



Marcelo Gomes Farinhas

**Análise da Falha de um Sonotrodo para
Corte de Borracha**

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 Química e de Materiais do Centro Técnico e Científico da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

Rio de Janeiro
Setembro 2015



Marcelo Gomes Farinhas

**Análise da Falha de um Sonotrodo Para
Corte de Borracha**

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 Química e de Materiais do Centro Técnico e Científico da PUC-Rio. Aprovada pela comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marcos Venicius Soares Pereira
Orientador e Presidente
Departamento de Engenharia Química e
de Materiais – PUC Rio

Prof. Fathi Aref Ibrahim Darwish
Universidade Federal Fluminense – UFF

Dr. Arnaldo Freitas Camarão
SAE Brasil

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial de Pós-Graduação do
Centro Técnico Científico da PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de setembro de 2015.

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

Marcelo Gomes Farinhas

Graduou-se em engenharia elétrica na Universidade Veiga de Almeida, no Rio de Janeiro em 1991. Atuou como PCP em indústria de fabricação de Material Elétrico e analista de contratos de fornecimento de cubículos e quadros elétricos na empresa Westinghouse do Brasil, Chefe de manutenção Central em indústria de fabricação de pneus empresa Michelin e professor de Eletrotécnica, Automação e Controle na Fundação de Apoio a Escola Técnica e no Instituto Federal do Rio de Janeiro IFRJ campus Paracambi.

Ficha Catalográfica

Farinhas, Marcelo Gomes

Análise da falha de um sonotrodo para corte de borracha / Marcelo Gomes Farinhas ; orientador: Marcos Venicius Soares Pereira. – 2015.

92 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 2015.

Inclui bibliografia

CDD: 620.11

A minha esposa Eliane, pelo amor e carinho;
As minhas filhas amadas Priscilla e Giselle
A minha mãe Maria do Carmo
Ao meu pai Manuel (*in memoriam*)
Aos meus sogros Genésio e Jovina (*in memoriam*)

Agradecimentos

A Deus.

Aos meus pais pela educação.

Ao professor Marcos Venicius Soares Pereira pelas orientações providenciais para a realização deste trabalho.

À CNPq, ao Instituto Federal do estado do Rio de Janeiro (IFRJ) e a Pontifícia Universidade Católica do estado do Rio de Janeiro (PUC-Rio) pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

A todos os professores e funcionários da PUC pelo apoio à pesquisa em especial ao professor Sidnei Paciornik do laboratório de imagens da PUC-Rio.

Aos Meus colegas da PUC-Rio.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

Ao Prof. Alzemiro da Empresa Miro Maquinas pelo apoio na fabricação dos corpos de prova sem os quais não teríamos conseguido realizar os ensaios deste trabalho.

Ao Prof. Cabral da empresa JFC que prestou assistência com os materiais indispensáveis a concretização desta pesquisa.

A Michelin pelo apoio e liberação de horário para a realização do curso de Mestrado.

Aos colegas da Michelin, Francisco, Marcelo Cardozo, Adacyl, que colaboraram ativamente na coleta de material e suporte para a fase experimental deste trabalho.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me ajudaram ou me estimularam na realização desta empreitada.

Resumo

Farinhas, Marcelo Gomes; Pereira, Marcos Venicius Soares. **Análise da Falha de um Sonotrodo para corte de Borracha**. Rio de Janeiro, 2015. 92p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os processos industriais de uma maneira geral são compostos de várias etapas que promovem a transformação de materiais, seja na sua forma primária, ou na forma de subprodutos, que vão posteriormente formar o produto final. Neste contexto, na indústria fabricação de pneus, existe uma etapa bastante específica que é o corte de borracha, etapa esta, que pode ser realizada de várias formas e técnicas sendo que uma delas, é o corte por ultrassom. Apesar do corte por ultrassom ser eficiente e proporcionar ao material um acabamento nas superfícies superior aos demais, os sistemas de corte por este método apresentam fraturas excessivas do componente que realiza o corte, chamado de sonotrodo. Neste trabalho, foram investigadas algumas das causas possíveis (causas raízes) para as falhas apresentadas pelos sonotrodos. O estudo envolveu a análise química qualitativa do material, a análise de tensões utilizando o método de elementos finitos, ensaios mecanográficos e caracterização mecânica do material. Os resultados obtidos permitiram a identificação do mecanismo de dano acumulado no componente durante sua vida em serviço, permitindo a indicação de possíveis causas raiz que levam o sonotrodo a falhar de maneira prematura.

Palavras-Chave

Corte; Ultrassom; Aço para lâminas; Material Polimérico.

Abstract

Farinhas, Marcelo Gomes; Pereira, Marcos Venicius Soares (Advisor). **Failure Analysis of a Sonotrode For Rubber Cut**. Rio de Janeiro, 2015. 92p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Industrial processes generally are comprised of several steps that promote the transformation of materials, whether in their primary form, or as by-products, which will subsequently form the final product. In this context, the tire manufacturing industry, there is a very specific step is the cutting of rubber; this step can be performed in various ways and techniques one of which is the cutting by ultrasound. Although efficient cutting and the cut material presenting a finish of the cut surfaces higher than the other cutting systems ultrasound have excessive fractures component that performs cutting, called sonotrode. In this study, we investigated some of the possible (root cause) for failures made by sonotrode. The study involved a qualitative chemical analysis of the material, stress analysis using the finite element method, metallographic tests and mechanical characterization of the material. The results obtained allowed the identification of the accumulated damage mechanism in the component during its service life, allowing indication of possible root because that lead the sonotrode to fail prematurely.

Keywords

Cut; Ultrasound; Blade Steel; Polymer Material.

Sumário

1. Introdução	15
2. Revisão Bibliográfica	18
2.1 O ultrassom	18
2.1.1 Frequências Audíveis e inaudíveis	18
2.1.2 O Ouvido Humano	19
2.1.3 Princípios das Vibrações Mecânicas	19
2.1.4 Frequência Natural	23
2.1.5 Amortecimento ou Atrito Interno	25
2.1.6 Princípios da tecnologia ultrassônica de potência	27
2.1.7 Sintonia de Sonotrodos	28
2.1.8 O Dispositivo vibrante para corte por Ultrassom	29
2.1.9 Sonotrodo defeituoso	30
2.2. Fluorescência de Raios X	30
2.2.1 Dados Qualitativos XRF	34
2.2.2 Dados quantitativos XRF: calibrações e quantificação	34
2.2.3 Dados Semi-quantitativos XRF	35
2.3 Teoria de Elementos Finitos	36
2.3.1 O Software ANSYS	37
2.3.2 O Critério de Falha de Von Misses	38
2.3.3 Concentração de Tensão	41
2.3.4 Fator de concentração de Tensão para trincas elípticas	42
2.4 O Ensaio de Tração	43
2.5 O Ensaio de Impacto	44
2.5.1 Tipos de ensaios de impacto	45
2.6 Ensaio de dureza	46
2.6.1 Dureza Rockwell	47
2.7 Microestrutura dos aços	47
2.7.1 Microestrutura e fases	48
2.7.2 Martensita	49

2.8 Fadiga	50
2.8.1 Curva S-N	51
2.8.2 UHCF – Fadiga de Ultra Alto Ciclo	51
2.8.3 UHCF – Efeito da Frequência	52
3 Material e procedimento experimental	53
3.1 Material	53
3.2 Simulações pelo Método de Elementos Finitos	55
3.2.1 Geometria e posição de retirada dos corpos de prova	55
3.2.2 Corpos de prova para ensaio Tração	57
3.2.3 Corpo de prova para ensaio Charpy	58
3.3 Ensaio com Líquido Penetrante	58
3.4 Ensaio de Tração	61
3.5 Ensaio de Charpy	61
3.6 Caracterização da Microestrutura	61
3.7 Ensaio de Dureza Rockwell	62
3.8 Fractografia	63
4 Apresentação e discussão dos resultados	64
4.1 Resultados da Análise de XRF – Fluorescência de Raios X.	64
4.2 Resultados da Simulação por Elementos Finitos	65
4.2.1 Cálculo do Concentrador de Tensão	71
4.3 Resultados do ensaio de Líquidos Penetrantes	71
4.4 Resultados do ensaio de Tração	73
4.5 Resultados do ensaio de Charpy	74
4.6 Resultados do ensaio de Dureza	75
4.7 Resultados da Análise de Microestrutura	76
4.8 Resultados Análise Fractográfica	79
5 Conclusão	87
6 Referências bibliográficas	90

Lista de figuras

Figura 1- Campo de audibilidade das vibrações Mecânicas	18
Figura 2- O ouvido humano	19
Figura 3- Esquema representativo da frequência natural dos Materiais	21
Figura 4- Movimento harmônico	21
Figura 5- As componentes do movimento harmônico	22
Figura 6 – Amortecimento	24
Figura 7 – Histerese	26
Figura 8 - Conjunto Acústico	27
Figura 9 - Curva de impedância em função da frequência de um Transdutor	28
Figura 10 - Técnicas de usinagem para ajuste da frequência de operação dos sonotrodos	28
Figura 11 - Conjunto de corte por ultrassom	29
Figura 12 - Foto de um Sonotodo tipo Faca – Trinca, Utilizado para este estudo, indicada pelo circulo vermelho	30
Figura 13 - Processo de fluorescência	32
Figura 14 - Fluxo de análise de um sonotrodo utilizando o software ANSYS	38
Figura 15 - Circula de Mohr	40
Figura 16 – Tensor Cauchy	41
Figura 16- A – Parâmetros de geometria de uma trinca elíptica Ideal	42
Figura 17 - Desenho esquemático de um corpo de prova submetido à carga de tração	43
Figura 18 - Máquina para ensaio de impacto e os dois tipos de ensaios Charpy e Izod	46

Figura 18-A – Parâmetros que influenciam uma microestrutura	48
Figura 18-B – Organização dos átomos de ferro em função da temperatura	48
Figura 18-C – Diagrama ferro x carbono	49
Figura 18-D – Microestrutura Martensita	50
Figura 18-E – Curva S-N típica	51
Figura 19 – Desenho dimensional de um sonotrodo	53
Figura 20 – Ensaio de Fluorescência de raio X	54
Figura 21 – Retirada de espécimes no sentido da laminação	56
Figura 22 - Desenho esquemático da retirada dos <i>espécimes</i> da amostra da faca	57
Figura 23 - Geometria dos corpos de prova para o ensaio de Tração	58
Figura 24 - Geometria dos corpos de prova para o ensaio de Charpy	58
Figura 25 - Revelação dos defeitos com ensaio de Líquidos Penetrantes	59
Figura 26 - Ensaio de Líquidos penetrantes na faca sonotrodo	60
Figura 27 - Resultados da análise de XRF em espectrômetro da Bruker	64
Figura 28 - Sólido importado para o ANSYS	65
Figura 29 - Malha após a aplicação do comando Mesh	66
Figura 30 - Aplicação de apoio fixo na base do sonotrodo	67
Figura 31 - Aplicação de Força de 100N na face lado A do sonotrodo	68
Figura 32 - Aplicação de Força de 100N na face lado B do sonotrodo	68
Figura 33 - Resultado a simulação da ciclagem pelo critério de falha de Von Mises no ANSYS usando o módulo estrutural Estático	69
Figura 34 - Catálogo do Aço SAE 8550	70
Figura 35 - Corpos de prova retirados de um sonotrodo após	

ensaio de liquido penetrante	72
Figura 36 - Gráfico de tensão x deformação do ensaio de tração	73
Figura 37- Microestrutura do aço 8550 analise em microscópio óptico	77
Figura 38 - Microestrutura do aço 8550 analise em MEV 300x C4	77
Figura 39- Microestrutura do aço 8550 analise em MEV 1500x C4	78
Figura 40 - Microestrutura do aço 8550 analise em MEV 50 x C5 Área do entalhe e inicio da fratura	78
Figura 41 - Microestrutura do aço 8550 analise em MEV 1800x C5	79
Figura 42 - Medida do tamanho da trinca em microscópio Óptico Zeiss	82
Figura 43 - Região da trinca retirada da faca sonotrodo para realizar a abertura da trinca	82
Figura 44 - Imagem da amostra após a abertura da trinca pré-existente	83
Figura 45 - Inicio da fratura na região superior 50x	83
Figura 46 - Início da Fratura 16x	84
Figura 47 - Meio da fratura 115x	84
Figura 48 - Final da fratura 115x	85
Figura 49 - Transição final da fratura x rompimento da amostra	85

Lista de tabela

Tabela 1	
Energias (em keV) das transições K dos elementos de $23 < Z < 30$	33
Tabela 2	
Composição química característica do Aço estrutural SAE 8550	54
Tabela 3	
Medidas relativas ao modelo importado para o Software Ansys	65
Tabela 4	
Resultados de número de malhas e nós	66
Tabela 5	
Resultados do ensaio de tração	74
Tabela 6	
Resultados dos ensaios de Charpy	74
Tabela 7	
Resultados dos ensaios de Dureza	76

Lista de equações

Equação 1 Deslocamento de uma onda senoidal no tempo	22
Equação 2 Velocidade de uma onda senoidal no tempo	22
Equação 3 Aceleração de uma onda senoidal no tempo	22
Equação 4 Velocidade angular para os materiais naturais	22
Equação 5 Impedância acústica dos materiais	23
Equação 6 Frequência Natural dos materiais	24
Equação 7 Amortecimento	26
Equação 8 Integral de volume Método de elementos finitos	37
Equação 9 Volume total baseado no somatório dos volumes finitos simples	37
Equação 10 Tensor Tensão de Cauchy	39
Equação 11 Matriz do tensor tensão de Cauchy	39
Equação 11-A Concentrador de tensão	43
Equação 11-B Equação de Inglis	71
Equação 12 Média estatística	75
Equação 13 Desvio Padrão estatístico	75