphasize the differences between discontinuity propagation.

Table 8 shown the values obtained in this summation, by parameter, for sensors 1 and 3. Summation values, described in table 8 were concatenated with table 3 values to obtain new

equations for correlate acoustic emission and fracture mechanics.

Coefficients of relationship, in modulus, did not reach 0.95, and because of it equations were established using the parameter that shows the highest value for this coefficient. For estimate Kr and Lr its was used summation of amplitude, equations 9 and 10, respectively.

Table 8 – Results of summation after data filtering.

Channel 1				
Parameter	2030 s	3370 s	5619 s	8989 s
Rise time	210	210	210	3516
Counts	13	13	13	4121
Energy	180	180	180	1884
Duration	4203	4203	4203	92085
Amplitude	71	71	71	449
Channel 3				
Parameter	1327 s	3604 s	5936 s	7277 s
Rise time	562	10974	12402	14486
Counts	312	15224	17993	19556
Energy	133	5940	6993	7525
Duration	11732	339929	388290	425712
Amplitude	56	1001	1121	1289

$$K_r = 0,005 \sum amplitude \quad (9)$$

$$L_r = 0,001 \sum amplitude \quad (10)$$

Equations 9 and 10 were applied to summation of acoustic emission data collected in sample tubo 02 to verify the validity of proposed equations. The best results were obtained for data collected in channel 3.

Table 9 presents the real values used to equations adjust and estimated values with equations 9 and 10.

Table 9 – Comparison between real values and estimated values by equations 9 and 10.

Channel 1				
Values	2030 s	3370 s	5619 s	8989 s
Kr real	3,86	4,21	4,27	4,25
Kr estimated	0,32	0,32	0,32	2,03
Lr real	0,36	0,54	0,83	1,15
Lr estimated	0,06	0,06	0,06	0,39
Channel 3				
Values	1327 s	3604 s	5936 s	7277 s
Kr real	4,03	4,63	4,59	4,61
Kr estimated	0,25	4,53	5,07	5,83
Lr real	0,25	0,59	0,92	1,04
Lr estimated	0,05	0,87	0,98	1,13

CONCLUSIONS

Analysis made in previous work [Soares, 2004] shown the existence of a relationship between acoustic emission inspection technique using MONPAC criteria and discontinuities criticality detected in equipments examined, after perform nondestructive exams.

Reduction of data based in parameters counts and anergy together with statistical distribution of acoustic emission signals shows the expected result.

The use of acoustic emission parameters to obtain correlations with fracture mechanics it was possible after data filtering based in parameters counts and energy.

Equations to express fracture mechanics from acoustic emission could be obtained with better adjust with the increasing of database with acoustic emission signals and discontinuities sizing.

Finally, it could be concluded that exist a relationship between fracture mechanics and acoustic emission. Although this correlation has not been described yet, the methodology proposed in this article could address this objective.

Increasing the amount of dataset for analysis, higher coefficient of relationship could be achieved and adjust of equations could provide better results.

BIBLIOGRAPHIES REFERENCES

ABNT, NBR 15181 - Ensaios não destrutivos - Emissão Acústica - Terminologia, **Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT**, São Paulo, Brazil, 2004.

Feres Filho, P. et alli, Avaliação da criticidade de defeitos considerando o efeito da temperatura de operação, 5ª COTEQ, **ABENDE**, São Paulo, Brazil, 2001.

Miller, Ronnie K. e McIntire, Paul, *Nondestructive Testing Handbook - Volume Five, Acoustic Emission Testing*, **American Society for Nondestructive Testing – ASNT**, United States of America, 1987.

Mori, Y., Shiwa, M., Nakano, M. E Iwai, K., *New concept of AE standard: JIS Z 2342-2002 “Methods for acoustic emission testing of pressure vessels during pressure tests and classification of test results”*, **Journal of Acoustic Emission**, vol. 21, pp 197-205, United States of America, 2003.

Soares, Sergio Damasceno, *Could acoustic emission testing show a pipe failure in advance*, **Review of Quantitative Nondestructive Evaluation**, vol. 23, pp 1280-1287, United States of America, 2003.

Soares, S. D. e Donato, G. V. P., *PETROBRAS's acoustic emission database – analysis and obtained results*, **Proceedings of the 16th World Conference on Nondestructive Testing**, Montreal, Canada, 2004.

Teixeira, José Cláudio Guimarães, Avaliação de defeitos planares em dutos, Relatório Final do Projeto 600377, RT TMEC 015/03, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello, PETROBRAS, Rio de Janeiro, Brazil, 2003.



16 **WCndt**

MANUSCRIPT SUBMISSION



16th World Conference on
Nondestructive Testing
Montréal, Canada
August 30 - September 3, 2004

PETROBRAS'S ACOUSTIC EMISSION DATABASE – ANALYSIS AND OBTAINED RESULTS

S. D. Soares¹, G. V. P. Donato¹, J. Tesser² and J. Aguiar²

¹ PETROBRAS R&D Center, Brazil, ² University Federal of Ceará, Brazil

Abstract:

During the last years, PETROBRAS has trying to use acoustic emission technique as a inspection tool. In this period, acoustic emission concept was changed from a revolutionary technique to a global inspection technique with the aim of indicate areas to complimentary inspection.

In the last years more than 600 acoustic emission exams was done in equipments like pressure vessels, reactors, tanks, spheres and etc. In 2002 the results of acoustic emission exams and nondestructive tests done in this equipments was collected to build a database of PETROBRAS environment.

This paper shows the analysis done to obtain a relationship between acoustic emission and life assessment of industrial equipments.

Introduction:

Brazilians engineers and researchers have been studied acoustic emission phenomena since 1979. PETROBRAS R&D Center (CENPES) is an important player in this scenario. During the last 25 years, PETROBRAS has trying to use Acoustic Emission technique as an inspection toll. In this period, the concept of Acoustic Emission was changed from revolutionary technique to global inspection technique with the aim of select areas for complementary inspection.

PETROBRAS has a big amount of pressure vessel and other equipments inspected by acoustic emission to establish a relationship with Non Destructive Testing, in the last five years more than 600 equipments were inspected.

Acoustic emission is a global inspection and could be applied to a large variety of structures, including spheres, piping systems, storage tanks, pressure vessels and etc. An extend range of materials and thickness could be inspected by acoustic emission. The test component could be at room temperature or at high temperature. Access to structure is required to install the sensors. Acoustic emission detects discontinuities that generated energy during the deformation of structure when it is stressed. Typical events detected during acoustic emission inspection include fatigue crack growing, hydrogen induced damage, stress corrosion cracking, and etc.

This paper presents the analysis did with the collected data of complimentary non destructive testing and acoustic emission to obtain a probable relationship between of acoustic emission and life assessment of industrial equipments.

Results:

The following materials were used in this study:

- data base in Microsoft Access (Aguiar, 2002);
- PETROBRAS acoustic emission results.

Data base allowed the use of the same information that are used by inspection team to make decisions related to operational continuity of inspected equipments in a refinery. Beyond of geometrical and fabrication characteristics, the data base has NDT results after acoustic emission test. NDT results were used to establish relationship between acoustic emission and fracture mechanics.

Acoustic emission tests in the Brazil market are made with MONPAC criteria. This criterion developed by MONSANTO and Physical Acoustics Corporation – PAC involves data collection, data analysis in controlled condition of pressurization and set-up of instrumentation. During the data analysis, two parameters are determined: historic index and severity. Historic index parameter is related with the activity during the acoustic emission test and the severity parameter is related with the acoustic emission signal intensity. Results interpretation are make easy by means of charts with five distinct areas that represents the action that the owner of component in test should do. Figure 1 shows a typical acoustic emission data analysis with MONPAC criteria. In this chart the values obtained for historic index and severity in each sensor are plotted. The chart is divided in six regions: no significant emissions, A, B, C, D and E. The actions are described in table 1. Results classified, as D or E requires NDT to discontinuities sizing that could be exist.

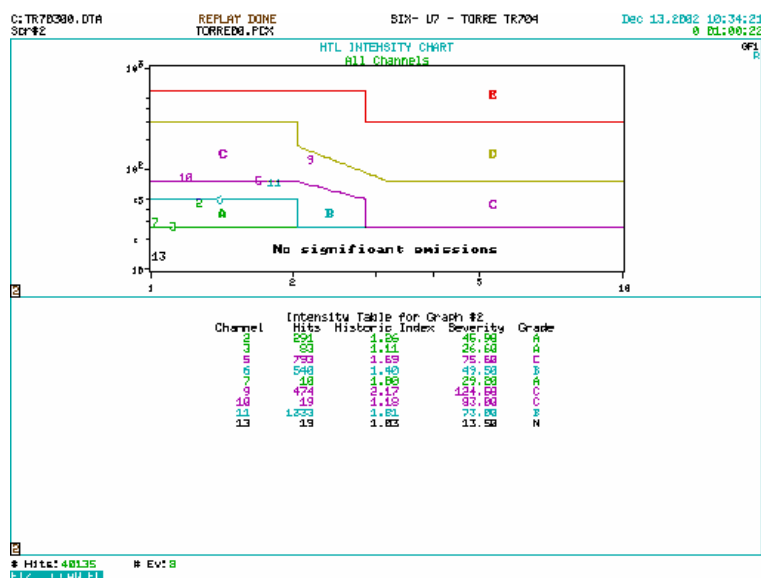


Fig. 1 – Exemplo típico de gráfico do critério MONPAC.

Table 1 - Active area classification

Intensity	Color	Action
<i>No significant emissions</i>	Black	No action
A	Green	No action
B	Blue	Record as a reference to future inspection.
C	Pink	Attention level, recommendation to decrease inspection interval.
D	Yellow	Presence of defects, apply NDT.
E	Red	Presence of significative defects, apply NDT.

When discontinuities are detected, fracture mechanics algorithms are used to evaluated the discontinuities criticality to make a decision of keep or not the operation of component.

This study evaluates the existence of relationship between acoustic emission exam, non destructive testing and fracture mechanics for metallic equipments submitted to internal pressure, at oil industry.

Discussion:

Database has 210 tests. Table 1 shows that equipment classifies as “E” are the most critical to safety operation. Database analysis selected 21 equipments with “E” classification. Table 2 shows summarize the data collected in 18 equipments.

Table 2 - Equipments classifieds as “E” by acoustic emission testing

Type and equipment code	NDT	Discontinuity sizing		
Sphere (008)	VT, PT, MT e UT	380 mm superficial, LF, DL		
Column (030)	UT	SI, LP		
Column (032)	UT	LF		
Column (035)	MT	0 (zero)		
Column (038)	VT, MT	Leakings, 0 (zero)		
Column (039)	UT	LP		
Column (046)	MT, UT	LP		
Pressure vessel (050)	MT, UT	SI		
Pressure vessel (061)	MT, UT	10 mm		
Pressure vessel (132)	MT, UT	TC, LC, HIC		
Pressure vessel (133)	MT, UT	TC, LC		
Pressure vessel (134)	MT	TC, LC		
Reactor (155)	None	None		
Reactor(166)	UT, VT, MT	Crack		
Pressure vessel (1203)	PT, UT, MT	Type	Lenght	Depth
		Cracks	60, 5 and 11 mm	> 2 mm
		Cracks	20 mm	3,2 mm
		Cracks	60 mm	
		LF	210, 280 and 45 mm	
Pressure vessel (1206)	None	None		
Heat exchanger (1207)	RT	LP, PO, LF		
Piping (1219)	VT	0 (zero)		
Note: DL (delamination), HIC (hydrogen induced cracking), LF (lack of fusion), LC (longitudinal crack), LP (lack of penetration), MT (magnetic particle), PO (porosity), PT (penetrant testing), RT (radiographic testing), SI (slag inclusion), TC (transversal crack), UT (ultrasonic testing), VT (visual testing).				

Table 2 presents that 81% of equipments classified as “E” has discontinuities. Spheres, pressure vessels, reactors and heat exchanger when inspected shown discontinuities. Piping system did not shown discontinuities.

Quantitative analysis needs information about: material, thickness, geometry, heat treatment, hydrostatic test pressure, maximum work pressure and temperature. This information was obtained from database.

Only three equipments showed in table 2 has discontinuities sizing. The total of discontinuities with sizing in “E” classification were six. From six discontinuities only two has height sizing. Height sizing, when not provided, were set-up to 2 mm for superficial discontinuities and the value of ultrasonic reference reflector (according to ASME) for internal discontinuities.

Table 3 shows the equipments evaluated by fracture mechanics and parameters used in fracture mechanics algorithms. The equipments were evaluated in static condition according to BS 7910 level 2.

Table 3 - Equipments evaluated by fracture mechanics

Type and equipment code	Parameters						
	Material	Height (mm)	Length (mm)	Thickness (mm)	Section dimension (mm)	Membrane Stress (MPa)	Heat treatment condition
Sphere (008)	ASTM A515 Gr70	2	380	64,6	4000	126	Treated
Pressure vessel (061)	ASTM A515 Gr70	2	10	44,5	5000	157	Treated
Pressure vessel (1203)	ASTM A516 Gr70	3,8	60,5	111	10868	141	treated
		2	11				
		3,2	20				
		2	60				
		2	210				
		3,9	280				
		2	45				

Table 4 shows the mechanical property values used for perform the analysis.

Table 4 - Mechanical properties

Material	Mechanical properties		
	Yield stress limit (MPa)	Strength stress limit (MPa)	Toughness fracture K (MPa.m ^{0,5})
ASTM A515 Gr70	256	483	80
ASTM A516 Gr70	256	483	80
ASTM A204 Gr.A	255	448	80
ASTM A285 Gr.C	205	380	80

Parameters showed in table 3 and 4 are inputs for build a FAD (Failure Assessment Diagram) diagram showed in figure 2. Table 5 shows FAD results for analyzed equipments. Geometrical place for K_r e L_r provide information about the probable failure mode. The left side of diagram represents collapse mode, and the right side of diagram represents catastrophic mode. Discontinuities that, after calculus, were into the figure ($K_r < 1,0$ and $L_r < 1,55$, figure 2) are acceptable, instead of it are unacceptable. Parameter “safety margin” show us the distance between geometrical place and FAD curve. Values below 1 identify critical situations where the failure could happen, value close to 1 identify situation close to failure and values higher and far from 1 identify comfortable structural situations.

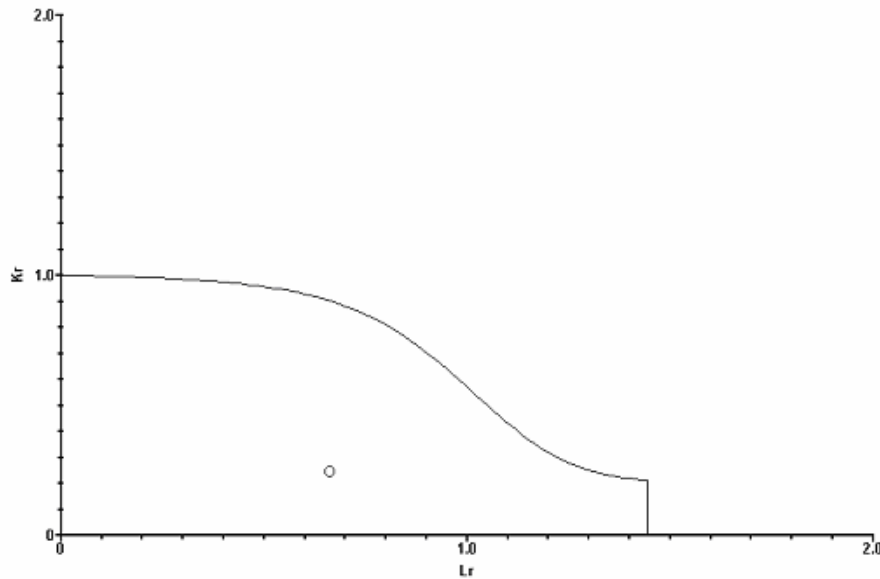


Fig. 2 – Typical FAD diagram.

Table 5
FAD results

Equipment	Values			
	Activation (%)	Kr	Lr	Safety margin
Sphere (008)	10	0,235	0,591	1,994
Pressure vessel (061)	71	0,232	0,736	1,669
Pressure vessel (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

The same analysis showed in the previous pages were performed for the class no significant, A, B, C and D. The tables were not showed in function of the maximum number of pages of the article. Analysis could be done considering the amount of equipments with or without discontinuities, type of equipment or fracture mechanics results.

Figure 3 shows the general result by classification grade.

The inflexion noted in class “B” could be explained by small amount of complimentary inspection performed in this class of equipments.

Figure 4 shows the results of comparison between MONPAC criteria and fracture mechanics.

There isn’t a clear separation between geometrical place of critical grades (“E” and “D”) and the other grades (“A”, “B” and “C”). This could be explained by small amount of available values for equipments classified as “A”, “B” and “C”.

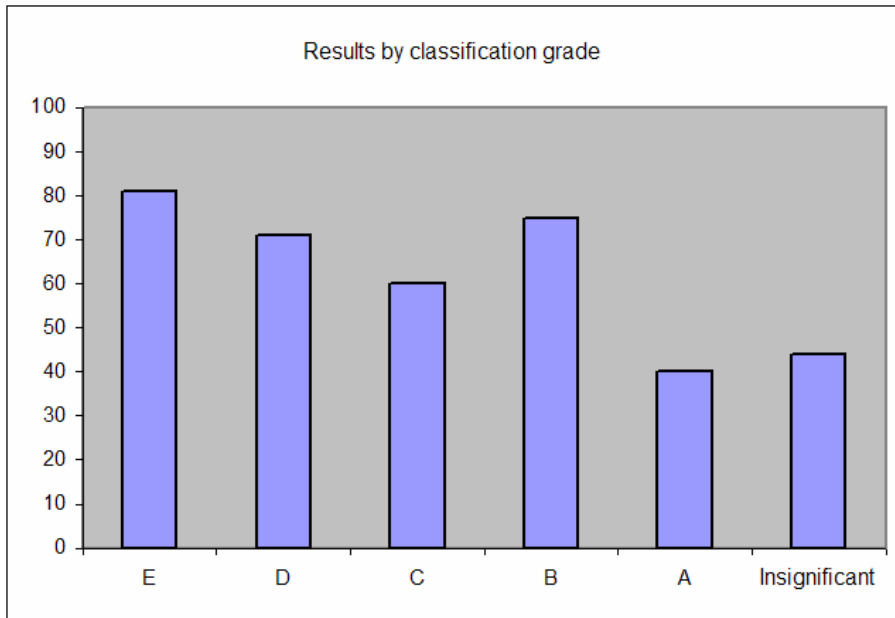


Fig. 3 – Results of inspected equipments by classification grade.

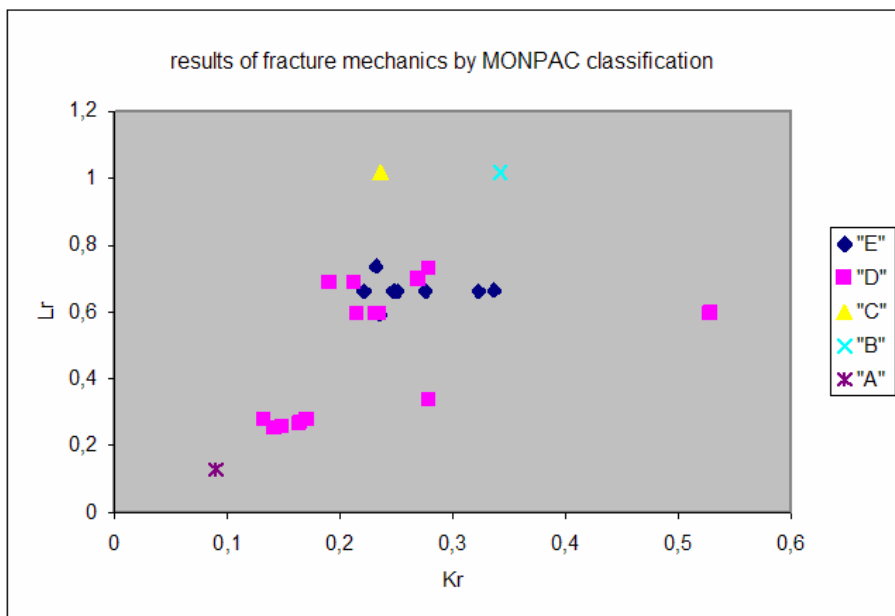


Fig. 4 – Comparison between MONPAC criteria and fracture mechanics.

Table 6 shows the amount of equipment qualitatively analyzed. Only spheres and pressure vessels has results in all categories of MONPAC criteria. Table 7 shows the results of discontinuities presence or not.

Figures 5a and 5b shows the result by MONPAC criteria for spheres and pressure vessels, respectively. There is a relationship between MONPAC criteria and presence of discontinuities for pressure vessels.

Figure 6 shows the result of comparison between MONPAC criteria and fracture mechanics for spheres. Figure 7 shows the result of comparison between MONPAC criteria and fracture

mechanics for pressure vessels. There is a crescent gradation, in pressure vessels results, from “A” to “E” when fracture mechanics concepts are used.

Table 6
Equipments qualitatively analyzed

Grade	Sphere	Column	Pressure vessel	Reactor	Heat exchanger	Piping	Collector	Boiler
E	1	6	6	1	1	1		
D	5		10	7			1	
C	4	1	7	2	1			
B	3		1					
A	5	1	4					
No significant	6		6	2	1	3		1

Table 7
Percentage of discontinuity presence by equipment type and MONPAC criteria

Grade	Sphere	Column	Pressure vessel	Reactor	Heat exchanger	Piping	Collector	Boiler
E	100	67	100	100	100	0		
D	80		70	86			100	
C	100	0	57	50	0			
B	100		0					
A	60	0	25					
No significant	67		17	0	0	67		100

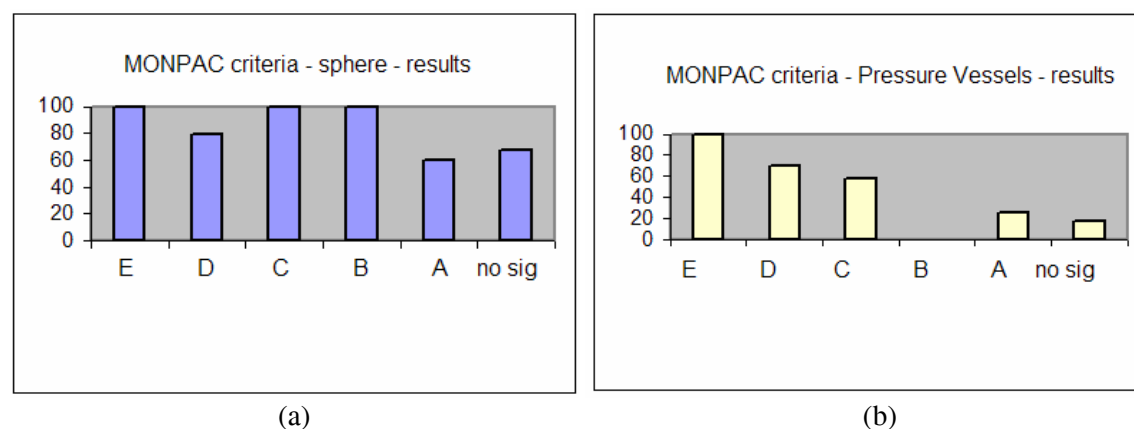


Fig. 5 – MONPAC criteria results of inspected equipments: (a) spheres; (b) pressure vessels.

Conclusions:

The collected data in 210 equipments tested by acoustic emission into the PETROBRAS system analysed and presented in this article allows the following conclusions.

There is a relationship between MONPAC criteria and presence of discontinuities. Almost all equipments classified as “E” had discontinuities and less than 50% of equipments classified as “A” had.

There isn’t a clear separation between MONPAC classes. The small amount of data in class “B” and “C” could be the reason for this result.

There is a quasi-linear relationship between acoustic emission and fracture mechanics for inspections performed in pressure vessels.

Acoustic emission technique has better results when pressure vessels are been inspected. Acoustic emission technique could be used as a screening technique to select areas for complimentary inspection.

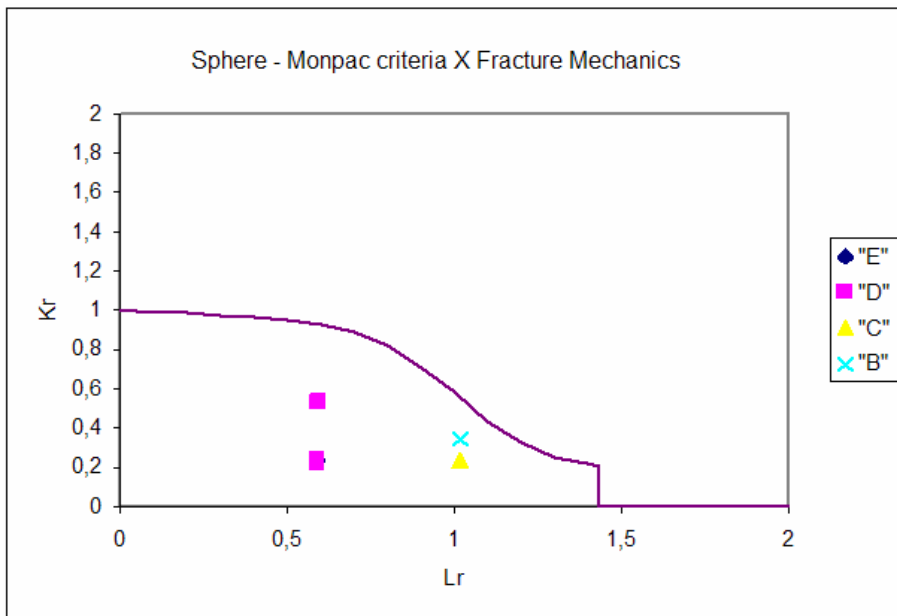


Fig. 6 – Comparison between MONPAC criteria and fracture mechanics for spheres

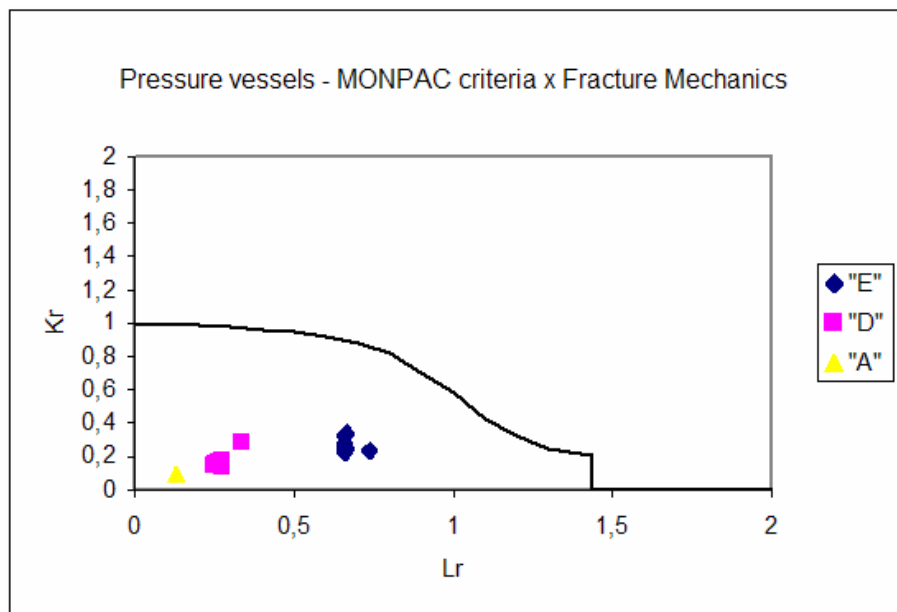


Fig. 7 – Comparison between MONPAC criteria and fracture mechanics for pressure vessels.

References:

Aguiar, Juliano, Tesser, Juliano, Report of PETROBRAS database inquire, University Federal of Ceará, Center of Technology, Departament of Mechanical Engineer, 2002.

Soares, Sergio Damasceno, Database of Acoustic Emission Testing at PETROBRAS System – Analyses and obtained results, INSPEQ 2, PETROBRAS, São José dos Campos, Brazil, 2004.