



**Marco Antonio Costa da Silva**

**Caracterização do Sinal Gráfico de  
Emissão Acústica (EA) para Avaliação de  
Integridade Estrutural do Aço ASTM A 516 /  
A 516 M - Grau 60**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Orientador: Prof. Sidnei Paciornik

Rio de Janeiro

Dezembro de 2010



**Marco Antonio Costa da Silva**

**Caracterização do Sinal Gráfico de  
Emissão Acústica (EA) para Avaliação de  
Integridade Estrutural do Aço ASTM A 516 /  
A 516 M - Grau 60**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Profº. Sidnei Paciornik**

Orientador e Presidente

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC Rio

**Profº Alexandre Queiroz Bracarense**

Co-Orientador

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

**Profº Roberto Ribeiro de Avillez**

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC Rio

**Profª Ivani de Souza Bott**

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC Rio

**Profº. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro Técnico Científico da  
PUC- Rio

Rio de Janeiro, 17 de dezembro de 2010.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Marco Antonio Costa da Silva**

Graduou-se em Técnico Mecânico, 1983 - UTRAMIG-MG, em Engenharia Mecânica, 1994 pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Trabalha na área de Qualidade e Engenharia desde 1985. Trabalhou na SMS Demag, Vallourec & Mannesmann Tubes e, atualmente, está trabalhando na Gerdau Aços Longos S. A. – Cosigua, na área de Engenharia e Investimentos.

#### Ficha Catalográfica

Silva, Marco Antonio Costa da

Caracterização do sinal gráfico de emissão acústica (EA) para avaliação de integridade estrutural do aço ASTM A 516 / A 516M – Grau 60 / Marco Antonio Costa da Silva; orientador: Sidnei Paciornik. – 2010.

108 f.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Materiais, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de materiais – Teses. 2. Manutenção preditiva. 3. Integridade estrutural. 4. Ensaios não destrutivos. 5. Emissão acústica. I. Paciornik, Sidnei. II. Paciornik, Sidnei. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. III. Título.

CDD: 620.11

*A Deus, a meus pais, a minha “Preta”, aos meus amigos Alexandre Queiroz Bracarense, Sidnei Paciornik, Roberto de Avillez, Nilton da Silva Maia, Nestor Carlos de Moura e Marco Aurélio Luzio.*

## Agradecimentos

A Deus e a toda espiritualidade amiga pela oportunidade de poder estar aqui, pelas bênçãos recebidas em cada instante da minha vida e por mais este sonho realizado.

Aos meus pais, Timóteo e Gabriela, pela simplicidade, formação, educação e atenção.

A Aline, minha “Preta”, que desde o primeiro momento foi a minha maior fonte de inspiração, ponto de equilíbrio, incentivo e colaboradora incansável na conclusão deste trabalho.

Aos meus filhos Breno e Felipe pelo carinho e amor incondicional, minhas fontes de estímulo e motivação incansável na luta para conclusão deste trabalho.

Ao meu amigo, orientador e professor Dr. Sidnei Paciornik pelo apoio incondicional, pela orientação, serenidade e por compartilhar os seus conhecimentos, sua perseverança, seriedade e compreensão para reinício e conclusão deste trabalho.

Ao meu amigo, co-orientador e professor da UFMG Dr. Alexandre Queiroz Bracarense, pelo exemplo de dedicação, determinação e seriedade. Grande motivador e sempre solidário nos momentos difíceis e de desânimo.

Aos amigos da Pós-Graduação de Engenharia de Materiais – DEMa da PUC-Rio, em especial ao amigo e professor Dr. Roberto de Avillez pelo apoio, seriedade e incentivo para reinício e conclusão deste trabalho. Muito obrigado por tudo!!!

Ao Diretor Executivo da Gerdau Aços Longos S.A. - Cosigua o Sr. Nestor Mundstock pela confiança, reconhecimento e oportunidade dada para conclusão deste trabalho. Obrigado pela confiança!

Aos colegas da Gerdau Aços Longos S.A. - Cosigua, em especial ao senhor Joaquim Lopes Costa Júnior – Gerente da Engenharia, pela compreensão, paciência e apoio para continuidade e conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos Nilton Maia e Nestor Carlos de Moura, pela paciência, amizade e companheirismo durante todas as etapas de desenvolvimento deste trabalho, desde a revisão bibliográfica até aos resultados finais do procedimento experimental

Aos amigos da PASA, em especial aos senhores Pedro Feres, Marco Aurélio Luzio, Amaury Firmino e Andreas Wende, pelo apoio e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Luiz César da Petrobrás - Sequi, João Antônio Conte da Abende, Maria Izabel da Metal Check e Ricardo Caldeira do ISQ, pelo apoio neste trabalho.

A todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

“O essencial das coisas é invisível, é com o coração que se vê corretamente”.

“Faça o necessário, depois o possível, e de repente você estará fazendo o impossível”.

“O desejo mede os obstáculos; à vontade os vence”.

E finalmente: “AS NEVER, DON`T EVER GIVE UP !”.

## Resumo

Silva, Marco Antônio Costa da; Paciornik, Sidnei (Orientador). **Caracterização do Sinal Gráfico de Emissão Acústica (EA) para Avaliação de Integridade Estrutural do Aço ASTM A 516 / A516 M – Grau 60.** Rio de Janeiro, 2010. 108p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A manutenção não é mais vista apenas como uma geradora de custos para as empresas. Cresce a necessidade das empresas em redução de custos, aumento de disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos e instalações, e é neste sentido que a manutenção tem se destacado, cada vez mais, como uma área fundamental para o sucesso das empresas que tem forte base industrial. No entanto, a manutenção teve uma grande evolução tecnológica, principalmente dentro dos conceitos da manutenção preditiva, onde se busca o desenvolvimento de novas técnicas para avaliação de integridade dos equipamentos, a sua condição de operação. A emissão acústica é uma destas técnicas. No presente trabalho utilizou-se o ensaio de tração para gerar estímulo estrutural em corpos de provas de aço ASTM A 516 / A 516 M-Grau 60 e gerar de sinais de emissão acústica. Durante os níveis de carregamentos em patamares previamente estabelecidos no procedimento experimental, os corpos de provas foram monitorados através do ensaio de emissão acústica, para a avaliação de sua integridade estrutural. Os resultados foram então digitalizados, armazenados e processados para posterior análise. Concluiu-se que é possível utilizar o ensaio de emissão acústica para avaliação de integridade estrutural dos equipamentos em serviço, sendo o mesmo capaz de perceber, detectar e localizar fontes ativas que possam comprometer a integridade estrutural do equipamento. Desta forma é possível programar uma intervenção da equipe de manutenção no equipamento, sem atingir um nível de danos que possam provocar sua parada e, conseqüentemente, do processo produtivo.

## Palavras-chave

Manutenção Preditiva, Integridade Estrutural, Ensaio Não Destrutivos, Emissão Acústica.

## Abstract

Silva, Marco Antônio Costa da; Paciornik, Sidnei (Advisor). **Characterization of Acoustic Emission (AE) Signal Graph for Evaluation Structural Integrity of Steel ASTM A 516 / A516 M – Grade 60**. Rio de Janeiro, 2010. 108p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Maintenance has not else been seen just as an expenses generator by worldwide companies. According to the importance it has taken on, new investments in technologies and tools were implemented. In companies, it increased the need of costs reduction, equipment and installation availability and reliability, and at this point, maintenance has stood out, each day more, as a fundamental area for success of those companies who have strong and large industrial bases. However, maintenance had a big technological improvement, mainly in predictive maintenance concepts, subject which always work in order to the development of new technologies and methodologies, and also new techniques for equipment integrity evaluation, on operational conditions. Therefore, in this Dissertation, tests were carried out in several specimen (ASTM A 516 / A 516 M - Grade 60 Steel), using tension test as loading conditions, to stimulate the specimen structurally, and consequently, the generation of acoustics emission signals. The specimen were monitored through acoustics emission tests, in each loading steps previously established, for their structural integrity evaluation. Than, the results were digitalized, stored and processed in the Acoustics Emission Equipment, for further analysis. All the results are presented as a graph, and also were studied, analyzed and compared. We can conclude that it is possible to use the acoustics emission test for structural integrity evaluation in “equipment under working conditions”, and it is capable to realize, detect and locate active sources, that can be compromising to the equipment structural integrity, and also capable of make possible an maintenance team intervention, without causing premature failures which provoke breakdowns.

## Keywords

Predictive Maintenance, Structural Integrity, Non-Destructive Testing and Acoustics Emission.

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVO .....	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1. O Ensaio de Emissão Acústica .....	24
3.1.1. Aplicações do Ensaio de Emissão Acústica .....	27
3.1.2. Fontes de Emissão Acústica .....	28
3.1.3. Forma e Propagação de Onda de Emissão Acústica.....	34
3.1.4. Comportamento dos Sinais de Emissão Acústica – Controle da Carga e Carregamentos Repetidos .....	39
3.2. Equipamento e Acessórios de Emissão Acústica .....	43
3.3. Calibração do Equipamento de Emissão Acústica .....	48
3.4. Processamento do Sinal de Emissão Acústica.....	49
3.5. Planejamento para Realização do Ensaio de Emissão Acústica.....	52
3.5.1. Tensionamento do Vaso de Pressão.....	53
3.5.2. Redução de Ruído.....	53
3.5.3. Frequência do Sensor.....	54
3.5.4. Montagem do Sensor.....	54
3.5.5. Localização das Fontes de Emissão Acústica.....	55
3.5.6. Espaçamento Entre Sensores para Localização Zonal.....	55
3.5.7. Espaçamento Entre Sensores para Algoritmos de Localização de Fonte.....	56
3.5.8. Equipamento e Material.....	56
3.5.9. Calibração do Sistema no Local.....	57
3.5.10. Procedimento de Ensaio.....	58
3.5.11. Critério de Avaliação.....	61
3.5.12. Documentação.....	62
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	64
4.1. Introdução.....	64
4.2. Material.....	65
4.3. Equipamentos Utilizados no Experimento .....	68
4.3.1. Equipamento de Ensaio por Emissão Acústica .....	68
4.3.2. Máquina Servo-Hidráulica INSTRON 8802 .....	70
4.4. Preparação Para Realização do Experimento .....	70
4.4.1. Montagem e Fixação dos Corpos de Prova na Máquina INSTRON.....	72
4.4.2. Montagem, Fixação e Posicionamento dos Sensores de Emissão Acústica.....	73
4.4.3. Verificação do Desempenho de Todo o Sistema de Medição .....	74
4.4.4. Parametrização dos Equipamentos Utilizados no Experimento .....	78
4.4.5. Seqüência de Aplicação dos Carregamentos .....	78
5. RESULTADOS E ANÁLISE.....	81
5.1. Resultados do Teste de Sensibilidade e Verificação dos Níveis de Ruído nos Patamares de Carregamento.....	81

5.2. Comparação entre os Resultados dos Ensaios de Emissão Acústica e Gráficos de Força Versus Alongamento (Ensaio de Tração) .....	83
6. CONCLUSÕES.....	93
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	94
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	95
ANEXO 1 – TERMINOLOGIA PADRÃO UTILIZADA EM EMISSÃO ACÚSTICA.....	98
ANEXO 2 – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR R80 – SN 494.....	107
ANEXO 3 – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR R80 - SN 495 .....	108

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Princípio Básico do Método de Emissão Acústica [13], [29].....	25
Figura 3.2: Variação de Emissão Acústica Com Tensão e Deformação em um Cristal Único de Alumínio de Alta Pureza Sob Deformação de Tração Uniaxial, Com Taxa de Deformação Constante [23], [32].....	31
Figura 3.3: Escala do Tamanho Físico dos Danos e Intensidade dos Sinais de Fontes de Emissão Acústica [32]. .....	32
Figura 3.4: Características das Fontes de Emissão Acústica [32]: (A) Deslocamento da Posição X Tempo; (B) Velocidade / Tensão X Tempo .....	35
Figura 3.5: Características dos Parâmetros Retirados da Forma de Onda [30], [32]. .....	36
Figura 3.6: Emissão Acústica Versus Carga [32].....	399
Figura 3.7: Diagrama Contendo Efeito Kaiser, Felicity e Sinais de Emissão Acústica Durante o Carregamento e Estabilização da Carga [30], [32].....	41
Figura 3.8: Diagrama Resumido Contendo Efeito Kaiser, Dunegan, Felicity e Razão Felicity [32] .....	42
Figura 3.9: Equipamento e Acessórios de Emissão Acústica [31]: (A) Sensores; (B) Pré-Amplificadores; (C) Placa Microprocessada para 4 Canais; (D) Pc Computador; (E) Equipamento De Emissão Acústica – Spartam 2000; (F) Monitor Colorido; (G) Teclado; (H) Cabos Coaxiais de Conexão dos Sensores; (I) Mouse e (J) Lapiseira 0,3 Mm.....	44
Figura 3.10: Diagrama Esquemático de Construção Típica de um Sensor Ressonante [23], [32].....	46
Figura 3.11: Amplificador .....	48
Figura 3.12: Diagrama Esquemático de Blocos de um Sistema Genérico de Emissão Acústica: (A) Sensor, (B) Pré-Amplificador com Filtro, (C) Amplificador Principal, (D) Circuito De Medição, (E) Processador Principal dos Sinais, (F) Disco Rígido, (G) Microcomputador, (H) Teclado, (I) Monitor e (J) Impressora [7], [9], [23], [32].....	51
Figura 3.13: Exemplo da Seqüência de Carregamento para Ensaio de Vaso de Pressão [2], [5], [7], [9], [23], [31]. .....	60
Figura 4.1: Vista de todo Equipamento Utilizado nos Ensaios: (A) Equipamento de Emissão Acústica; (B) Máquina Instron 8802 .....	64

Figura 4.2: Características Dimensionais dos Corpos de Prova [16].	67
Figura 4.3: Equipamento de Ensaio por Emissão Acústica: (A) Placa com dois Canais, (B) Sensores, (C) Pré-Amplificadores, (D) Cabos de Ligação do Sensor ao Pré-Amplificador, (E) Cabo de Ligação do Pré-Amplificador ao Equipamento, (F) Cabo de Alimentação, (G) Processador de Sinal e Amplificadores Principal (Internos No Equipamento), (H) Monitor, (I) Equipamento de Gravação (Disco Rígido Interno), (J) Teclado, (K) Mouse, (L) Graxa de Silicone, (M) Lapiseira 0,3 mm com Grafite de Dureza 2h e (N) Fita Crepe para Fixação dos Sensores.	69
Figura 4.4: Montagem e Fixação do Corpo de Prova.	72
Figura 4.5: Montagem, Fixação e Posicionamento dos Sensores: (A) Sensor 1, (B) Sensor 2, (C) Corpo de Prova.	73
Figura 4.6: Posições da Quebra do Grafite $\varnothing$ 3,0 mm, Dureza 2H para Calibração do Sistema.	75
Figura 4.7: Forma Ilustrativa das Posições da Quebra do Grafite $\varnothing$ 3,0 mm, Dureza 2h: (A) Ponto Central Entre Sensores; (B) A 20 Mm do Sensor 1; (C) A 20 mm do Sensor 2.	75
Figura 4.8: Curva Característica de Atenuação do Corpo de Prova Cp 01.	76
Figura 4.9: Curva Característica de Atenuação do Corpo de Prova Cp 02.	76
Figura 4.10: Curva Característica de Atenuação do Corpo de Prova Cp 04.	77
Figura 4.11: Curva Característica de Atenuação do Corpo de Prova Cp 05.	77
Figura 4.12: Sequência de Aplicação dos Carregamentos no Ensaio de Tração...	80
Figura 5.1: Resultados do Ensaio CP01: Resultado de Emissão Acústica (a e b); Resultado do Ensaio de Tração (c).	85
Figura 5.2: Foto do Corpo de Prova CP01: (A) Identificação do Alongamento; (B) Identificação da Área de Estricção e Local de Ruptura.	86
Figura 5.3: Resultados do Ensaio CP02: Resultado de Emissão Acústica (a e b); Resultado do Ensaio de Tração (c).	87
Figura 5.4: Foto do Corpo de Prova CP02: (A) Identificação do Alongamento; (B) Identificação da Área de Estricção e Local de Ruptura.	88
Figura 5.5: Resultados do Ensaio CP04: Resultado de Emissão Acústica (a e b); Resultado do Ensaio de Tração (c).	89
Figura 5.6: Foto do Corpo de Prova CP04: Identificação do Alongamento; (B) Identificação da Área de Estricção e Local de Ruptura.	90

Figura 5.7: Resultados do Ensaio CP05: Resultado de Emissão Acústica (a e b); Resultado do Ensaio de Tração (c)..... 91

Figura 5.8: Foto do Corpo de Prova CP05: (A) Identificação do Alongamento; (B) Identificação da Área de Estricção e Local de Ruptura . ..... 92

Figura 5.9: Foto Comparativa do Alongamento, Área de Estricção e Local de Ruptura dos Corpos de Prova: (A) CP01; (B) CP02; (C) CP04; (D) CP05. .... 92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Comparação do ensaio de emissão acústica (EA) com outros métodos de ensaios não destrutivos (END) [23], [32].....	26
Tabela 3.2: Fatores que afetam a amplitude de respostas do sinal de emissão acústica.....	34
Tabela 3.3: Técnicas de localização das fontes de emissão acústica [32].....	38
Tabela 3.4: Exemplo de critério de avaliação para localização zonal [2].....	62
Tabela 4.1: Composição química do aço ASTM A 516 / A516 M – Grau 60 [14].....	66
Tabela 4.2: Propriedades mecânicas do aço ASTM A 516 / A516 M – Grau 60 [14].....	66
Tabela 5.1: Valores de leitura do limite de referência e resultados do teste de sensibilidade do 1º ao 9º Patamar.....	82