



**Marcela Tatiana Fernandes Beserra**

**Radioscopia aplicada à melhoria de processos industriais de controle de qualidade na produção de calçados brasileiros**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Fernanda Maria Pereira Raupp

Rio de Janeiro  
Abril de 2012



**Marcela Tatiana Fernandes Beserra**

**Radioscopia aplicada à melhoria de processos industriais de controle de qualidade na produção de calçados brasileiros**

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

**Prof. <sup>a</sup> Fernanda Maria Pereira Raupp**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. Antonio Fernando de Castro Vieira**

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

**Prof. Mauricio Saldanha Motta**

Departamento de Mecânica – CEFET/RJ

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico e Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 abril de 2012

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

### **Marcela Tatiana Fernandes Beserra**

Graduou-se em Engenharia Elétrica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro e em Eletrônica com Licenciatura Plena pela FABES. Pós-graduada em Gerenciamento de Projetos pela Fundação Getúlio Vargas. Mestre em Radioproteção e Dosimetria pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Certificada pela CNEN como supervisora de Radioproteção nas práticas de Medidores Nucleares e Radiografia Industrial. Atua como consultora em projetos de Engenharia, Sistemas de Inspeção Não-Destrutiva (END) e Radioproteção em empresas nacionais e multinacionais. Atualmente é professora do Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro.

#### Ficha Catalográfica

Beserra, Marcela Tatiana Fernandes

Radioscopia aplicada à melhoria de processos industriais de controle de qualidade na produção de calçados brasileiros / Marcela Tatiana Fernandes Beserra ; orientadora: Fernanda Maria Pereira Raupp. – 2012.

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

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Calçados. 3. Radioscopia. 4. Raios X. 5. Controle de qualidade. 6. Indústria I. Raupp, Fernanda Maria Pereira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

## Agradecimentos

Agradeço à Deus por estar a meu lado sempre me ajudando a suportar todas as dificuldades, por me dar força e coragem em todos os momentos da minha vida.

A minha orientadora Fernanda Maria Pereira Raupp pelos conhecimentos transmitidos, compreensão, força e palavras de otimismo quando mais precisei durante a execução deste trabalho.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica, em especial ao Prof. DSc. Mauricio Saldanha, pela oportunidade e incentivo para que eu pudesse realizar mais um grande projeto na minha vida.

Ao Prof. M.Sc. Mauro Otto de Cavalcanti Mello Filho pelo apoio durante toda a pesquisa, críticas e auxílio na condução dos contatos com as empresas em apoio a pesquisa.

Ao Sr. Davide Baratto pelo suporte durante os ensaios no equipamento de Radioscopia, pela troca de experiências e incentivo para que eu desenvolvesse esta pesquisa.

As empresas RADIEND LTDA e NDB VISION LTDA pelo apoio financeiro nas viagens as indústrias, centro de pesquisas e congressos relacionados ao tema.

Aos professores e funcionários do DEI da PUC-Rio pelo conhecimento e apoio, em especial Claudia Teti e Ana pela atenção e orientações.

## Resumo

Beserra, Marcela Tatiana Fernandes; Raupp, Fernanda Maria Pereira. **Radioscopia aplicada à melhoria de processos industriais de controle de qualidade na produção de calçados brasileiros.** Rio de Janeiro, 2012.94p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Segundo os números do Ministério do Desenvolvimento e Indústria e Comércio Exterior, a China liderou nos últimos 5 anos o mercado brasileiro de importações de calçados, representando 70% do total importado. O Brasil vem registrando quedas nas exportações de calçados; em 2011 houve uma redução média de 21,5 % comparado ao ano de 2010. Desta forma, o Brasil passou a ocupar a oitava posição no mercado exportador. Além disso, os asiáticos vêm melhorando a qualidade e nível tecnológico de seus calçados para alguns nichos de mercado. Sabe-se que a introdução de novas tecnologias, novos processos e indicadores de controle de qualidade possibilita agregar valor nos arranjos produtivos locais brasileiros, tornando-os mais competitivos. Na dissertação é apresentado um estudo sobre o emprego da Radioscopia para a melhoria do controle de qualidade dos calçados brasileiros. Esta técnica traz uma inovação ao mercado calçadista brasileiro por ser um ensaio não destrutivo, fazendo uso de Raios X. A técnica já é utilizada por algumas indústrias internacionais, visando à identificação de corpos estranhos, controle de saltos, além de outros itens dos calçados. Esse estudo apresenta resultados imagens radiográficas encontradas em calçados, que culminou na proposta de uma metodologia para a aplicação da Radioscopia na melhoria do controle da qualidade na produção de calçados, empregando conceitos da Análise dos Modos e Efeitos de Falha (FMEA), respondendo, assim, a questão principal deste estudo: *como melhorar o controle de qualidade industrial aplicando a técnica da radioscopia na produção de calçados brasileiros?*

## Palavras-chave

Calçados; Radioscopia; Raios X; Controle de Qualidade; Indústria

## Abstract

Beserra, Marcela Tatiana Fernandes, Raupp, Fernanda Maria Pereira (Advisor). **Radioscopy applied to the improvement of industrial processes of quality control in the Brazilian footwear production.** Rio de Janeiro, 2012.94p.Master Thesis- Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

According to the Ministry of Development, Industry and Foreign Trade, China led in the last five years the footwear Brazilian market for imports, representing 70% of total imports. Brazil has been recording declines in footwear exports; in 2011 there was an average reduction of 21.5% compared to 2010. Thus, Brazil has moved to the eighth position in the export market. Moreover, Asians have been improving the quality and technological level of their footwear for some niche markets. It is known that the introduction of new technologies, quality controls and indicators allow adding value to local production arrangements in Brazil, making them more competitive. In this dissertation, a study on the use of Radioscopy to improve the quality control of Brazilian footwear is presented. This technique brings innovation to the footwear Brazilian market, since it is a non-destructive making use of X-ray. This technique is already used by some international industries, aiming at the identification of foreign bodies, control jumps, and other items of the footwear. This study culminated in the proposal of a methodology for the application of Radioscopy in the improvement of quality control of footwear production, employing concepts of Technical Analysis of the Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), answering the main question of this study: *how to improve the industrial quality control by applying the technique of Radioscopy in the production of Brazilian footwear?*

## Keywords

Footwear; Radioscopy; X-Rays; Quality Control; Industry

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Referencial Teórico.....</b>	<b>18</b>
2.1	A Indústria de Calçado Brasileira : Visão Geral.....	18
2.1.1	Material De Fabricação .....	18
2.2	Partes Do Calçado .....	19
2.2.1	Cabedal.....	21
2.2.2	Forro .....	21
2.2.3	Entressola .....	21
2.2.4	Solado.....	21
2.2.5	Talão .....	21
2.2.6	Palmilha .....	22
2.2.7	Contra-Forte.....	22
2.2.8	Gáspea .....	22
2.2.9	Avesso .....	22
2.2.10	Boca.....	22
2.2.11	Couraça .....	22
2.2.12	Salto.....	23
2.2.13	Alma De Aço .....	23
2.2.14	Sola Fina.....	23
2.2.15	Capinha Do Salto (Tacão).....	23
2.2.16	Componentes.....	23
2.3	Processos De Produção do Calçado.....	24
2.3.1	Design.....	25
2.3.2	Modelagem .....	25
2.3.3	Corte .....	25
2.3.4	Costura .....	26
2.3.5	Montagem .....	27
2.3.6	Acabamento.....	27
2.4	Cadeia Produtiva Do Calçado .....	27
2.5	A Inovação Tecnológica No Setor De Calçados.....	29
2.6	A Radioscopia Industrial.....	31
2.6.1	Sistema De Raios X .....	31
2.6.2	Blindagem para os raios x.....	35

2.6.3 Sistema motorizado e automatizado de movimentação.....	36
2.6.4 Sistema de detecção.....	37
2.6.5 Software- processador de imagens e banco de dados com computador dedicado .....	38
2.6.6 Sistema de visualização .....	39
2.6.7 Console de comando .....	39
2.7. Competitividade e Qualidade .....	39
2.8 Análise de modo e efeitos de falha (FMEA) .....	43
2.8.1 Tipos de FMEA .....	45
2.8.2 Etapas para o desenvolvimento de uma DFMEA .....	46
2.8.3 Etapas para o desenvolvimento de uma PFMEA .....	56
2.8.4 Plano de controle .....	60
<b>3 Metodologia.....</b>	<b>62</b>
3.1 Tipo de pesquisa.....	62
3.2 Etapas da pesquisa.....	63
<b>4 Controles de qualidade que podem ser adotados com o emprego da radioscopia industrial .....</b>	<b>65</b>
4.1 Controle de saltos em plástico injetado .....	65
4.2 Controle de presença e posição de incorreta de componentes no salto.....	66
4.3 Controle automático da presença e contagem de componentes.....	66
4.4 Verificação automática da ausência de objetos estranhos.....	67
4.5 Verificação correta de reforço (alma) em sapatos com saltos.....	68
4.6 Verificação de componentes dos artefatos .....	68
<b>5 Proposta de controle de qualidade em calçados de segurança empregando a técnica radioscópica baseada na FMEA.....</b>	<b>70</b>
5.1 Descrição do processo de fabricação de um calçado de segurança .....	72
5.2 Desenvolvimento da FMEA de processo: exemplificação .....	77
5.3 FMEA de processo e plano de controle (PQP): Exemplificação .....	79
<b>6 Análise das imagens radioscópicas realizadas em calçados brasileiros</b>	<b>81</b>
<b>7 Conclusões.....</b>	<b>88</b>
<b>8 Referências Bibliográficas .....</b>	<b>90</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1: Princípio de funcionamento da Radioscopia Industrial em calçados	15
Figura 2.1: Produção de Calçados em milhões de pares.	18
Figura 2.2: Partes componentes do calçado masculino	20
Figura 2.3: Partes componentes do calçado feminino	20
Figura 2.4: Partes componentes do calçado de segurança	20
Figura 2.5: Processos de Produção do Calçado	24
Figura 2.6: Fluxograma da Cadeia Produtiva de Calçados	28
Figura 2.7: Componentes de um tubo de raios X	32
Figura 2.8: Espectro de raios X de freamento com raios X característicos para vtagem de pico de 60, 90 e 120 kV.	34
Figura 2.9: Cabine Blindada	36
Figura 2.10: Ilustração dos detectores e o processador eletrônico de imagem.	37
Figura 2.11: Modelo de Planilha de Registros para FMEA de Projeto	48
Figura 2.12: Desenvolvimento do DFMEA e PFMEA	56
Figura 2.13: Fluxograma do Controle da Qualidade	61
Figura 4.1: Detecção do defeito porosidade ou falta de material	65
Figura 4.2: Detecção do correto posicionamento dos pregos no salto	66
Figura 4.3: Detecção do correto posicionamento da alma e contagem dos componentes do calçado (ilhoses).	66
Figura 4.4: Detecção automática de corpos estranhos no calçado	67
Figura 4.5: Detecção automática de corpos estranhos no calçado	67
Figura 4.6: Detecção automática das partes de segurança do calçado	68
Figura 4.7: Verificação correta de calçados ou artefatos em embalagens	69
Figura 4.8: Identificação e contagem de componentes em bolsas	69
Figura 5.1: Entradas e Saídas do Planejamento do Controle de Qualidade	71
Figura 5.2: Medida do Couro	72
Figura 5.3: Corte	72
Figura 5.4: Gravação CA	73
Figura 5.5: Pesponto	73
Figura 5.6: Fase intermediária	74
Figura 5.7: Montagem	74
Figura 5.8: Asperagem	75
Figura 5.9: Injeção do Solado	75

Figura 5.10: Acabamento.....	76
Figura 5.11: Conferência .....	76
Figura 5.12: Análise dos Potenciais Modo de Falha Potencial para o item de processo Montagem da Biqueira após a introdução da Técnica Radioscópica. ....	77
Figura 5.13: Análise dos Potenciais Modo de Falha Potencial – Diminuição do RPN. ....	79
Figura 5.14: Exemplificação de um Plano de Controle.....	80
Figura 6.1: Equipamento NDT SCANNER utilizado na inspeção dos calçados.	82
Figura 6.2: Imagem Radioscópica de metade de uma sola de calçado de segurança, sendo identificado a presença de porosidades .....	83
Figura 6.3: Imagem Radioscópica de uma sola completa de calçado de segurança, sendo identificada a presença de porosidades. ....	84
Figura 6.4: Imagem Radioscópica de um calçado completo de segurança, sendo identificado o desalinhamento do cabedal. ....	85
Figura 6.5: Imagem Radioscópica de um calçado completo de segurança, sendo identificado a existência da biqueira .....	86
Figura 6.6: Imagem Radioscópica de um calçado feminino, sendo identificado seus elementos de segurança.....	86
Figura 6.7: Imagem Radioscópica de um calçado feminino, sendo identificado a presença de porosidades no salto.....	87

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Indústria brasileira de calçados em números (2008 a 2010).....	13
Tabela 2.1: Tipos de Foco em Tubos de Raios X .....	34
Tabela 2.2: Conceitos de Qualidade, Confiabilidade e Falha .....	44
Tabela 2.3: Escala sugerida para avaliação da severidade do efeito de falha- DFMEA .....	51
Tabela 2.4: Escala sugerida para avaliação da ocorrência- DFMEA.....	52
Tabela 2.5: Escala sugerida para avaliação da detecção-DFMEA .....	54
Tabela 2.6: Escala sugerida para avaliação da severidade do efeito de falha- PFMEA .....	57
Tabela 2.6: Escala sugerida para avaliação da severidade do efeito de falha- PFMEA .....	58
Tabela 2.7: Escala sugerida para avaliação da ocorrência do efeito de falha- PFMEA .....	59
Tabela 2.8: Escala sugerida para avaliação da detecção da falha-PFMEA.....	59
Tabela 6.1: Característica do equipamento utilizado para inspeção.....	82

# 1 Introdução

A trajetória ascendente que a produção calçadista brasileira teve desde a década de 1960 se caracteriza pela produção em massa de modelos de baixo valor agregado. Como os volumes desse tipo de produto são muito elevados, a indústria calçadista nacional voltada à exportação adotou uma lógica fordista em suas instalações produtivas. Por outro lado, o crescimento do setor induziu a ampliação da rede de fornecedores de insumos, equipamentos e prestadores de serviços especializados na área calçadista, formando um aglomerado empresarial especializado no Brasil (Schmitz, 2002).

Usualmente denominados de clusters (Schmitz, 2002) ou de Sistemas Locais de Produção-SLPs (Garcia *et al.*, 2004), esses aglomerados empresariais em nível geográfico e setorial geraram uma estrutura que favoreceu as inter-relações no âmbito local, conferindo vantagens significativas às empresas inseridas em tais arranjos, comparadas com empresas dispersas geograficamente (Pereira, 2010). Essa organização da indústria de calçados conferiu ao Brasil uma posição de destaque internacional, sendo uma das mais bem organizadas do mundo, totalizando cerca 8.200 empresas em 2010 (ABICALÇADOS, 2012).

Segundo estatísticas do ano de 2010, o Brasil é o terceiro maior produtor de calçados, produzindo cerca de 894 milhões de pares, sendo que 143 milhões são exportados para mais de 150 países, colocando o país na oitava posição mundial neste mercado. Além disso, o Brasil é o quarto maior consumidor de calçados do mundo (ABICALÇADOS, 2012). Estes números traduzem um fator que vem impactando desfavoravelmente o mercado calçadista brasileiro: a entrada em grandes volumes de calçados asiáticos no Brasil e em países potencialmente consumidores dos produtos brasileiros. A Tabela 1.1 mostra os números da indústria de calçados brasileiros entre 2008 e 2010 (ABICALÇADOS, 2012).

Tabela 1.1: Indústria brasileira de calçados em números (2008 a 2010)  
 Fonte: ABICALÇADOS (2012)

Descrição		2008	2009	2010	% 2010/09	% 2010/08
Produção	Pares (Milhão)	816,0	813,6	893,9	9,9 %	9,6 %
	Valor (Milhão U\$\$)	10.233,2	9.457,6	12.340,4	30,5 %	20,6 %
Emprego	(Milhares)	306,6	319,2	348,2	9,2 %	13,7 %
Empresas	(Milhares)	8,1	7,9	8,2	4,1 %	1,1 %
Exportação	Pares (Milhão)	165,8	126,6	143,0	12,9 %	-13,8 %
	Valor (Milhão U\$\$)	1.881,3	1.360,0	1.487,0	9,3 %	-21,0 %
Importação	Pares (Milhão)	39,3	30,4	28,7	-5,5 %	-27,0 %
	Valor (Milhão U\$\$)	307,5	296,5	304,6	2,7 %	-0,9 %
Consumo Aparente	Pares (Milhão)	689,5	717,4	779,6	8,7 %	13,1 %
Consumo Per Capita	Pares	3,6	3,7	4,1	10,4 %	13,8 %
Índice de Volume de Vendas	Percentual (%)	4,8	-2,7	10,6		
Índice de Receita de Vendas	Percentual (%)	10,7	4,0	16,6		

A Tabela 1.1 mostra a indústria brasileira de calçados em números nos anos de 2008 a 2010. Os resultados mostram que no ano de 2010, comparado a 2008, houve uma redução de 13,8% no número de pares de calçados exportados. Além disso, houve uma redução de 21,0% do faturamento de exportações. Este cenário traz impactos significativos para um segmento de relevância econômica para o nosso país.

Os calçados brasileiros não são baratos como os fabricados pelos asiáticos e nem possuem os atributos (sofisticação, design e marca) dos calçados italianos. O crescimento da produção e da exportação chinesas vem acarretando um deslocamento desses fabricantes de mercados tradicionais para uma posição inferior. Isto porque, paulatinamente, os fabricantes chineses melhoram a qualidade de seus calçados, galgando nichos de maior preço médio, fazendo com que os fabricantes brasileiros se movam para segmentos de preço mais elevado (Campos e Calandro, 2009).

As fábricas brasileiras que produzem calçados “tipo exportação” para a Europa, por exemplo, estão mais atentas ao controle da qualidade de seus produtos, uma vez que a diferenciação pode se apresentar como a única estratégia prática para elas conquistarem espaço no mercado internacional.

Diante do exposto, é urgente a adoção de novas tecnologias e novos indicadores de controle que permitam agregar valor as linhas de produção de calçados dos arranjos produtivos locais brasileiros, tornando-os mais competitivos.

Neste sentido, esta dissertação vem apresentar um estudo para viabilizar o emprego da Radioscopia Industrial para a melhoria do controle de qualidade dos calçados. Esta técnica traz uma inovação ao mercado calçadista brasileiro por ser um ensaio não destrutivo (END).

Os ensaios não destrutivos (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificação dos mesmos, podendo ser executados nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção. Constituem uma das principais ferramentas do controle da qualidade de materiais e produtos, contribuindo para garantir a qualidade, reduzir os custos e aumentar a confiabilidade da inspeção. São largamente utilizados nos setores petróleo/petroquímico, químico, aeronáutico, automotivo, aeroespacial, siderúrgico, naval, eletromecânico, papel e celulose, entre outros. Ainda, contribuem para a qualidade dos bens e serviços, preservação da vida e do meio ambiente, sendo fator de competitividade para as empresas que os utilizam (ABENDI, 2011).

Os END incluem métodos capazes de proporcionar informações a respeito do teor de defeitos de um determinado produto, das características tecnológicas de um material, ou ainda, da monitoração da degradação em serviço de componentes e estruturas (ABENDI, 2011).

Particularmente, a Radioscopia é uma técnica de ensaio não destrutivo de objetos através de imagens geradas a partir de radiações ionizantes incidentes numa superfície detectora. O tipo de radiação empregada no ensaio abordado nesta dissertação é do tipo X, também conhecido como Raios X. Esta técnica é similar ao empregado em máquinas de inspeção de bagagens, por exemplo, em portos e aeroportos.

No segmento do couro, calçados e artefatos este ensaio permitirá o controle de qualidade dos produtos através da verificação de não conformidades, sem a necessidade de danificá-los, permitindo a inspeção de 100% dos itens produção ou de uma amostra.

Desta forma, a radioscopia industrial pode evitar prejuízos através da identificação prévia de defeitos que poderiam levar ao descarte de lotes inteiros de itens produzidos, e conseqüentemente pode reduzir o número de ações judiciais devido à insatisfação de consumidores. Esta técnica, bastante difundida em outros segmentos do setor produtivo, vem sendo utilizada por alguns fabricantes de calçados fora do Brasil como Itália, França e Japão (GILARDONI, 2011).

As indústrias que empregam a técnica de radioscopia utilizam este ensaio como um diferencial no controle da qualidade de seus produtos, que geralmente possuem um alto valor agregado. Na Figura 1.1 é apresentado o princípio de funcionamento desta técnica.

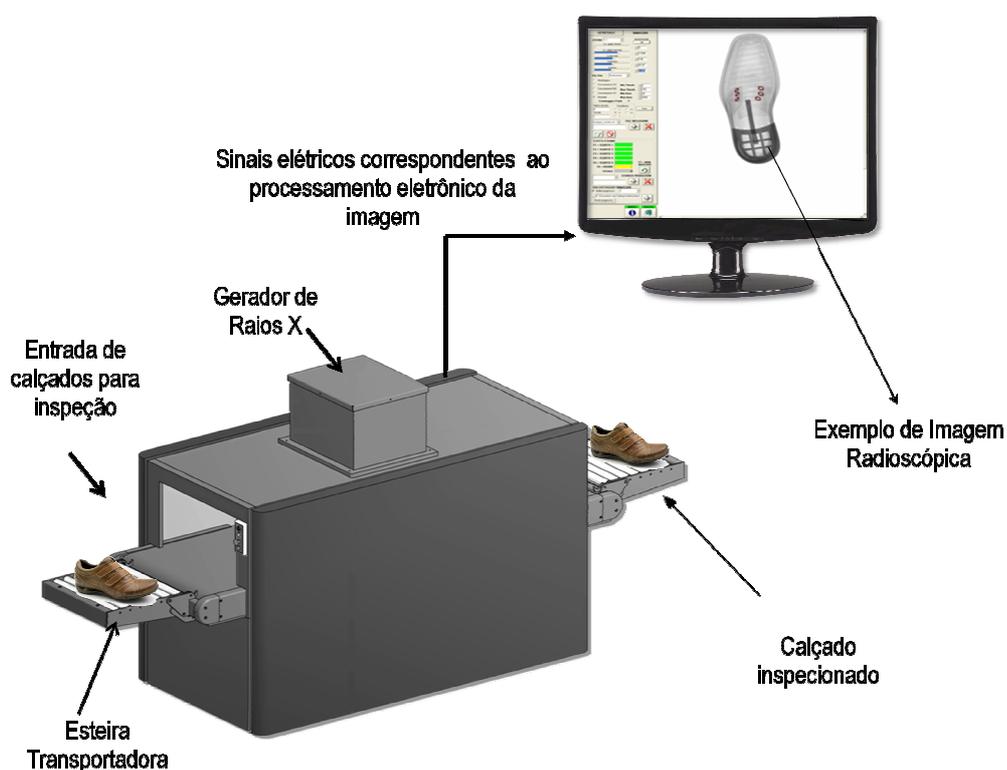


Figura 1.1: Princípio de funcionamento da Radioscopia Industrial em calçados  
Fonte: GILARDONI (2011)

Verifica-se que o objeto a ser inspecionado (calçado ou artefato) é colocado na esteira e em seguida transportado, através de modo automático ou pelo comando do operador, para a parte interna do equipamento. Sensores internos detectam quando o objeto entra no equipamento e emitem um comando para acionar o gerador de Raios X. Este gerador irá emitir radiações ionizantes do tipo X que irão atravessar o objeto a ser inspecionado. As radiações que atravessam o calçado ou artefato irão apresentar intensidades diferentes em função da massa específica e características dimensionais do corpo de prova. As radiações transmitidas serão detectadas por sensores que transformam a radiação do tipo X em sinais elétricos correspondentes a imagem do objeto. Em seguida, estes sinais passam por um processamento eletrônico, visando à elaboração da imagem visível através de um monitor.

Associado a este processamento, existe um software que auxilia o operador na identificação, controle e seleção defeitos, permitindo desta forma uma inspeção mais rápida e confiável. Além disso, estas imagens podem ser armazenadas com distintas finalidades. Esta inspeção pode ser realizada por um operador ou dependendo do equipamento, pode ser realizada automaticamente. No processo de inspeção automática, a máquina pode ser pré-programada para detectar defeitos, segundo critérios específicos, já selecionados pelo operador.

Considerando que a radioscopia industrial é uma técnica que emprega radiação ionizante, o equipamento deve atender a todos os requisitos de segurança e de radioproteção, visando garantir a proteção dos trabalhadores, público e meio-ambiente. Visto que a proteção radiológica (ou radioproteção) é o conjunto de medidas que visam proteger o ser humano contra possíveis efeitos indesejáveis causados pela radiação ionizante (CNEN, 2011). Outro ponto a ser ressaltado é que, uma vez o calçado submetido a este ensaio não destrutivo sua estrutura material não se altera, tampouco representa risco ao seu usuário.

O controle da qualidade no setor calçadista brasileiro pode ser realizado diretamente nas indústrias e/ou em laboratórios especializados. Tanto indústrias quanto laboratórios podem ter seus procedimentos de radioscopia acreditados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), para aplicação das normas e especificações de resultados em ensaios de controle da qualidade de calçados prontos e componentes para calçados.

No Brasil, o fornecedor de normas de ensaios em calçados é a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Atualmente, não existem normas brasileiras, assim como não é de conhecimento do Instituto Brasileiro de Tecnologia de Couro e Calçados (IBTeC) que existam indústrias brasileiras que empreguem a tecnologia da Radioscopia Industrial (declaração verbal feita no XX Congresso Mundial de Calçados). Basicamente os ensaios empregados na indústria de calçados podem ser visual, físico-mecânico, químicos e mecânicos.

Diante do exposto, para sustentar a introdução da técnica de radioscopia na indústria de calçados como um ensaio de controle de qualidade, os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Realizar um estudo defeitos estruturais que possam ser identificados pela técnica de Radioscopia Industrial em partes específicas de calçados e artefatos, visando a melhoria do controle de componentes que agregam atributos como: conforto, performance, saúde e segurança para consumidores.
- Propor uma Análise de Modo e Efeitos de Falha (FMEA - Failure Mode and Effects Analysis), exemplificando o emprego da Radioscopia Industrial na minimização do RPN (Risk Priority Number – Número de Prioridade de Risco) em processos de produção de calçados.
- Apresentar os resultados das imagens radioscópicas de calçados profissionais (EPI – Equipamento de Proteção Individual) e calçados femininos, buscando avaliar a potencialidade do controle da qualidade empregando o equipamento de Radioscopia Industrial.

Esta dissertação está estruturada em 7 (sete) capítulos, sendo este primeiro o introdutório. No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico que fundamentou o desenvolvimento da FMEA de processo proposta no estudo, assim como a análise dos defeitos nos calçados objetos de inspeção. Já no Capítulo 3 é descrita a metodologia de pesquisa adotada nesta dissertação. No Capítulo 4 são apresentados os principais controles de qualidade empregando Radioscopia, comumente adotados nas indústrias calçadistas internacionais. No Capítulo 5 é apresentada uma proposta de FMEA de processo, aplicada a calçados profissionais. No Capítulo 6 são apresentados alguns resultados das imagens radioscópicas de calçados brasileiros. Finalmente no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e propostas para estudos futuros.

## 2 Referencial Teórico

### 2.1 A Indústria de Calçado Brasileira : Visão Geral

#### 2.1.1 Material de Fabricação

Uma das principais tendências da produção brasileira de calçados é a substituição do couro natural por outros produtos naturais ou sintéticos. Devido à escassez do couro natural, frente à crescente demanda e preferência dos curtumes pelo mercado de exportação, entre outros fatores, tem-se verificado um relativo aumento na utilização de materiais sintéticos, tais como borracha e compostos artificiais. Mantendo certa semelhança com o couro natural, a aplicação de um material sintético possibilita a redução de custos. Buscam-se formas de reduzir os custos de fabricação para compensar a crescente concorrência, e a abertura dos mercados à concorrência de mercadorias estrangeiras, como os sapatos chineses (Lins, 2005). Na Figura 2.1 são apresentados dados relativos a indústria brasileira de calçados no período de 2008 a 2010, considerando o tipo de material.

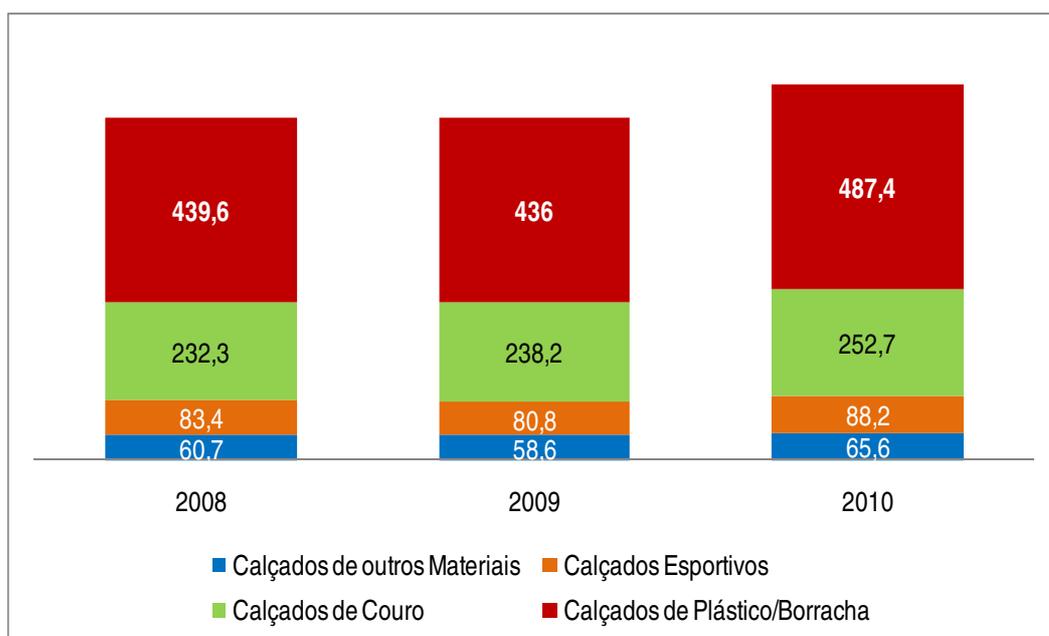


Figura 2.1: Produção de Calçados em milhões de pares.  
Fonte : ABICALÇADOS (2011)

Na região Nordeste é muito difundida a utilização de material reciclado para a fabricação dos calçados nos dias de hoje.

Partes injetadas do calçado, principalmente das sandálias, podem ter seu custo de matéria-prima reduzido em até 75% devido ao reaproveitamento de sandálias usadas e outras peças de material sintético, que são moídas e reprocessadas, para darem vida a uma nova peça. Esta é uma iniciativa extremamente positiva, pois além de diminuir os custos do produto final, aumentando sua competitividade, gera empregos fomentando a indústria da reciclagem e trás para toda a sociedade um ganho ecológico, diminuindo os detritos sintéticos (Lins, 2005).

O couro natural, porém, ainda hoje, tem um papel fundamental na indústria calçadista, sendo a principal opção. Entre os diversos tipos de couro, o mais utilizado, em cerca de 70% dos casos, é o couro bovino. Isso se dá pela sua grande versatilidade, por ser oferecido em diversas espessuras e pela sua grande oferta. Porém, há ainda demanda por diferentes tipos de couro, como os de cabra, carneiro, porco, avestruz, répteis, entre outros. Contudo, além do couro ainda são empregados outros materiais na fabricação do calçado. Os femininos podem utilizar diferentes tipos de tecido e de couros, para acompanhar a moda. Os esportivos e os infantis também têm nos tecidos uma grande demanda. Além disso, a indústria utiliza em larga escala outros materiais, como cola, borracha, madeira, linhas, e diversos componentes que entram no acabamento do calçado (Lins, 2005).

## **2.2 Partes do Calçado**

O calçado tem algumas partes que são comuns a todas as linhas e modelos e outras que são específicas ao um determinado tipo. A fim de possibilitar a posterior descrição do processo de fabricação é apresentada uma lista das principais partes componentes do calçado feminino e masculino. Na Figura 2.2, 2.3 e 2.4 são apresentadas as principais partes componentes de um calçado masculino, feminino, e de segurança, respectivamente.

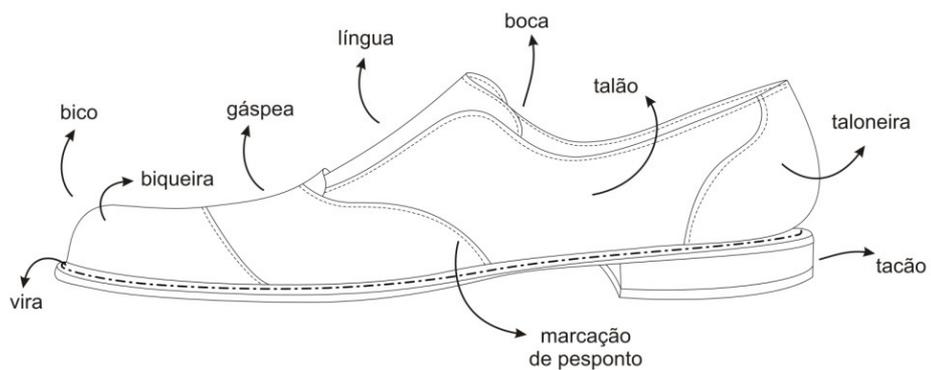


Figura 2.2: Partes componentes do calçado masculino  
 Fonte: CTCCA (2002)

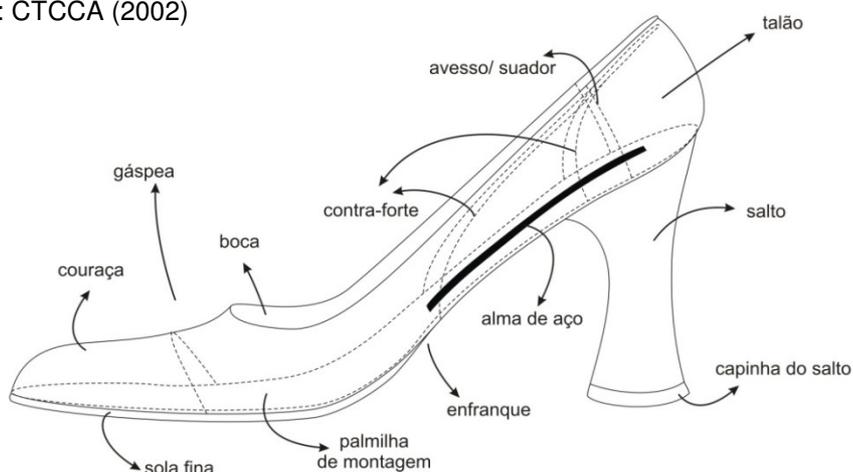


Figura 2.3: Partes componentes do calçado feminino  
 Fonte:CTCCA (2002)



Figura 2.4: Partes componentes do calçado de segurança  
 Fonte: BRACOL (2012)

### **2.2.1 Cabedal**

É a parte superior, o corpo do calçado, incluindo a lingueta. O cabedal pode variar de formato e na combinação de materiais que o constituem. Este é o resultado da junção das diferentes partes cortadas, que são costuradas em um bloco único (CTCCA,2002) .

### **2.2.2 Forro**

Revestimento utilizado para acabamento interno do calçado. Além de reforçar a estrutura, proporciona conforto e absorve a umidade. Geralmente (mas não obrigatoriamente) ele cobre toda a parte interna do cabedal. Pode ser constituído de laminados sintéticos, couro, materiais têxteis, entre outros (CTCCA,2002).

### **2.2.3 Entressola**

Localizada entre o cabedal e o solado, a entressola normalmente se assemelha a uma espuma macia. Tem também uma função estética, pois possibilita que o solado pareça mais espesso, sem aumentar seu peso. Geralmente são feitas com poliuretano (PU) ou EVA (Etileno Acetato de Vinila- material moldado em altas temperaturas, com as mesmas propriedades resilientes do PU, contudo mais leve) (CTCCA,2002).

### **2.2.4 Solado**

É a parte do calçado que fica em contato direto com o solo. Portanto, deve garantir proteção, resistência e estabilidade. São feitos geralmente em borracha, mas há também solados em couro e madeira (Lins, 2005).

### **2.2.5 Talão**

É a estrutura que sustenta o calcanhar e posiciona o tornozelo corretamente dentro do calçado (CTCCA, 2002).

### **2.2.6 Palmilha**

É um componente destinado a proporcionar conforto para o usuário. A palmilha é também responsável pela postura correta do pé dentro do calçado. Muitas palmilhas já são fabricadas com o mesmo EVA aplicado nas entressolas, aumentando o conforto para os pés (CTCCA, 2002).

### **2.2.7 Contraforte**

O contraforte é um elemento estrutural, de reforço. Tem a finalidade de proteger a parte traseira do calçado. Ajuda a manter a forma quando se retira o pé. Geralmente fica entre o forro traseiro e o cabedal (CTCCA, 2002).

### **2.2.8 Gáspea**

É toda a parte do cabedal que cobre as porções frontais do pé (CTCCA, 2002).

### **2.2.9 Avesso**

Elemento para proporcionar conforto ao usuário, fica na parte traseira do calçado e evita que o calcanhar deslize durante o caminhar e que entre em contato com o contra-forte (CTCCA, 2002).

### **2.2.10 Boca**

É a abertura do calçado; em alguns casos, como os *scarpins* tradicionais, a boca é bem aberta, baixa, permitindo algumas vezes que se possa ver o começo dos dedos; em outros casos, é bem fechada, como nos sapatos tradicionais masculinos (CTCCA, 2002).

### **2.2.11 Couraça**

A couraça, assim como o contra-forte, é um elemento estrutural que tem o objetivo de reforçar o calçado. É colocado com a finalidade de proteger o bico ou a biqueira (parte dianteira do calçado). Assim, mantém o formato do calçado mesmo quando este está fora do pé (CTCCA, 2002).

### **2.2.12 Salto**

Utilizado tanto para questões estéticas (altura), quanto para garantir a sustentação e melhor caminhar ao calçado. Geralmente é fabricado em madeira ou poliestireno, e fixado no solado na região do calcanhar (Lins, 2005).

### **2.2.13 Alma de aço**

No caso dos sapatos de salto, o enfranque (parte que fica no meio do pé) precisa de sustentação para ficar nas alturas, sem deformar. Assim, coloca-se um uma pequena régua de metal entre a palmilha de montagem e o reforço da palmilha, mantendo uma curva anatômica (Lins, 2005).

### **2.2.14 Sola fina**

É o acabamento das solas dos sapatos de salto (Lins, 2005).

### **2.2.15 Capinha do salto (tacão)**

Funciona como um prego, sendo que sua cabeça se ajusta ao formato do salto para oferecer proteção para ele no caminhar, pois fica em contato com o chão, evitando que o salto estrague e/ou se desgaste (CTCCA,2002).

### **2.2.16 Componentes**

Os componentes são todas as peças que são adicionadas ao calçado durante o processo de produção. A lista de componentes é enorme, e não para de crescer, por causa do aumento da variedade de modelos e a grande influência da moda. Como exemplos, podem ser citados: argolas, enfeites, fivelas, rebites, ilhoses, elásticos, reguladores e ponteiros (Lins, 2005).

### 2.3 Processos de Produção do Calçado

A fabricação de calçados de couro é, em geral, realizada em seis processos ou etapas, como mostra o fluxograma na Figura 2.5 (Alves, 1991).

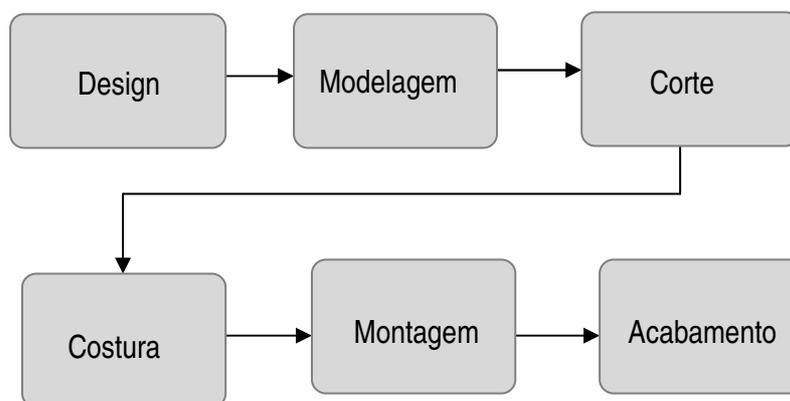


Figura 2.5: Processos de Produção do Calçado

O processo produtivo é caracterizado pela aplicação intensiva de mão-de-obra e pela descontinuidade do fluxo de produção. Por ser dividida em estágios bem distintos e com operações bastante variadas, a mecanização do processo é difícil e ocorre mais dentro de cada etapa (Alves, 1991).

Esta apresentação do processo de produção em etapas é bastante genérica, pois na prática a produção, quando vista em detalhes, pode variar muito de uma empresa para a outra. Dependendo do porte da empresa, sua especialização e público alvo, as etapas ganham detalhamentos que fazem desta uma indústria bastante heterogênea no que diz respeito ao seu processo produtivo.

Essa heterogeneidade possibilita a participação no mercado de empresas de diferentes tamanhos, operando em segmentos específicos. Estas empresas podem se especializar em apenas uma fração do processo todo ou em uma das etapas do processo. Elas podem inclusive se tornar fornecedoras de outras empresas do ramo. Deste modo, é apresentada, resumidamente, a definição de cada etapa do processo de produção nas próximas seções.

### **2.3.1 Design**

Neste ponto, o fabricante, baseado no público que ele quer atingir, desenvolve o conceito do produto. Para isto, ele formula o projeto do produto, que engloba desde o desenho do calçado até a discriminação dos insumos necessários para a sua realização. Pela sua importância no restante do processo, pode-se dizer que nesta fase há a maior agregação de valor (Lins 2005; CTCCA b, 2002).

### **2.3.2 Modelagem**

Uma vez definido o estilo e o produto que será fabricado, o modelo é desenvolvido pelo modelista. Nesta etapa também são definidos os materiais e a numeração. Normalmente, as micro e pequenas empresas contratam serviços de modelistas, que também são responsáveis pelo desenvolvimento e conceito do produto. Uma importante função desta etapa é adaptar o produto projetado para sua manufatura, levando em consideração as especificidades dos materiais, capacidades das máquinas e também os custos envolvidos. Ou seja, o modelista torna real o que foi anteriormente conceituado.

O processo tradicional utiliza o pantógrafo, que faz a escala e corta a cartolina para os modelos. Mais recentemente, com o auxílio da tecnologia, os equipamentos CAD (Computer Aided Design) bi e tridimensionais criam modelos a partir de informações digitalizadas que podem ser visualizados e alterados no monitor dos computadores. Este processo, por um lado, torna-o mais custoso, mas, por outro lado, aumenta muito sua precisão e agilidade. Devido ao alto custo de aquisição do equipamento, a ferramenta de modelagem em CAD acaba ficando restrita a empresas com maior porte. As empresas de menor porte têm como saída o subsídio do SEBRAE e/ou do sindicato patronal local, que por vezes adquire o equipamento e o disponibiliza para seus associados (Lins 2005; CTCCA b, 2002).

### **2.3.3 Corte**

Com o modelo já preparado, o couro é então cortado para formar as diferentes partes do calçado, compondo assim o cabedal.

O processo tradicional utiliza facas e balancins (máquinas para cortar materiais diversos como couros, termoplásticos, sintéticos, espumas, cortiça, plástico, borracha, EVA, papel, fibras têxteis e outros. Com regulagem fina, o corte possibilita maior precisão, o que garante grande economia). Nesta etapa, deve-se evitar desperdícios. Para tal, o operador deve observar o sentido das fibras, a elasticidade do couro e a existência de defeitos. Aí, então, ele define as posições do corte para aproveitar o material ao máximo. Os processos com maior aplicação de tecnologia utilizam o corte a laser ou jato de água, em geral, de forma integrada com a modelagem por CAD, resultando em um nível mínimo de desperdício da matéria-prima (este processo é chamado de CAM – Computer Aided Manufacturing). Calçados que buscam oferecer em seu produto final um maior valor agregado e que utilizam matéria-prima mais cara e de manuseio mais delicado exigem, devido ao seu alto custo, um menor desperdício. Por isso, o processo industrial recebe maior investimento em tecnologia. Deve-se ressaltar, ainda, que muitas vezes, as diferenças entre os processos tradicionais e os mais avançados são, em grande parte, determinadas pelo seu grau de homogeneidade. Isso se dá porque processos mais padronizados possibilitam um grau maior de mecanização. Esta etapa pode também englobar o corte da sola, que pode ainda ocupar uma seção específica, ou até ser adquirida de outra empresa (por terceirização) (Lins 2005; CTCCA b, 2002).

#### **2.3.4 Costura**

As diferentes partes do cabedal, cortadas na etapa anterior, são unidas nesta etapa. As várias peças são costuradas, dobradas, picotadas ou coladas. Outros adornos e enfeites podem ser também aplicados, de acordo com as determinações do design. Dependendo do tipo de projeto, nesta fase podem ser utilizadas máquinas de costura de controle numérico (projetos de produtos mais padronizados possibilitam maior grau de automação, como já dito). Contudo, como a união das peças exige um trabalho com grande detalhamento e cuja forma de junção e costura varia muito de um produto para o outro, a automação deste processo é difícil e custosa. Muitas vezes essa etapa é feita parcialmente ou totalmente por trabalhadores sub-contratados (são utilizadas estruturas terceirizadas, chamadas de ateliês ou de bancas de pesponto) (CTCCA b, 2002).

### **2.3.5 Montagem**

O cabedal já montado é unido ao solado nesta etapa. Esta tarefa pode ser feita através de uma nova costura, por colagem ou por prensagem. Depois de fixado o solado, são colocados o salto, a biqueira e a palmilha (CTCCA b, 2002).

### **2.3.6 Acabamento**

A última etapa do processo de produção é quando o calçado é retirado da forma e passa pelos últimos detalhes: colocação de forro, pintura, enceramento, colocação de etiquetas, entre outros. Geralmente, é nesta etapa que acontece o controle de qualidade, através de uma verificação de todos os calçados que saem da linha (CTCCA b, 2002).

## **2.4 Cadeia Produtiva do Calçado**

O setor calçadista brasileiro, bem como outros setores da economia, permaneceu durante anos fechado ao mercado internacional em função de políticas econômicas anteriores, relacionadas ao desenvolvimento de indústrias que substituíssem importações. Esse fato fez com que o processo de inserção das indústrias calçadistas no mercado competitivo global fosse traumática e demorada. No entanto, desde o início do Plano Real, o setor vem se defrontando com produtos concorrentes importados (principalmente oriundos dos países asiáticos). Paralelamente, a competitividade externa dos produtos nacionais vem decaindo em função da valorização do real ante o dólar e o euro. Tal situação forçou as empresas do setor calçadista a procurarem novas formas de organização da produção para obterem maior competitividade via, por exemplo, aumento da flexibilização produtiva (Milaneze e Batalha, 2008).

O foco na flexibilidade surgiu em função da necessidade da indústria de calçado lidar com turbulências ambientais (variação do volume de demanda, mudanças tecnológicas, tendências de moda, entre outros fatores) que acabavam influenciando o mercado, os produtos da empresa e seu sistema produtivo (Corrêa, 2001; Gorini, Corrêa e Silva, 2000; Garcia, 1996).



Tais agentes compreendem o governo (federal, estadual ou local), as entidades de fomento de P&D e de ensino (universidades, centros de pesquisa, instituições de ensino técnico e profissionalizante, etc), além de entidades representativas (sindicatos, associações, etc.). Esses agentes contribuem ativamente na formulação de estratégias de desenvolvimento local pela formulação de políticas públicas e privadas, visando à introdução de novas tecnologias.

## 2.5 A inovação tecnológica no setor de calçados

No contexto competitivo e globalizado em que as empresas se fazem presentes, a busca por maior qualidade, eficiência e um maior retorno do capital investido se tornam prioridades para a grande maioria, fazendo com que a dinâmica de difusão e absorção da inovação tecnológica intensifique-se.

A inovação tecnológica tem sido amplamente reconhecida, não apenas como um poderoso instrumento para o desenvolvimento econômico, mas também como uma das principais fontes de competitividade entre as empresas dos diversos segmentos da economia mundial (Cavalcanti, 2006).

*“Inovações tecnológicas correspondem à implementação de produtos e processos tecnologicamente novos e/ou aperfeiçoamentos tecnológicos significativos em produtos e processos. Uma inovação tecnológica pode ser considerada implementada se ela foi introduzida no mercado (inovação de produto) ou efetivamente utilizada no processo de produção (inovação de processo). O produto ou processo deve ser novo (ou significativamente melhorado) **para a empresa**. Não necessariamente tem que ser novo para o mercado da empresa. Atividades de inovação tecnológica são todos os passos necessários para desenvolver e implementar produtos ou processos tecnologicamente novos ou aperfeiçoados.”<sup>1</sup>*

Diante do exposto o emprego da técnica de Radioscopia Industrial apresenta-se como importante ferramenta de inovação tecnológica para empresas do setor calçadista, tendo em vista que é um processo novo dentro das linhas produção de calçados brasileiros.

---

<sup>1</sup> Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/setec/arquivos/pdf/inotec.pdf>, acessado 20/11/2010

Analisando a indústria brasileira como um todo, o número de empresas que implementaram inovações de produto e/ou processo foi de aproximadamente 39 % (PINTEC -IBGE, 2010).

Quando se verifica, especificamente as empresas de preparação de couros e fabricação de artefatos de couro, artigos de viagem e calçados, o índice de empresas que inovaram em produto e/ou processo foi de aproximadamente de 36 % (PINTEC- IBGE, 2010). Apesar do índice de inovação do setor calçadista ser próximo ao índice geral da indústria, é sabido que este segmento investe menos em P&D que outros setores, a exemplo as indústrias química, farmacêutica, eletrônicos e computação que apresentaram índices de 58%, 64%, 64% e 58 %, respectivamente (PINTEC-IBGE, 2010). É interessante notar também que vem ocorrendo quedas na receita líquida média das empresas do segmento de calçados de couro (ABICALÇADOS, 2011).

Outra análise importante é verificar a dificuldade das micro e pequenas empresas em inovar, pois cerca 79% empresas com mais de 500 pessoas inovaram em 2008, contra apenas 28% das empresas com 10 a 49 funcionários no mesmo período (PINTEC-IBGE, 2008; Velho et al, 2007). Conclui-se que para as pequenas empresas o esforço para inovar é mais difícil, assim como o acesso a linhas de fomento.

As fontes de financiamento desses esforços de P&D são 100% próprios das empresas do setor calçadista, contra a média de 95% das empresas industriais que utilizaram 4% das verbas do governo para seus esforços de P&D. Segundo pesquisa realizada pela Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), as instituições mais conhecidas de apoio à inovação são em ordem: BNDES, SEBRAE, FINEP e Fundações de Amparo à Pesquisa. Dentre as empresas que inovaram, cerca de 21% receberam apoio do governo. Este apoio foi assim dividido entre as empresas: 0,6 % das empresas receberam incentivos fiscais à pesquisa, desenvolvimento e inovação; 0,4 % das empresas receberam incentivos fiscais sobre a Lei de Informática; 0,8 % das empresas receberam financiamento a projetos de pesquisa em parceria com Instituições de Ciência e Tecnologia (ICTs) e 18 % das empresas receberam financiamento de P&D na compra de máquinas e equipamentos (Velho et al, 2007).

Considerando que este segmento está exposto a um padrão de concorrência internacional acirrado, é urgente que empresas brasileiras do setor calçadista se aculturem em novas tecnologias, visando alcançar linhas de financiamento em inovação, para que desta forma tornem-se mais competitivas, ofertando produtos com maior valor agregado.

## **2.6 A Radioscopia Industrial**

A Radioscopia é um ensaio não-destrutivo que emprega radiações ionizantes para inspeção de objetos. Permite uma verificação num curto intervalo de tempo das dimensões, localizações e distribuições de não-conformidades, tanto interna quanto externa do corpo de prova, objeto do ensaio.

A técnica de radioscopia pode ser usada em controle de qualidade de produtos industriais, empregando radiações ionizantes do tipo X.

Um equipamento de Radioscopia Industrial é constituído basicamente pelas seguintes partes componentes: sistema de raios X; blindagem para raios X; sistema motorizado e automatizado de movimentação; sistema de detecção; processador de imagens e banco de dados com computador dedicado; sistema de visualização e; console de comando. Nas próximas seções serão apresentados conceitos relacionados a cada parte componente de um sistema de Radioscopia Industrial.

### **2.6.1 Sistema de Raios X**

Os raios X é a denominação dada à radiação eletromagnética de alta energia que tem origem na eletrosfera ou no freamento de partículas carregadas no campo eletromagnético do núcleo atômico ou dos elétrons (Tauhata, 2003).

Os equipamentos de raios X são aparelhos que emitem radiação X quando energizados, segundo uma tensão e uma corrente estabelecida pelo usuário. Os aparelhos de raios X são classificados de acordo com a sua potência e com as aplicações para as quais são projetados (Oliveira, 2010). Para fins industriais, podem-se encontrar equipamentos que emitem raios X com energias variando entre alguns keV a dezenas de MeV (ASTM, 2009).

Os raios X são gerados dentro de uma ampola especial de vidro. O tubo fica inserido dentro de um cabeçote, envolto num óleo especial. Este óleo serve como isolante eletrostático e como dissipador de calor da ampola. O cabeçote possui um revestimento de chumbo para blindar a radiação que não contribui diretamente na formação da imagem. No cabeçote há uma janela que permite a passagem do feixe de raios X. O tubo de raios X é basicamente composto por uma carcaça de vidro, o anodo e catodo (filamento) (Oliveira, 2010).

O feixe de elétrons é gerado por emissão termoiônica num filamento aquecido. O campo elétrico é obtido aplicando-se uma alta voltagem entre os terminais do tubo de raios X, onde o alvo metálico, anodo, é polarizado positivamente e o filamento, catodo, negativamente. A emissão de raios X só ocorre, quando estiver ligada a alta tensão. Quanto maior a tensão aplicada ao tubo, maior será a energia dos raios X gerados e maior também o seu poder de penetração e aumentando-se a corrente, aumenta-se a intensidade do feixe .

Ressalta-se que o anodo deve ser um bom condutor térmico, pois mais de 99% da energia cinética proveniente das interações dos elétrons com o alvo é convertida em calor (Cesareo, 2000). Na Figura 2.7 pode-se ver a ilustração de um tubo de raios X e seus principais componentes.

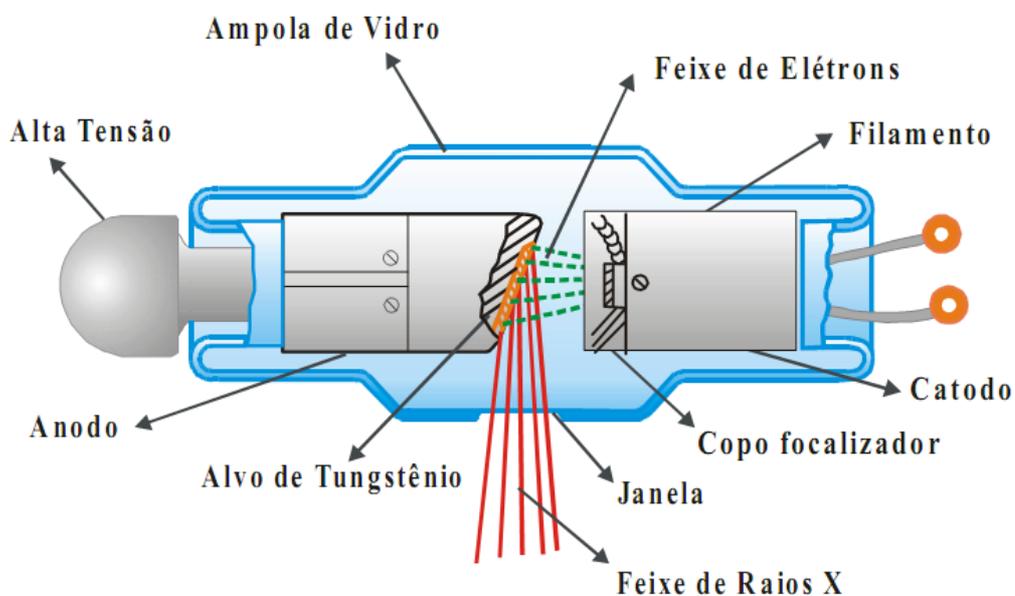


Figura 2.7: Componentes de um tubo de raios X  
Fonte: Tauhata (2003)

Os elétrons acelerados na direção do anodo ganham energia cinética determinada somente pelo valor da tensão aplicada, e ao interagirem com os elétrons presentes no material alvo no anodo perdem energia rapidamente por ionização e excitação. Os raios X são gerados por dois processos diferentes conhecidos por bremsstrahlung (radiação de freamento) e produção de raios X característicos (Knoll, 1989).

Os raios X de bremsstrahlung (radiação de frenamento) são produzidos quando os elétrons incidentes com uma energia inicial  $E_1$  passam próximos a um núcleo atômico. A força atrativa do núcleo positivamente carregado obriga o elétron a mudar de direção e perder energia. O elétron agora tem uma energia mais baixa  $E_2$ . A diferença de energia ( $E_1 - E_2$ ) é liberada como um fóton de raios X. Esses raios X apresentam um espectro contínuo de radiação, até uma energia máxima determinada pela energia cinética máxima do elétron incidente numericamente igual a tensão aplicada ao tubo de raios X (Machado, 2011; Knoll, 1989).

Os raios X característicos são produzidos quando um elétron incidente interage com um elétron de uma camada interna e ambos são ejetados. Quando um dos elétrons da camada externa se move para preencher a vacância da camada interna, o excesso de energia é emitido como radiação característica. Esse tipo de raios X apresenta um espectro discreto de energia. Algumas vezes o excesso de energia pode ser emitido como elétrons Auger ao invés de radiação característica (Knoll, 1989).

Na produção de raios X são produzidos também raios X característicos referentes ao material com o qual a radiação está interagindo. Esses raios X característicos somam-se ao espectro de raios X de freamento e aparecem com picos destacados nesse espectro, conforme mostra a Figura 2.8 (espectro de raios X de freamento com raios X característicos).

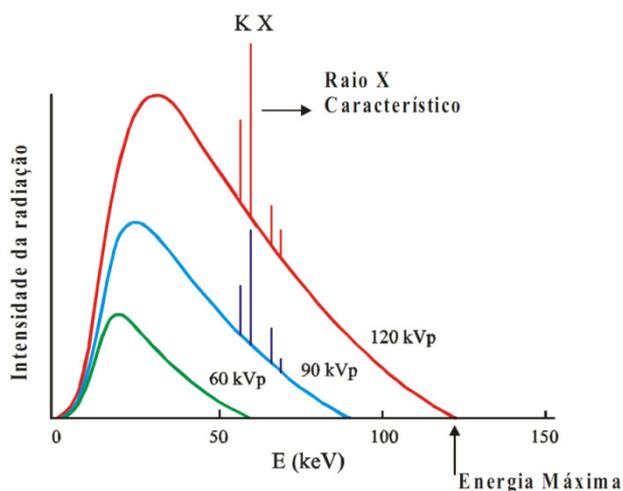


Figura 2.8: Espectro de raios X de freamento com raios X característicos para voltagem de pico de 60, 90 e 120 kV.

Fonte: Tauhata (2003)

Os aparelhos de raios X podem distinguir-se quanto ao tamanho de seu foco, conforme mostra a Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Tipos de Foco em Tubos de Raios X

Fonte: Lima (2002)

Tipo de Foco	Tamanho do Foco
Foco Normal	4 - 1 mm
Minifoco	1 - 0,1 mm
Microfoco	100 - 1 $\mu$ m

O tamanho do foco da ampola de raios X é determinante para que se obtenha uma perfeita visualização de não-conformidades e, assim, uma boa qualidade da imagem. Em radioscopia industrial para inspeção de calçados são utilizados geralmente minifoco.

Devido ao diâmetro do foco ser pequeno, a potência térmica específica para a área do foco é muito alta, o que obriga a estabelecer limites à capacidade de carga do alvo. Sem limitação, pode acontecer uma vaporização do metal do alvo devido à temperatura alta. Com isso, quanto menor for o tamanho do foco, tanto menor será também a potência máxima permitida (Lima, 2002). Neste sentido, as máquinas de Radioscopia Industrial para inspeção de calçados, geralmente operam em potencial constante com até 160 kV e 3 mA de corrente, totalizando uma potência máxima de aproximadamente 480 W.

Como exemplos, na área de segurança as máquinas de radioscopia para inspeção de bagagens operam na faixa de 160 kV/1 mA (GILARDONI, 2011). Já no setor automotivo, para realizar controle de qualidade, máquinas de radioscopia são utilizadas para busca de falhas estruturais que fogem da inspeção visual. Neste caso, o material do corpo de prova é o alumínio e os equipamentos podem operar com 160 kV/7 mA. Ressalta-se que a especificação dos parâmetros radiológicos de um equipamento de radioscopia dependem de uma série de fatores, dentre eles o tipo de material e a espessura do corpo de prova a ser inspecionado.

### **2.6.2 Blindagem para os Raios X**

Os indivíduos que trabalham com fontes ou geradores de radiação ionizante devem dispor de procedimentos técnicos bem elaborados de modo que o objetivo da tarefa seja concretizado e sua segurança esteja garantida contra exposições desnecessárias ou acidentais. Nesses procedimentos, os fatores tempo e distância em relação às fontes de radiação ionizantes estão implícitos na habilidade e destreza de um técnico bem treinado para a tarefa.

Entretanto, em certas situações é necessário introduzir um outro fator de segurança: a blindagem. A escolha do material de blindagem depende do tipo de radiação, da intensidade da fonte e da taxa de dose que é aceitável fora do material de blindagem. Nas máquinas de Radioscopia Industrial para inspeção de calçados o tipo de material empregado para blindagem são aço e chumbo. Na Figura 2.9 é apresentada a blindagem para o sistema de Raios X do equipamento de Radioscopia Industrial.

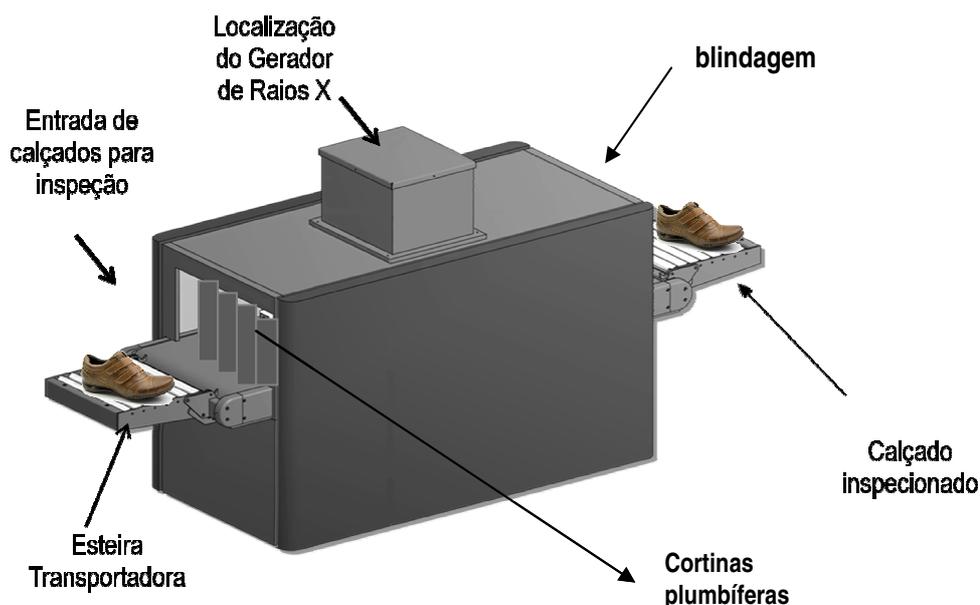


Figura 2.9: Cabine Blindada  
 Fonte: Adaptado de GILARDONI (2011)

Na entrada da cabine, ainda, pode ser visualizado as cortinas de chumbo que protegem o operador contra os níveis de radiação.

Esta blindagem garante que os níveis de radiação na superfície do equipamento sejam muito baixos (aproximadamente a taxa de dose é inferior a  $1\mu\text{Sv/hora}$  à 10 cm de distância da superfície do equipamento), garantindo condições seguras para que o operador possa trabalhar junto a máquina sem riscos a sua saúde. A cabine não requer nenhuma blindagem adicional, podendo ser colocada seguramente em qualquer área de trabalho.

A cabine possui um sistema eletromecânico de segurança que interrompe a emissão de Raios X quando o corpo de prova está fora da parte interna da cabine. No painel frontal deve existir uma lâmpada de sinalização que indica quando o tubo está emitindo Raios X, além do símbolo internacional de radiação ionizante.

### 2.6.3 Sistema motorizado e automatizado de movimentação

O equipamento de radioscopia é dotado de uma esteira motorizada para o transporte de calçados e artefatos o que, por medida de segurança, evita que o operador insira a mão ou parte do corpo dentro do equipamento. Outro fator relevante é que a esteira é feita de borracha radiotransparente.

O acionamento do sistema de movimentação da esteira é comandado pelo operador. Este sistema também pode ser adaptado para movimentação automática para ser acoplado diretamente a linhas de produção. Na Figura 2.9 pode ser visualizada a esteira transportadora de produtos a serem inspecionados.

#### 2.6.4 Sistema de detecção

Quando se realiza ensaios não destrutivos através de fontes de raios X para analisar um objeto, tem-se como interesse obter diferenças de atenuação dos raios X. Isso porque essas diferenças estão diretamente relacionadas à homogeneidade do objeto, possibilitando assim, a visualização de pequenas estruturas. Quando a radiação atravessa o corpo de prova, tem-se a sua atenuação, cuja intensidade depende do material. Uma vez atenuados, os raios X fornecem as informações ainda não acessíveis visualmente, devendo ser convertidas primeiramente. O mecanismo de conversão tem como finalidade gerar uma imagem visível em um “*array de fotodiodos*”, que são os detectores. Na Figura 2.10 é mostrada uma visão do interior da cabine blindada.



Figura 2.10: Ilustração dos detectores e o processador eletrônico de imagem.

Normalmente, um detector de radiação é constituído por um elemento ou material sensível à radiação e um sistema que transforma a radiação eletromagnética em sinais de corrente ou tensão em um valor relacionado a uma grandeza da medição desta radiação. Nestes tipos de detectores utiliza-se material fluorescente, que é aplicado ao material de base do detector. Em tais detectores, a radiação passa pelo material de base gerando excitação ou ionização no material fluorescente, emitindo fótons de luz.

Os fotodiodos convertem a luz em sinais elétricos correspondentes a imagem. De acordo com o processo de funcionamento, descrito anteriormente, os sinais elétricos intensificados podem ser levados ao conversor e exibidos num monitor. Com isso, torna-se possível a representação da imagem em tempo real, o que traz vantagens, pois, muitas vezes, necessita-se de rapidez ou grandes velocidades no ensaio não destrutivo do corpo de prova (calçado ou artefato).

Na placa existe uma matriz de fotodiodos. Cada fotodiodo será representado por um "pixel" (menor elemento de uma imagem), portanto, quanto mais fotodiodos na placa, melhor será a definição da imagem a ser gerada.

### **2.6.5 Software- Processador de imagens e banco de dados com computador dedicado**

O sistema possui um processador de imagens que visa adequar os parâmetros da imagem digital no sentido de garantir melhor visualização do operador. Através do processamento digital das imagens é possível manipular o brilho e contraste da imagem, aplicar filtros para diminuição do ruído e realce de bordas. Também, é possível reconhecer automaticamente regiões de interesse, visando a pesquisa de falhas, assim como separar ou agrupar regiões no objeto da inspeção. Todas as imagens geradas podem ser armazenadas num disco rígido através de códigos de compressão.

### **2.6.6 Sistema de Visualização**

Todo monitor destinado à visualização de imagens radiológicas para laudos deve passar pelo processo especial de garantia da qualidade (QA - Quality Assurance). A QA é realizada pelo fabricante do monitor, visando garantir que os parâmetros técnicos sejam verificados antes de sua comercialização.

### **2.6.7 Console de Comando**

É onde se encontra o posto do operador. No caso do equipamento no estudo, constitui-se de um teclado conectado a uma unidade lógica de processamento e um terminal de vídeo. Deste ponto, o operador ajusta os parâmetros da imagem, seu armazenamento digital, além de controlar a entrada e saída de produtos da máquina para inspeção.

## **2.7. Competitividade e Qualidade**

As empresas estão inseridas em um ambiente complexo, com intensas mudanças tecnológicas e constantes alterações nos padrões de exigências dos consumidores. Mais especificamente no setor calçadista brasileiro, profundas mudanças no ambiente competitivo de que participam as empresas de calçados brasileiras são decorrentes de mudanças institucionais, macroeconômicas e da concorrência internacional (Francischini e Azevedo, 2003).

Entre as principais mudanças institucionais destacam-se dois importantes fatos: o processo de abertura comercial e a Constituição de 1988. O processo de abertura comercial iniciado em 1988 implicou na abolição de diversos regimes especiais de importação, pela redução da redundância tarifária e pela unificação da incidência de impostos sobre importação, além da redução de alíquotas. A constituição de 1988 levou, entre outros aspectos, a elevação de custos de mão-de-obra (Gremaud et al, 2002).

No campo das mudanças macroeconômicas, destaca-se a desvalorização cambial, isto implica na ocorrência de déficits na balança comercial, causados pelo aumento significativo das importações, impactando negativamente o desempenho das exportações (Gremaud et al, 2002).

Dentro do contexto da concorrência internacional, as empresas brasileiras calçadistas vêm sofrendo um estreitamento de seus espaços de atuação, explicado principalmente pela elevação da qualidade de calçados chineses e a redução dos custos de produção da Itália (Francischin e Azevedo, 2003).

Além do exposto, a tendência mundial do mercado consumidor de calçados vem exigindo dos fornecedores produtos diversificados, considerando exigências de moda e conforto. Alguns segmentos mais específicos, como calçados de segurança, também é exigido o atendimento a normas internacionais específicas a cada campo de atuação.

Outra recente preocupação é o desenvolvimento de calçados ecologicamente corretos, denominados calçados verdes. Estes não utilizam matérias primas convencionais, como plástico e borracha, ambos derivados do petróleo. O calçado verde utiliza 90% de matérias-primas renováveis, como derivados do milho ou da cana-de-açúcar. Além disso, todos os seus revestimentos e adesivos são à base de água e livres de solventes orgânicos (Bayer, 2012).

Esse cenário solicita das empresas uma capacidade de organização da produção de forma mais flexível, por meio de respostas rápidas diante de mudanças nos padrões de demanda, além da notável elevação do conteúdo tecnológico e exigências associadas aos calçados (Garcia, 1996).

Deste modo, estratégias tecnológicas se mostram como uma alternativa potencial. Estas consistem nos esforços e ações de uma empresa no sentido de ampliar sua capacidade tecnológica, considerando tanto as atividades de P&D como o projeto do produto, de processos e fabricação e de gestão da produção.

Requerendo estudo das condições do ambiente e das condições internas da empresa, a especificação de direções e objetivos de desenvolvimento, além da determinação das atividades a serem desenvolvidas para ampliar a capacidade tecnológica e implementar mudanças técnicas.

Os sistemas de gestão da qualidade (SGQ) são uma interessante alternativa para a geração de vantagem competitiva, pois eles desenvolvem um padrão de melhoria a partir da motivação do quadro de colaboradores, do controle de processos, da identificação de requisitos e atendimento das necessidades dos clientes (Calarge e Lima, 2001).

O SGQ é uma forma de gestão definida pela alta direção da organização que se fundamenta na identificação de requisitos dos usuários para alcançar um grau satisfatório de qualidade, buscando constante melhoria dos processos visando à satisfação do cliente em relação a seus produtos ou serviços (Ueno, 2008).

A operacionalização do SGQ se dá, em grande medida, por métodos, programas e ferramentas da qualidade, que têm funções diversas: identificar, priorizar, analisar e gerar soluções para não-conformidades e problemas em geral e criar as condições para melhorar o sistema continuamente.

São exemplos de Programas relacionados à Gestão da qualidade: Balanced Scorecard (BSC), Círculos de Controle da Qualidade (CCQ), Fundação Nacional da Qualidade (FNQ), Prêmio Nacional da Qualidade (PNQ), Produção Enxuta (Lean Production), Programa 5S e Six Sigma (Seis Sigma).

Como também são exemplos de ferramentas da Qualidade: Brainstorming, Benchmarking, Controle Estatístico do Processo (CEP), Diagrama de Ishikawa, Histograma, 5W2H, QFD (Desdobramento de Função Qualidade) e FMEA (Análise de Modos e Efeitos de Falha).

Deve ser considerado que nem todos os métodos e ferramentas da qualidade são igualmente apropriados para todas as organizações. O nível de qualidade e desempenho da gestão influencia e, às vezes, define quais ferramentas devem ser utilizadas (Behara e Gundersen, 2001).

Nesse sentido, considerando o objetivo da dissertação que tem como foco abordar a tecnologia identificação e detecção de não-conformidades nos calçados através da inspeção não-destrutiva empregando a técnica de Raios X (Radioscopia). Adotou-se como referencial para apoiar a proposta do plano de controle em calçados através da Radioscopia a ferramenta Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA).

A escolha desta ferramenta frente às demais se deve ao fato de ser um método desenvolvido para identificar, sistematicamente, falhas potenciais em sistemas, processos ou serviços, identificar seus efeitos e causas e definir ações para reduzir ou eliminar os riscos a elas relacionados (Teng et al., 2006). Além disso, a competitividade global estimulou as empresas a buscarem níveis mais altos de qualidade para seus produtos ou serviços.

Desta forma, a análise das falhas representou, em muitos casos, a garantia de sobrevivência das empresas, tamanha é a vigilância e a cobrança da sociedade (Karsak, 2002 apud Almeida et al. 2006).

Ainda neste sentido, Dikmen et al., (2004) salientam que o sucesso de uma organização depende principalmente de como ela utiliza seus recursos para satisfazer os clientes. Para utilizar os recursos, tanto humanos como técnicos, adequadamente, é necessário primeiramente identificar e analisar os problemas, ou seja, as falhas que existem em determinado bem ou serviço. Mais especificamente, para buscar a solução da consequência indesejada é necessário atuar a partir de seus fatores causadores.

Segundo Ganim (2003), a gestão de falhas de uma empresa está diretamente ligada ao incremento da produtividade, permitindo a adequada alocação dos recursos em busca de maior qualidade.

Ressalta-se que a condução da FMEA deve ser adequada a realidade de cada organização. Essa ferramenta gerencial é potencial na identificação das maneiras pelas o processo pode falhar, ajudando, também, na identificação de ações que evitem que esses problemas ocorram (Teng et al., 2006). Na próxima seção será apresentado detalhadamente a estrutura da FMEA.

Na indústria calçadista o tamanho das empresas do setor ou seu grau de modernização tecnológica são elementos que devem ser levados em conta ao analisar-se a organização do processo de trabalho e a incorporação de inovações.

No caso do Brasil, o trabalho automatizado encontra-se em maior número nas empresas de grande porte, sendo praticamente inexistente nas empresas de pequeno porte. Por outro lado, o trabalho mecanizado também é utilizado na maioria das grandes empresas. O alto índice de trabalho mecanizado nas empresas de grande porte pode ser consequência da inovação tecnológica.

Esse setor pode apresentar algumas particularidades quando comparada com outros setores industriais, já que oferece limites à sua automação, pois se trata de um trabalho que em algumas etapas precisa utilizar trabalho manual com características artesanais (Santos e Silva, 2011).

Segundo Godinho Filho et al (2009), as empresas calçadistas brasileiras ainda se encontram no estágio inicial da gestão da qualidade. No entanto, no âmbito da organização do trabalho, atualmente, estas empresas vem utilizando novas técnicas de gestão da produção.

A principal inovação na gestão da força de trabalho, nos últimos anos, foi a introdução do trabalho em equipe, principalmente sob a forma de CCQ (Círculos de Controle de Qualidade) (Santos e Silva, 2011).

Diante do exposto, é possível identificar, de modo geral, que o emprego de ferramentas da qualidade na indústria calçadista apesar de se encontrar em estágio inicial, as empresas mostram-se resilientes no que tange a melhoria de seus processos. Assim, a próxima seção irá abordar os fundamentos relacionados a ferramenta Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA).

## **2.8 Análise de Modo e Efeitos de Falha (FMEA)**

FMEA é a sigla de *Failure Mode and Effects Analysis* (Análise de Modo e Efeitos de Falha). Foi desenvolvida na década de 1950 pela Corporação Grumann para prevenir falhas na manufatura de aviões. Apesar de sempre terem sido realizadas análises semelhantes à FMEA nos projetos e processos de manufatura, sua primeira aplicação formal foi uma inovação da indústria aeroespacial em meados dos anos 60, quando a NASA implementou o Projeto Apollo. Após isso, alguns acadêmicos sugeriram o uso na gestão de organizações (Allbien et al., 1998, apud Bachega e Lima, 2010).

Na fase de projeto, uma das técnicas mais utilizadas e difundidas para melhorar a confiabilidade de um produto é a FMEA. Essa técnica permite a análise preventiva das possíveis causas das falhas, reduzindo a possibilidade de um defeito ocorrer, melhorando, assim, a confiabilidade do produto.

Nos últimos anos, muitas organizações têm usado a FMEA, em particular, as automotivas. Isso vem ocorrendo em função da QS-9000 (Quality System), a qual determina o uso deste método pela indústria automotiva e seus fornecedores durante o projeto e desenvolvimento de novos produtos ou processos (IQA, 2002). Seu emprego é referenciado nos manuais do APQP (Planejamento Avançado da Qualidade do Produto) e também do PPAP (Processo de Avaliação de Peças de Produção), sendo ambos partes integrantes da ISO/TS 16949.

A FMEA é uma ferramenta da qualidade que destaca a sua eficácia na prevenção de problemas e é uma interface com muitos métodos de engenharia e confiabilidade. Cabe a esta ferramenta descobrir e priorizar os potenciais modos de falha, que implicam em um efeito negativo sobre o sistema e sobre seu desempenho, por meio do cálculo dos respectivos RPN (Risk Priority Number – Número de Prioridade de Risco) (Ebrahimipour et al., 2010).

O processo genérico para condução da FMEA é resumido da seguinte forma (Ebrahimipour et al., 2010): i) descrever o produto ou processo; ii) definir funções; iii) descrever os potenciais modos de falha; iv) descrever os efeitos de falhas; v) determinar as causas; vi) métodos de controles ou controles atuais; vii) calcular os riscos; viii) ações; e ix) avaliar/estimar os resultados.

Considerando que a ferramenta da qualidade adotada nesta dissertação é o FMEA e sua condução inclui a descrição dos potenciais modos de falhas, na Tabela 2.2 serão descritos conceitos acerca do tema segundo alguns autores.

Analisando a Tabela 2.2, verifica-se que a confiabilidade adquire importância em função do seu potencial para o aumento de produtividade nas indústrias e melhoria da qualidade dos produtos. A estimação adequada do desempenho do produto em campo permite identificar oportunidades de aumento de confiabilidade e qualidade do produto (Lawless, 1998 apud Biasoli, 2003).

Lafraia (2001) relata que, entre os benefícios da confiabilidade, estão os seguintes: aumentar os lucros através de menores custos de manutenção, fornecer soluções às atuais necessidades das indústrias, aumentar o lucro da produção/unidades e permitir a aplicação de investimentos com base em informações quantitativas (segurança, continuidade operacional e meio ambiente).

Tabela 2.2: Conceitos de Qualidade, Confiabilidade e Falha  
 Fonte: Adaptado de Estorilio e Posso (2011)

Autor	Conceitos relacionados à qualidade, confiabilidade e falha
Xenos, 1998 apud Estorilio e Posso,2011	<b>Qualidade</b> é a forma pela qual os produtos e serviços são julgados pelos usuários. O foco do processo de garantia da qualidade é o de assegurar a conformidade do produto com o que foi especificado. Essa conformidade é medida pela variação das características do produto em torno dos valores especificados.
Jiang e Murthy, 2009; Martins, 2001 apud Estorilio e Posso,2011	A <b>qualidade do produto</b> apresenta várias dimensões e a confiabilidade é uma delas. Entre as caracterizações da confiabilidade tem-se a binária; itens conforme ou não conforme. A <b>qualidade do produto</b> deve contemplar oito elementos: características operacionais principais; características operacionais adicionais; conformidade às normas e às especificações técnicas; apresentar durabilidade; prover assistência técnica para o produto, porém, minimizar a sua necessidade; dar atenção à estética do produto; contar com a qualidade percebida pelo usuário e apresentar produtos de alta confiabilidade.
Lafraia, 2001; Kenett e Zacks 1998 apud apud Estorilio e Posso, 2011	<b>Produto confiável</b> é aquele que apresenta poucas falhas à medida que envelhece, pois as falhas dos equipamentos são mais comuns na sua implantação e no final da sua vida útil. Segundo o autor, a taxa de defeitos de um componente é dada por falhas por unidade de tempo e varia com o tempo de vida de cada componente. <b>Confiabilidade</b> é a probabilidade de um componente ou sistema sobreviver a uma missão com duração e condições de uso determinadas.
Norma NBR 5462,1994; Rausand e Oien, 1996 apud Estorilio e Posso, 2011	<b>Falha</b> é a redução total ou parcial da capacidade de um item desempenhar a sua função durante um tempo, demandando ser reparado ou substituído. Portanto, a definição de falha assume que a função exigida seja conhecida. <b>Falhas</b> são classificadas em <b>modos de falhas</b> , os quais são definidos como o efeito pelo qual uma falha é observada, ou seja, como se observa o defeito.
Nunes, 2001; IEC 50,1990 apud Estorilio e Posso, 2011	<b>Modo de falha</b> é a maneira pela qual um determinado item deixa de executar sua função. A <b>causa da falha</b> é definida como a circunstância, durante o projeto, manufatura ou uso, que tenha conduzido à falha.

### 2.8.1 Tipos de FMEA

Há quatro tipos de FMEA (AIAG, 2001): (i) FMEA de sistema, usado para analisar sistemas e subsistemas no estágio de concepção do produto; (ii) FMEA de produto (DFMEA), usado para minimizar os efeitos de falhas no projeto do produto; (iii) FMEA de processo (PFMEA), que ajuda a prevenir falhas de processo de fabricação; e (iv) FMEA de serviço, que analisa os modos de falhas em prestação de serviços.

Como o foco nesta dissertação será a utilização da técnica de Radioscopia por Raios X na detecção e identificação falhas no projeto de calçados, assim como falhas observadas no processo de fabricação, serão abordados os fundamentos relacionados a FMEA de produto e a FMEA de processo, DFMEA e PFMEA, respectivamente.

Na FMEA de Projeto (Design Failure Mode and Effects Analysis - DFMEA), segundo Silva et al (2008) e AIAG (2001), consideram-se as falhas que poderão acontecer nas especificações do projeto. Portanto, essa análise possui o intuito de evitar falhas no processo ou no produto derivados de um projeto. Entretanto, a FMEA de Processo (Process Failure Mode and Effects Analysis - PFMEA) leva em conta as possíveis falhas no planejamento e na execução do processo. Deste modo, baseando-se nas inconformidades do produto comparado as especificações do projeto, essa análise visa evitar falhas no planejamento e na execução do processo (Silva et al., 2008).

### **2.8.2 Etapas para o desenvolvimento de uma DFMEA**

A FMEA de projeto é um documento dinâmico que deve ser iniciado antes ou na finalização do conceito do projeto do produto, sendo continuamente atualizado de acordo com as alterações ocorridas ou informações adicionais obtidas durante as fases de desenvolvimento do produto. A DFMEA deve estar concluída quando da finalização do desenho e liberação para ferramentaria.

O desenvolvimento de uma DFMEA é sistematizado nos seguintes passos (AIAG, 2001):

1. **Seleção do Time Multidisciplinar de Projeto:** O time multidisciplinar de projeto será selecionado de acordo com a diversidade dos setores da empresa. O time deve incluir um representante de cada área relevante ao produto proposto (engenharia de produto, engenharia de qualidade, manufatura, etc.).
2. **Elaboração do diagrama funcional de blocos:** O diagrama funcional de blocos é aplicável as FMEA de produto e de sistema. Para as FMEA de processos e de serviços, um fluxograma dos processos é recomendado.

3. **Priorização das partes a serem analisadas no produto:** Nesta fase devem ser avaliados os modos de falhas potenciais do projeto. Mecanismos ou causas de falhas que podem ocorrer durante a manufatura ou montagem do produto podem ser incluídos na FMEA de projeto, quando sua identificação, efeitos e meios de controle são cobertos pela FMEA de processo.
4. **Coleta de dados de histórico de falhas:** Neste ponto, o time deve iniciar o levantamento de falhas anteriores, ocorridas com o produto e registradas em um banco de dados históricos. Após estratificação pelos modos de falhas, identificam-se os modos de falhas pertinentes ao produto, dando início ao estudo de DFMEA.
5. **Análise dos dados coletados:** Após a estratificação dos dados, cabe ao time iniciar a análise das possíveis causas de cada modo de falha. Podem ser empregadas diversas técnicas, como, por exemplo, *brainstorming*, análise de causa-e-efeito.
6. **Execução das análises dos modos e efeitos de falha:** O registro das informações de um estudo da DFMEA é realizado em uma planilha, conforme Figura 2.11.

1														
FMEA - ANÁLISE DOS MODOS DE FALHAS E SEUS EFEITOS														
APROVAÇÃO DO CLIENTE:														
ETAPA:														
FMEA Nº														
PÁGINA:														
DATA 1ª EMISSÃO														
DATA REVISÃO:														
AREAS ENVOLVIDAS:														
CLIENTE/PROJETO:														
RESPONSÁVEL PROJETO/MANUFATURA: EQUIPE:														
ITEM/NOME/FUNÇÃO DO PROJETO/ PROCESSO	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO (S) DA FALHA EM POTENCIAL	SEVERIDADE	CAUSA (S) POTENCIAL DA FALHA	OCCORRÊNCIA	CONTROLE ATUAL DE PREVENÇÃO	CONTROLE ATUAL DE DETECÇÃO	RISCO (RPN)	ACÇÃO PREVENTIVA RECOMENDADA	NOME DO RESPONSÁVEL E PRAZO	ACÇÃO TOMADA	SEVERIDADE	OCCORRÊNCIA	RISCO (RPN)
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	0
														0
														0
														0
														0

Figura 2.11: Modelo de Planilha de Registros para FMEA de Projeto  
 Fonte: AIAG(2001)

Abaixo é apresentada de forma sucinta a descrição das componentes de uma planilha de registro, genérica, para análise de uma DFMEA conforme QS-9000 (AIAG,2001):

### 1. Informações de Identificação

Nesta parte da planilha são lançadas informações como :

- a) *Número da FMEA* - Número do documento da FMEA, o qual pode ser utilizado para rastreabilidade;
- b) *Sistema, Subsistema, ou Nome e Número do Componente* – Identificação do nome e número do componente, subsistema e sistema que está sendo analisado.
- c) *Responsável pelo Projeto*: Identificação do nome do fabricante do produto original, departamento e grupo, como também o nome do fornecedor se conhecido.
- d) *Responsável pela Preparação*: Identificação do nome, telefone e a empresa do profissional responsável pela FMEA.
- e) *Data da FMEA*: Data em que a FMEA inicial foi compilada e a data de sua última revisão. Também pode haver a Data Chave, ou seja, data inicialmente prevista como prazo para conclusão da FMEA, a qual não deveria ultrapassar a data de liberação programada para o desenho referente ao projeto.
- f) *Equipe*: Identificação dos nomes e departamentos dos indivíduos responsáveis que tem a autoridade para identificar e/ou realizar tarefas (é recomendável que todos os nomes, departamentos, telefones, endereços, etc, sejam incluídos em uma lista de distribuição).

### 2. Item/Função

São identificados o nome e número do item a ser analisado, usa-se a nomenclatura e informações do projeto de engenharia. Deve ser descrito tão concisamente quanto possível, a função do item para cumprir o objetivo de seu projeto. Deve ser incluída a informação considerando o ambiente no qual o sistema opera (ex.: definição das amplitudes de temperatura, pressão, unidade). Se o item tem mais de uma função com diferentes modos de falha potenciais, todas as funções devem ser listadas separadamente.

### 3. Modo de Falha Potencial

Modo de Falha Potencial é definido como a maneira pela qual um componente, subsistema ou sistema potencialmente falharia ao cumprir o objetivo do projeto. O modo de falha potencial pode ser também a causa de uma falha potencial em um sistema ou subsistema de um nível superior, ou ser o efeito de um componente em um nível inferior.

Cada modo de falha potencial para o item e sua função deve ser listado. Assume-se que a falha pode ocorrer, sem necessariamente ocorrer. O ponto de partida recomendado é a análise crítica de problemas passados e a discussão em equipe.

Modos de falha que podem ocorrer apenas sob certas condições de uso pelo cliente e de operação (calor, frio, unidade, poeira, etc.). Neste sentido, os modos de falhas potenciais devem ser descritos em termos físicos ou técnicos em relação a sua função, e não como o sintoma descrito pelo cliente. Como exemplo: trincado, solto, oxidado, fraturado, deformado.

### 4. Efeito Potencial da Falha

Os efeitos potenciais da falha<sup>2</sup> são definidos como os efeitos do modo de falha na função do produto que possa ser percebido pelo cliente. Os efeitos de falha devem ser escritos nos termos que o cliente possa perceber ou experimentar, considerando que este pode ser um cliente interno ou o cliente final. Deve ser definido claramente se a função afeta a segurança ou descumprimento a regulamentos ou legislação. Os efeitos devem sempre ser definidos em termos de um sistema, subsistema ou componente específico que está sendo analisado. É relevante lembrar que existe uma hierarquia entre os níveis de componente, subsistema e sistema. Por exemplo, uma peça pode quebrar o que pode causar vibração em um conjunto, resultando em operação intermitente do sistema. A operação intermitente do sistema poderia causar degradação do desempenho, levando o cliente a ficar insatisfeito.

---

<sup>2</sup> O efeito da falha deve ser classificado quanto a sua criticidade. Se a falha for crítica, esta poderá comprometer a segurança de operação do equipamento, ou comprometer o atendimento às normas previstas em legislação aplicável ao produto em desenvolvimento. Quando o modo de falha for classificado como crítico, este receberá neste campo a identificação com o caractere ▼.

## 5. Severidade (S)

A severidade é uma avaliação da gravidade do efeito do modo de falha potencial (listado na coluna anterior) para o próximo componente, subsistema, sistema ou cliente. A severidade se aplica somente ao efeito. A redução no índice de severidade pode ser conseguida apenas através de alteração do projeto. Neste sentido, na Tabela 2.3 é apresentada a escala para avaliação dos efeitos sugerida pela QS-9000.

Tabela 2.3: Escala sugerida para avaliação da severidade do efeito de falha-DFMEA  
Fonte: AIAG (2001)

<b>Efeito</b>	<b>Severidade do Efeito</b>	<b>Escala</b>
Perigoso sem aviso prévio	Severidade muito alta quando o modo potencial de falha afeta a segurança e/ou envolve desacordo com normas governamentais sem aviso prévio da falha	10
Perigoso com aviso prévio	Severidade muito alta quando o modo potencial de falha afeta a segurança e/ou envolve desacordo com normas governamentais com aviso prévio da falha	9
Muito Alto	Item inoperante, com perda das funções primárias	8
Alto	Item inoperante, mas com redução no nível de performance. Consumidor insatisfeito.	7
Moderado	Item operante, mas itens de conforto inoperante. Consumidor desconfortável.	6
Baixo	Item operante, mas itens de conforto operando em níveis reduzidos de performance. Consumidor com alguma insatisfação.	5
Muito baixo	Itens de ajuste e acabamento não conformes. Defeitos revelados pela maioria dos consumidores.	4
Menor	Itens de ajuste e acabamento não conformes. Defeitos revelados por alguns consumidores	3
Muito Menor	Itens de ajuste e acabamento não conformes. Defeitos revelados por consumidores isolados.	2
Nenhum	Sem efeito	1

## 6. Causa Potencial

Este campo destina-se a descrição da causa potencial, que ocasiona o modo de falha em estudo. Deve ser listado de forma mais completa possível, todos os mecanismos e/ou causas de falha concebíveis para cada modo de falha.

O mecanismo/causa deve ser listado tão completo e concisamente quanto possível, para que medidas preventivas possam ser aplicadas às causas pertinentes. Causas de falhas típicas podem incluir, mas não limitar-se a especificação incorreta de material, consideração inadequada da vida útil do projeto e/ou instruções de manutenção inadequadas, por exemplo.

## 7. Ocorrência (O)

O critério ocorrência traduz de forma qualitativa a probabilidade de acontecimento do modo de falha do produto. A avaliação da ocorrência da falha deve ser bastante criteriosa, pois a subestimativa deste parâmetro poderá acarretar em taxas de falhas não previstas. A única forma de reduzir efetivamente o índice de ocorrência é a remoção ou controle de um ou mais mecanismos de falha através de uma alteração no projeto. Neste sentido, tem-se na Tabela 2.4 a escala de avaliação das ocorrências sugerida pela QS-9000.

Tabela 2.4: Escala sugerida para avaliação da ocorrência- DFMEA  
Fonte: AIAG (2001)

Probabilidade da Falha	Critério: Ocorrência da causa	Índice de Ocorrência
Muito alta	Nova tecnologia / novo projeto, sem histórico.	10
	A falha é inevitável com o novo projeto, aplicação ou modificação, nas condições de operação, ciclo obrigatório.	9
Alta	A falha é provável com o novo projeto, aplicação ou modificação, nas condições de operação, ciclo obrigatório.	8
	A falha é incerta com o novo projeto, aplicação ou modificação, nas condições de operação, ciclo obrigatório.	7
Moderada	Falhas frequentes associadas com projetos similares, ou em simulação e ensaio do projeto.	6
	Falhas ocasionais associadas com projetos similares, ou em simulação e ensaio do projeto.	5
	Falhas isoladas associadas com projetos similares, ou em simulação e ensaio do projeto.	4
Baixa	Somente falhas isoladas, associadas com projetos similares ou em simulação e ensaio do projeto.	3
	Nenhuma falha observada, associada com projetos similares ou em simulação e ensaio do projeto.	2
Muito Baixa	Falha é eliminada através de controle preventivo.	1

## **8. Controles Atuais de Prevenção**

Devem ser descritas as atividades de prevenção, validação/verificação do projeto (VP) e outras que irão assegurar a adequação do projeto para o modo de falha e/ou causa considerada. São exemplos de controles análises críticas do projeto, estudos matemáticos, ensaios de laboratório, análises críticas de viabilidade e testes de protótipos.

## **9. Controle Atual de Detecção**

Devem ser descritas as atividades de formas de detecção para o modo de falha e/ou causa considerada. Especificamente, neste item da DFMEA, a inspeção não destrutiva por Radioscopia pode atuar de forma potencial na verificação da integridade de partes do calçado antes dos testes de validação do protótipo, sendo complementar aos controles atuais e procedimentos para detectar a causa ou modo de falha.

## **10. Detecção (D)**

O critério detecção é o indicador da capacidade do sistema em desenvolvimento detectar o modo de falha potencial antes do componente ou sistema realmente falhar (AIAG, 2001). Uma detecção baixa indica que o sistema poderá parar sem dar um prévio aviso. Dependendo da severidade atribuída ao evento, pode-se estar correndo um grande risco de permitir a ocorrência de uma falha altamente perigosa. Logo, a definição dos índices de detecção deve ser realizada com bastante ponderação, evitando-se superestimar o produto em análise. A Tabela 2.5 apresenta a escala para avaliação de detecção sugerida pela QS-9000.

Tabela 2.5: Escala sugerida para avaliação da detecção-DFMEA  
 Fonte: AIAG (2001)

<b>Detecção</b>	<b>Critério: Probabilidade de Detecção pelo Controle de Projeto</b>	<b>Escala</b>
Absolutamente incerto	Controle de projeto não detectará uma potencial causa/mecanismo e subsequente modo de falha; ou não há controle de projeto.	10
Muito Remoto	Chance muito remota do controle de projeto detectar uma causa potencial/mecanismo de modo de falha subsequente.	9
Remoto	Chance remota do controle de projeto detectar uma causa potencial/mecanismo e falha subsequente.	8
Muito baixo	Chance muito baixa do controle de projeto detectar uma causa potencial/mecanismo e falha subsequente.	7
Baixo	Chance baixa do controle de projeto detectar uma causa potencial/mecanismo e falha subsequente.	6
Moderado	Chance moderada do controle de projeto detectar uma causa potencial/mecanismo e falha subsequente.	5
Altamente moderado	Chance altamente moderada do controle de projeto detectar uma causa potencial/mecanismo e falha subsequente.	4
Alto	Alta chance do controle de projeto detectar uma causa potencial/mecanismo e falha subsequente.	3
Muito alto	Muito alta chance do controle de projeto detectar uma causa potencial/mecanismo e falha subsequente.	2
Quase certo	Chance quase certa do controle de projeto detectar uma causa potencial/mecanismo e falha subsequente.	1

## 11. Número de Prioridade de Risco (NPR)

O Número de Prioridade de Risco é uma medida do risco do projeto; é usado para priorizar as deficiências do projeto. Ele é o produto dos índices de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D):

$$\text{NPR} = (\text{S}) \cdot (\text{O}) \cdot (\text{D})$$

O valor de NPR varia entre “1” e “1000”. Para valores de NPR altos a equipe deve concentrar esforços a fim de reduzir o risco calculado através de ações corretivas.

De modo geral, deve ser dada atenção especial quando a *severidade é alta*, independente do valor NPR resultante. A FMEA - *Reference Manual* (AIAG, 2001) sugere que RPN acima de 100 e/ou severidades acima de 8 (oito) tenham ações corretivas no projeto a fim de minimizar a gravidade da falha identificada no estudo.

## **12. Ação Preventiva Recomendada**

Descreve quais ações devem ser tomadas pela equipe de desenvolvimento do projeto para minimizar os critérios de severidade, ocorrência e detecção. As ações a serem tomadas devem atender a escala estabelecida pelos valores de RPN encontrados, de forma decrescente.

## **13. Responsável e Cronograma**

Neste item é registrado na planilha quem ou qual grupo de profissionais irão executar as ações recomendadas, bem como o registro da data prevista para implementação das ações.

## **14. Ações tomadas e data**

Descreve quais ações foram realmente adotadas, bem como a data em que entraram em vigor.

## **15. Severidade / Ocorrência / Detecção (NPR – Resultante)**

Avaliar novamente os critérios de severidade, ocorrência e detecção, para verificar se o RPN é compatível com o do restante do projeto. Caso as ações não forem tomadas, o “NPR Resultante” e as correspondentes colunas dos índices devem ser deixadas em branco. Todos os NPR resultantes devem ser analisados criticamente e se ações adicionais forem consideradas necessárias, repita os itens 12 até 15.

O engenheiro ou responsável pelo projeto deve assegurar que todas as ações recomendadas foram executadas. A FMEA é um documento dinâmico que deve sempre refletir o último nível de alteração da engenharia, bem como as últimas ações implementadas, incluindo aquelas realizadas após o início da produção. Além disso, deve assegurar que as deficiências foram identificadas e as ações recomendadas foram implementadas.

Elas incluem, mas não são limitadas a:

- Garantia que os requisitos do projeto foram cumpridos;
- Análise crítica da documentação de engenharia (desenhos e especificações).
- Confirmação da incorporação das modificações à documentação de montagem/manufatura.
- Análise crítica das FMEA de processo e Planos de Controle.
- 

### 2.8.3 Etapas para o desenvolvimento de uma PFMEA

O PFMEA é desenvolvido de maneira semelhante ao DFMEA, respeitando-se agora as características de processo, e não mais as de produto. O FMEA de processo se aplica: a novos processos; a processos existentes, mas que estão passando por aperfeiçoamentos; a processos existentes, mas que estão sendo realizados com nova tecnologia ou em novo ambiente (AIAG, 2001).

O PFMEA e o DFMEA devem ser realizados simultaneamente ao desenvolvimento do Projeto e do Processo. Na Figura 2.12 é apresentado o diagrama para o desenvolvimento.

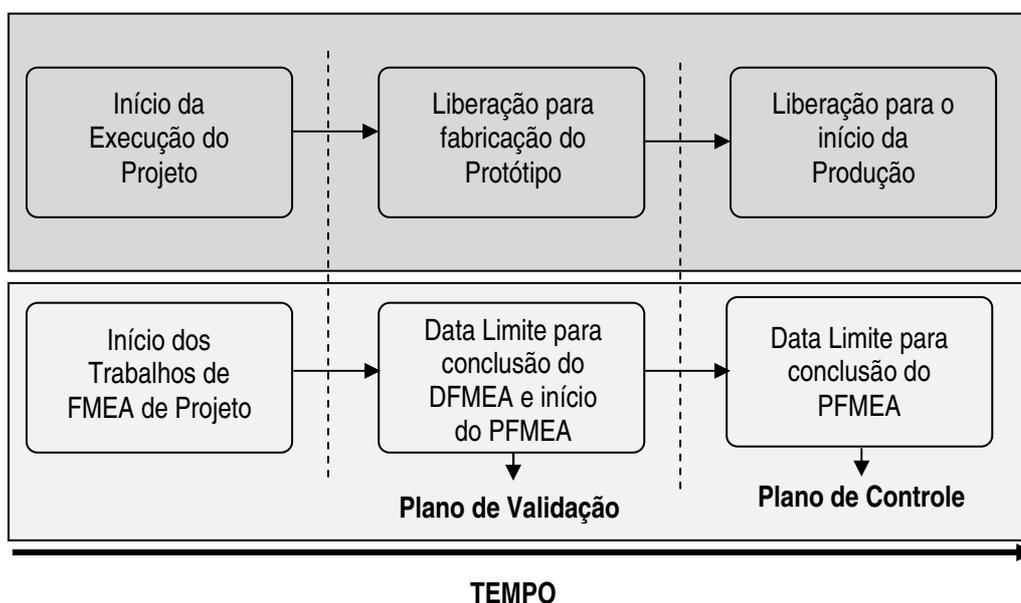


Figura 2.12: Desenvolvimento do DFMEA e PFMEA

O PFMEA deve levar em consideração desde de componentes individuais até a montagem do produto.

A elaboração do PFMEA é conduzida de forma análoga a apresentada para a elaboração do DFMEA (item 2.8.2), respeitando-se aqui uma nova classificação para os critérios de severidade, ocorrência e detecção. O detalhamento destes critérios é apresentado a seguir.

## 1. Severidade

O critério severidade quantifica a gravidade da falha potencial no processo, analisando o efeito da falha e seu impacto no funcionamento do sistema. Da mesma forma como no DFMEA, a severidade merece atenção especial, pois sua subestimativa pode comprometer todo o sistema, já que ela é uma característica intrínseca do produto. Esta avaliação deve ser conduzida considerando a gravidade do efeito do modo de falha potencial para o cliente (AIAG, 2001). Na Tabela 2.6 é apresentada a escala para avaliação da severidade sugerida pela QS-9000 para o PFMEA.

Tabela 2.6: Escala sugerida para avaliação da severidade do efeito de falha-PFMEA  
Fonte : AIAG (2001)

<b>Efeito</b>	<b>Critério: Severidade do Efeito</b>	<b>Escala</b>
Arriscado sem aviso prévio	Pode por em perigo a máquina ou o operador. Classificação de severidade muito alta quando um modo potencial de falha afeta segurança e/ou desacordo com regulamentações governamentais. Falha sem aviso prévio.	10
Arriscado com aviso prévio	Pode por em perigo a máquina ou o operador. Classificação de severidade muito alta quando um modo potencial de falha afeta segurança. Falha com aviso prévio.	9
Muito Alto	Distúrbio maior ao produto. 100% do produto pode ser descartado. Item inoperante, perda das funções primárias. Consumidor muito insatisfeito.	8
Alto	Distúrbio menor ao produto. Produto deve ser inspecionado e uma porção, menor que 100%, descartada. Item operante, mas com reduzido nível de performance. Consumidor insatisfeito.	7

Tabela 2.6: Escala sugerida para avaliação da severidade do efeito de falha-PFMEA  
 Fonte : AIAG (2001) -continuação

<b>Efeito</b>	<b>Critério: Severidade do Efeito</b>	<b>Escala</b>
Moderado	Distúrbio menor ao produto. Uma porção (menor que 100%) do produto pode Ter que ser sucateado. Item operante, mas algum item de conforto/operabilidade inoperante. Consumido desconfortável.	6
Baixo	Distúrbio menor ao produto. 100% do produto pode ter de ser retrabalhado. Item operante, mas algum item de conforto/operabilidade trabalha em nível reduzido de performance. Consumidor com alguma insatisfação.	5
Muito Baixo	Distúrbio menor ao produto. O produto talvez tenha que ser selecionado e uma fração retrabalhada. Itens de ajuste e acabamento não conformes. Defeito verificado pela maioria dos consumidores.	4
Menor	Distúrbio menor ao produto. O produto talvez tenha que ser selecionado e uma fração retrabalhada na produção, mas fora da estação de trabalho. Itens de ajuste e acabamento não conformes. Defeito verificado por poucos consumidores.	3
Muito Menor	Distúrbio menor ao produto. O produto talvez tenha que ser selecionado e uma fração retrabalhada na produção na estação de trabalho. Itens de ajuste e acabamento não conformes. Defeito verificado por alguns consumidores.	2
Nenhum	Sem efeito	1

## 2. Ocorrência

As possíveis taxas de falha aqui apresentadas referem-se a taxas de falha do processo de manufatura do componente. O índice é estimado em função da taxa de falhas possíveis, caso o processo estiver sob controle. Na Tabela 2.7 é apresentada a escala para avaliação da severidade sugerida pela QS-9000 para o PFMEA.

Tabela 2.7: Escala sugerida para avaliação da ocorrência do efeito de falha-PFMEA  
Fonte: AIAG (2001)

Efeito	Possíveis Taxas de Falhas	Escala
Muito alta	$\geq 100$ em 1000 - $\geq 1$ em 10	10
	50 em 1000 - 1 em 20	9
Alta	20 em 1000- 1 em 50	8
	10 em 1000 - 1 em 100	7
	2 em 1000- 1 em 500	6
Moderada	0,5 em 1000 - 1 em 2.000	5
	0,1 em 1000 - 1 em 10.000	4
Baixa	0,01 em 1000 - 1 em 100.000	3
	$\leq 0,001$ em 1000 - 1 em 1.000.000	2
Muito baixa	Falha é eliminada através de controles preventivos	1

### 3. Detecção

A detecção agora refere-se à probabilidade de se detectar a falha durante o processo de manufatura, antes do produto ser entregue ao cliente. Na Tabela 2.8 é apresentada a escala para avaliação da severidade sugerida pela QS-9000 para o PFMEA.

Tabela 2.8: Escala sugerida para avaliação da detecção da falha-PFMEA  
Fonte : AIAG (2001)

Detecção	Detecção do Efeito	Escala
Quase impossível	Não há controle capaz de detectar a falha.	10
Muito remoto	Probabilidade muito remota do controle detectar o modo de falha.	9
Remoto	Probabilidade remota do controle detectar o modo de falha.	8
Muito baixo	Probabilidade muito baixa do controle detectar o modo de falha.	7
Baixo	Probabilidade baixa do controle detectar o modo de falha.	6
Moderado	Probabilidade moderada do controle detectar o modo de falha.	5
Altamente moderado	Probabilidade razoável do controle detectar o modo de falha.	4
Alto	Probabilidade alta do controle detectar o modo de falha.	3
Muito alto	Probabilidade muito alta do controle detectar o modo de falha.	2
Quase certo	Chance quase certa do controle detectar uma causa potencial/mecanismo e falha subsequente.	1

#### 2.8.4 Plano de Controle

Conforme visto na Figura 2.12, a saída esperada da PFMEA para iniciar a etapa de produção é o Plano de Controle.

O plano de controle (*Process Quality Plan*, PQP) é o método utilizado para definir, em um único documento, as informações necessárias para o controle da qualidade. O plano de controle é uma saída do processo de Planejamento da Qualidade e visa controlar características do produto e do processo.

Anteriormente à execução do PQP é executado o fluxograma do processo onde constam todas as etapas do processo. O fluxograma do processo pode ser um documento separado ao PQP ou mesmo integrado a ele (Fernandes, 2005).

Na Figura 2.13, são apresentados os itens que devem ser contemplados no Fluxograma do Controle da Qualidade.

O Plano de Controle estabelece todos os procedimentos de controle de processos, da qualidade das matérias-primas e dos itens acabados a serem conduzidos durante a produção do produto em desenvolvimento. Itens de inspeção, pontos do processo a serem controlados, formas de medição, frequência e planos de reação em caso de desacordo com as especificações devem estar claramente definidos e identificados no Plano de Controle (AIAG, 1998).

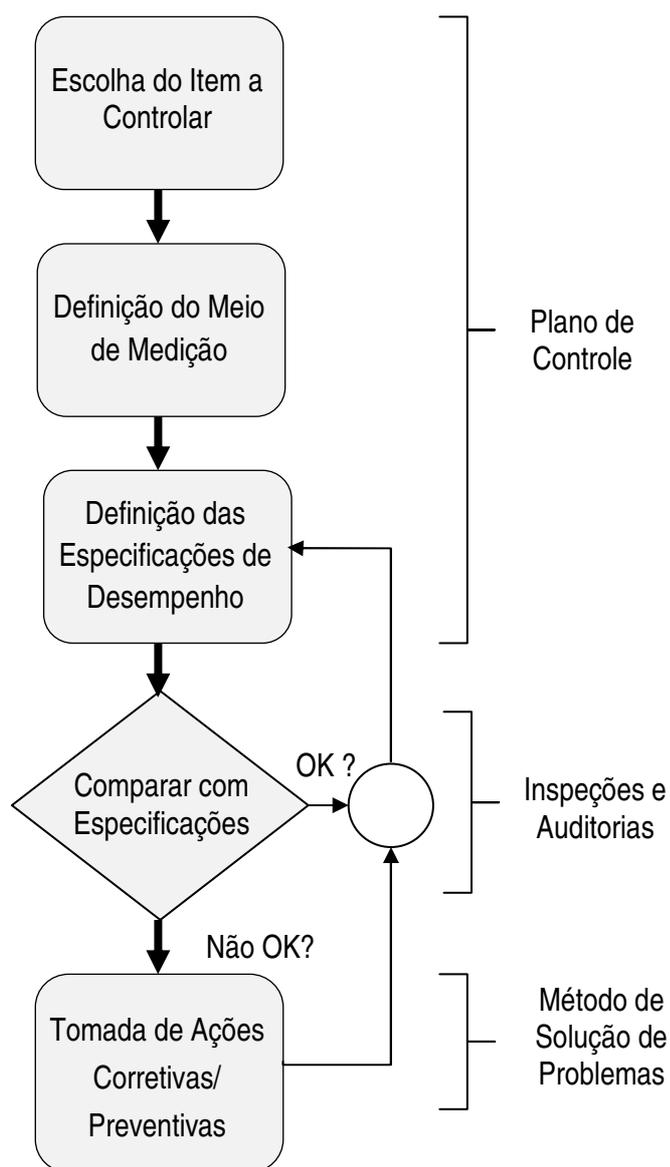


Figura 2.13: Fluxograma do Controle da Qualidade  
Fonte: Adaptado de Fernandes (2005)

## 3 Metodologia

### 3.1 Tipo de Pesquisa

Os tipos de pesquisa podem se dividir em dois critérios: quanto aos fins e quanto aos meios da investigação (Vergara, 2005).

No caso de o objeto de estudo estar bem definido, são utilizados métodos de pesquisa quantitativa como um questionário estruturado ou uma sondagem, pois trata-se de verificar somente o corpo de conhecimentos, já que outras pesquisas têm acumulado conhecimentos sobre o tema. Porém, existem áreas de interesse em que não se tem ainda desenvolvido um adequado conhecimento teórico e conceitual, ou não foram formuladas hipóteses precisas. Para esses casos, os métodos qualitativos ajudam na construção do objeto estudado, facilitam a descoberta de dimensões não conhecidas do problema e permitem também formular e comprovar novas hipóteses (Serapioni, 2000 apud Nascimento, 2011).

Diante do exposto, este estudo utilizou o método qualitativo. Para Minayo e Sanches (1993), a investigação quantitativa atua em níveis de realidade e tem como objetivo trazer à luz dados, indicadores e tendências observáveis. A investigação qualitativa, ao contrário, trabalha com valores, crenças, representações, hábitos, atitudes e opiniões.

Apesar de a pesquisa apresentar natureza empírica, contemporânea e aplicada a compreender a aplicação da Radioscopia dentro de um contexto da vida real (Yin, 2003), esta não configura um estudo de caso. Para tanto, seria necessário o desenvolver um procedimento de avaliação com análise dos dados de forma quantitativa, quanto ao emprego da Radioscopia no controle de qualidade dos calçados. Por se tratar de uma tecnologia emergente neste segmento, esta pesquisa se reafirma como exploratória (Yin, 2003, Vergara, 2005).

A pesquisa, quanto ao método é exploratória, visto que se propõe a fornecer uma visão geral do tema pesquisado. Vergara (2005) descreve como uma pesquisa que pode ser realizada em área com pouco conhecimento acumulado e sintetizado.

Neste sentido, não há até o momento publicações na área de Engenharia da Produção que abordem o tema “Radioscopia aplicada à melhoria de processos industriais de controle de qualidade na produção de calçados brasileiros”.

Agrega-se a este fato que em se tratando do tema Gestão da Produção na indústria calçadista brasileira, apenas 4% dos artigos publicados desde 1980 destinam-se a Qualidade, grande área da Engenharia da Produção (Godinho Filho, et al., 2009). Assim, esta dissertação pode facilitar a formulação de novos problemas e questões em pesquisas futuras.

A dissertação também apresenta característica descritiva, pois descreve o processo da Técnica Radioscópica, fundamentos sobre a estrutura do calçado e a análise de modo e efeitos de falha (FMEA).

Quanto ao procedimento da pesquisa, ou seja, o modo pelo qual se coletaram os dados é basicamente bibliográfico. O tema da pesquisa foi pesquisado na produção científica existente, como artigos, dissertações, teses, manuais técnicos, isto é, material acessível ao público em geral (Vergara, 2005). Ademais, foram realizadas visitas a laboratórios do segmento coureiro-calçadista e comunicações informais com indústrias fabricantes de calçados e fabricantes de equipamentos de radioscopia que participam de conferências mundiais no segmento de couro e calçados.

### **3.2 Etapas da Pesquisa**

A pesquisa desenvolvida nesta dissertação foi estruturada em 6 fases, detalhadas a seguir:

- a) Fase 1: Na primeira fase tem-se a *Definição do Projeto de Pesquisa*. Foi realizada uma revisão preliminar da bibliografia de forma a entender melhor o tema e definir o problema, objetivo principal e questões intermediárias da pesquisa.
- b) Fase 2: Na segunda fase tem-se a *Preparação do Referencial Teórico*. A bibliografia foi revisada e melhor adaptada ao tema como Visão Geral do Mercado Calçadista, sendo também estudados os conceitos de radioscopia, estrutura do calçado, descrevendo as ferramentas utilizadas para o controle de qualidade.

- c) Fase 3: Foi feito um *levantamento das principais falhas nos calçados* do ponto de vista dos clientes e lojistas, em seguida foi descrita a possibilidade de identificação destas falhas com a técnica da Radioscopia industrial. Esta foi apoiada em pesquisas realizadas junto ao fabricante do equipamento, laboratórios de ensaios em calçados, além do conhecimento da autora sobre a potencialidade da técnica radioscópica, certificada como Supervisora de Radioproteção em Radiografia Industrial junto a Comissão Nacional de Energia Nuclear, além de treinamentos técnicos realizados em equipamentos similares. Visando verificar as evidências da potencialidade da técnica, foram realizados ensaios em calçados brasileiros de segurança e femininos, visando a identificação de falhas.
- d) Fase 4: Usando como fundamento a Fase 3, na quarta fase foi desenvolvida uma *proposta de FMEA de processo em linhas de produção calçadistas*. Foi proposto um método para aplicação da técnica de radioscópica apoiado nos indicadores do QS-9000 estudados no referencial teórico. Nesta fase, também foi mostrada a capacidade da técnica radioscópica como ensaio complementar previstos em normas de ensaios em calçados de segurança, como a ABNT NBR ISO 20344/2008. Deste modo, foi realizada a exemplificação do método para um item do calçado de segurança. Esta exemplificação foi conduzida segundo a norma ABNT NBR ISO 20344/2008.
- e) Fase 5: Foi conduzida a conclusão da pesquisa.
- f) Fase 6: Redigiu-se a dissertação baseando-se na pesquisa realizada.

## 4

## Controles de Qualidade que podem ser adotados com o emprego da Radioscopia Industrial

Neste capítulo serão apresentados alguns exemplos de itens de controle e falhas relacionados ao controle da qualidade de calçados e artefatos já adotados em outros países, sendo apresentadas as imagens radioscópicas correspondentes.

### 4.1 Controle de saltos em plástico injetado

Após a injeção do salto, é possível verificar por radioscopia a ausência de porosidades ou material, que possam prejudicar a resistência mecânica do salto ou a sua fixação no calçado.



Figura 4.1: Detecção do defeito porosidade ou falta de material  
Fonte: GILARDONI (2011)

## 4.2 Controle de presença e posição de incorreta de componentes no salto

Em muitos saltos para calçados femininos é prevista a presença de um reforço interno normalmente metálico. O salto plástico é injetado “ao redor” do solado e o mesmo pode não ser mais visível após o processo de injeção. Através da radioscopia é possível a verificação correta destes componentes, sem a necessidade de efetuar um ensaio não destrutivo ao calçado.

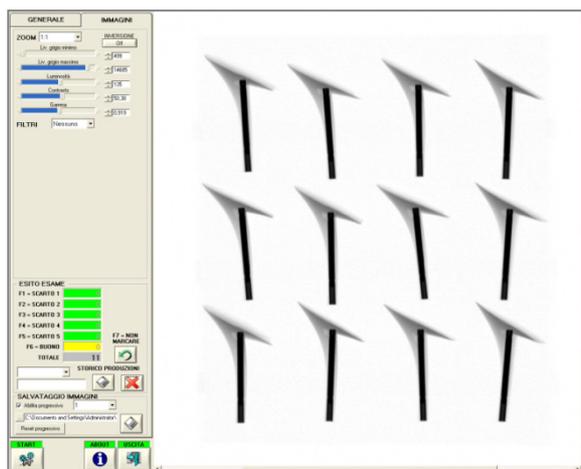


Figura 4.2: Detecção do correto posicionamento dos pregos no salto  
Fonte: GILARDONI (2011)

## 4.3 Controle automático da presença e contagem de componentes

Na imagem radioscópica é possível identificar o posicionamento da alma, assim como a correta contagem dos ilhoses. Em calçados de segurança e uso militar a correta identificação destes itens é de grande relevância.



Figura 4.3: Detecção do correto posicionamento da alma e contagem dos componentes do calçado (ilhoses).  
Fonte: GILARDONI (2011)

#### 4.4 Verificação automática da ausência de objetos estranhos

A radioscopia industrial permite a identificação de objetos estranhos como, por exemplo, pregos ou outros artefatos deixados durante a fase anterior do processo de montagem do calçado.

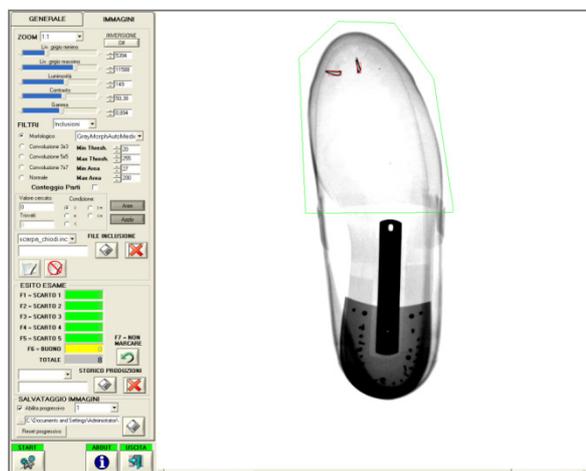


Figura 4.4: Detecção automática de corpos estranhos no calçado  
Fonte: GILARDONI (2011)

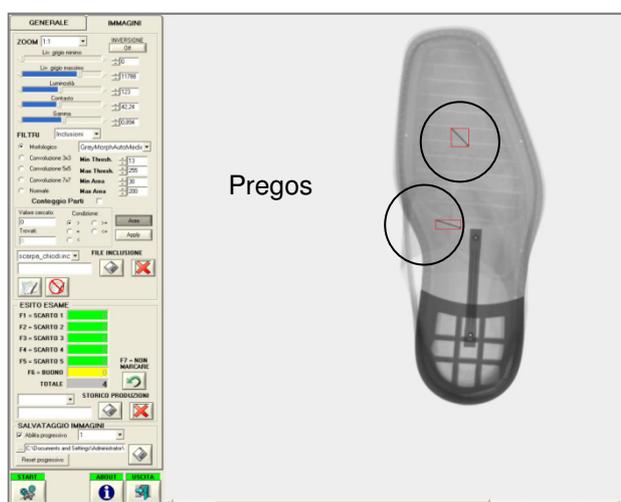


Figura 4.5: Detecção automática de corpos estranhos no calçado  
Fonte : GILARDONI (2011)

#### 4.5 Verificação correta de reforço (alma) em sapatos com saltos

No caso dos sapatos de salto, o enfranque (parte, aproximadamente, no meio do pé) precisa de sustentação para ficar nas alturas sem deformar. Para isso, coloca-se uma pequena régua de metal entre a palmilha de montagem e o reforço da palmilha, mantendo uma curva anatômica. Este reforço é denominado alma, como visto anteriormente.

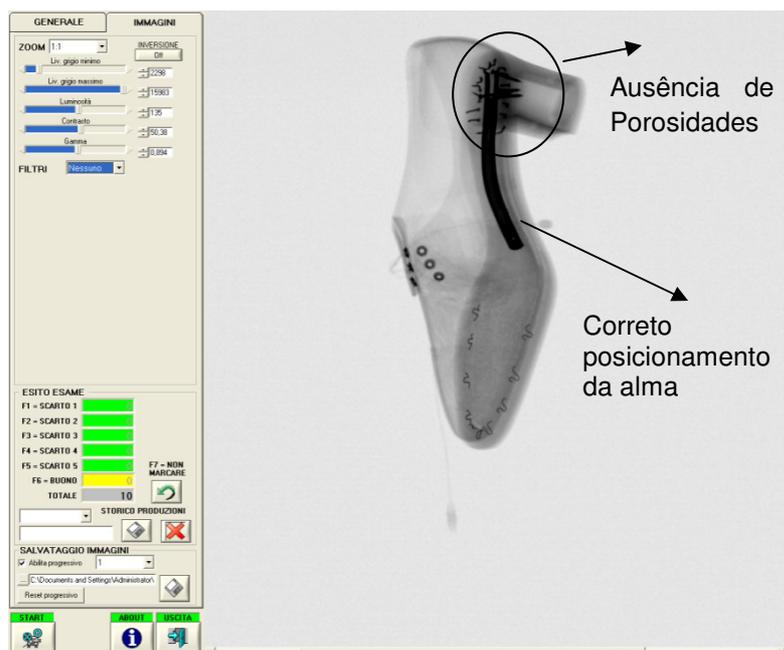


Figura 4.6: Detecção automática das partes de segurança do calçado  
Fonte : GILARDONI (2011)

#### 4.6 Verificação de componentes dos artefatos

Os componentes são todas as peças que são adicionadas ao calçado ou artefato durante o processo de produção. A lista de componentes é muito grande e não para de crescer por causa do aumento da variedade de modelos e a grande influência da moda. Como exemplos, podem ser citados: argolas, enfeites, fivelas, rebites, ilhoses, elástico, reguladores e ponteira, palmilha, salto e solado. Na Figura 4.7 mostra uma aplicação da verificação correta de calçados ou artefatos nas embalagens. Na Figura 4.8 mostra uma aplicação para a identificação e contagem de componentes em bolsas.

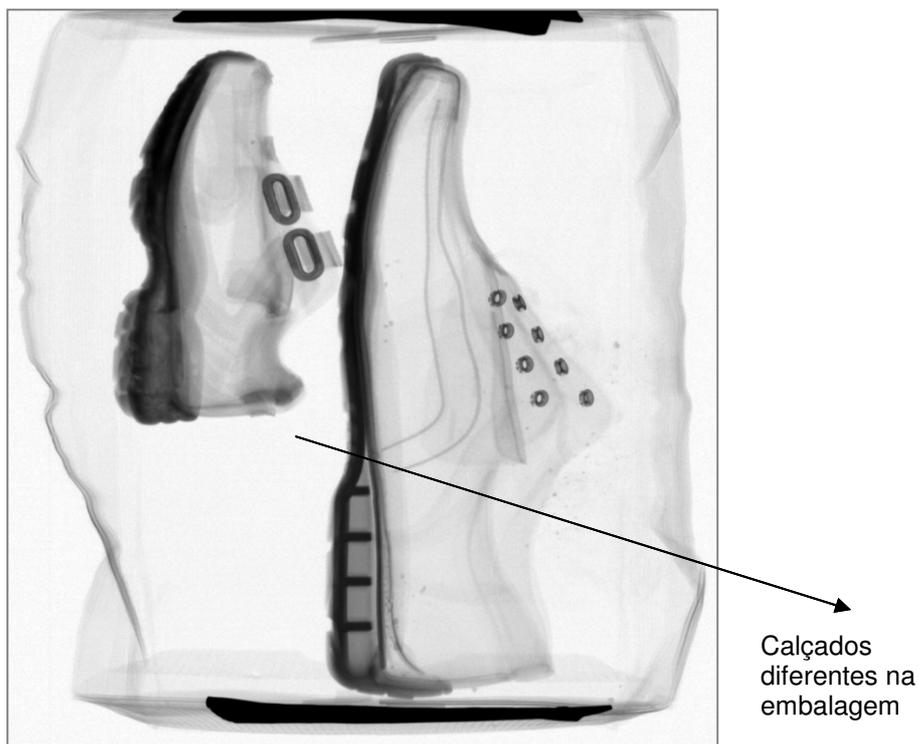


Figura 4.7: Verificação correta de calçados ou artefatos em embalagens  
 Fonte : GILARDONI (2011)

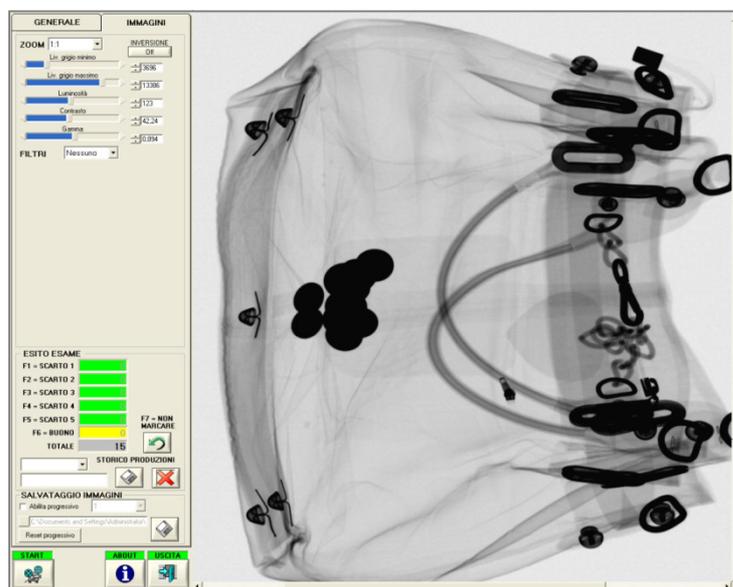


Figura 4.8: Identificação e contagem de componentes em bolsas.  
 Fonte : GILARDONI (2011)

## 5 Proposta de Controle de Qualidade em Calçados de Segurança empregando a Técnica Radioscópica baseada na FMEA

Neste capítulo será abordada uma proposta de integração da técnica de radioscopia ao sistema de gestão da qualidade da produção de calçados de segurança, de forma que os requisitos sejam atendidos de forma integrada e não individual, e ainda, promovendo a característica preventiva da detecção das falhas através do uso da FMEA.

A tecnologia radioscópica pode ser empregada tanto na DFMEA, como na PFMEA. No entanto, optou-se exemplificar a proposta baseada numa FMEA de processo. Neste contexto, foram escolhidos os calçados de segurança, tendo em vista o rigor exigido nos ensaios, devendo atender a normas nacionais e internacionais deste segmento.

No planejamento e controle da qualidade da abordagem proposta, transformam-se as necessidades e expectativas dos clientes (entradas) em ações e modificações no sistema de produção, projeto do produto ou processo (saídas). O planejamento e controle da qualidade é ainda retroalimentado com base nos dados de satisfação (expectativa), falhas no cliente e dados dos processos internos (Fernandes, 2005). Estas entradas e saídas estão representadas na Figura 5.1.

Uma forma de tratar a expectativa do cliente é transformá-la em requisitos do processo, garantindo que esta seja atendida. Analisando a Figura 5.1, verifica-se que as normas técnicas podem ser utilizadas como uma das entradas para um planejamento e controle da qualidade. Neste sentido, foi utilizada como referência a norma ABNT NBR ISO 20344 (2009). Esta norma brasileira refere-se a métodos de ensaios para calçados projetados como EPI (Equipamento de Proteção Individual).

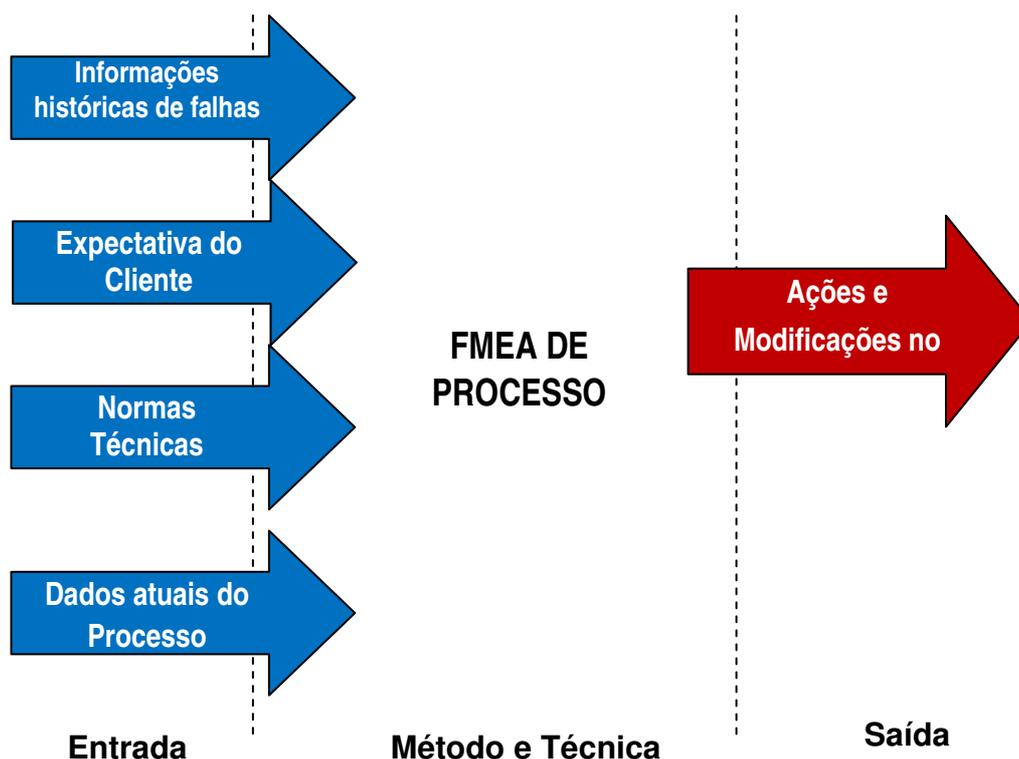


Figura 5.1: Entradas e Saídas do Planejamento do Controle de Qualidade  
 Fonte: Autor

Ainda, essa norma estabelece uma série de requisitos básicos para validação do calçado completo. Dentre estes requisitos será escolhido o item 5.3, que está afeto ao comprimento da biqueira. Para realização deste ensaio a norma recomenda que este seja feito no produto acabado, mas também pode-se tomar um par de biqueiras novas e idênticas para realização do ensaio.

Considerando que será desenvolvida uma FMEA de processo, é relevante descrever as etapas do processo de fabricação de um calçado de segurança, conforme item 5.1

## 5.1 Descrição do processo de fabricação de um calçado de segurança

### Passo 1 : Matéria-Prima

Nesta fase o couro é medido, conferido e selecionado.



Figura 5.2: Medida do Couro  
Fonte : MARLUVAS (2011)

### Passo 2 : Corte

Nesta fase são cortadas as peças que constituem o cabedal: a gáspea, os canos, a lingueta e o colarinho, assim como palmilhas e forros internos.



Figura 5.3: Corte  
Fonte: MARLUVAS (2011)

### Passo 3 : Gravação do CA

Depois, cada parte é trabalhada para ser costurada. O calçado leva a personalização com o número do Certificado de Aprovação (C.A.) emitido pelo Ministério do Trabalho, e se necessário certificados de entidades européias e americanas.

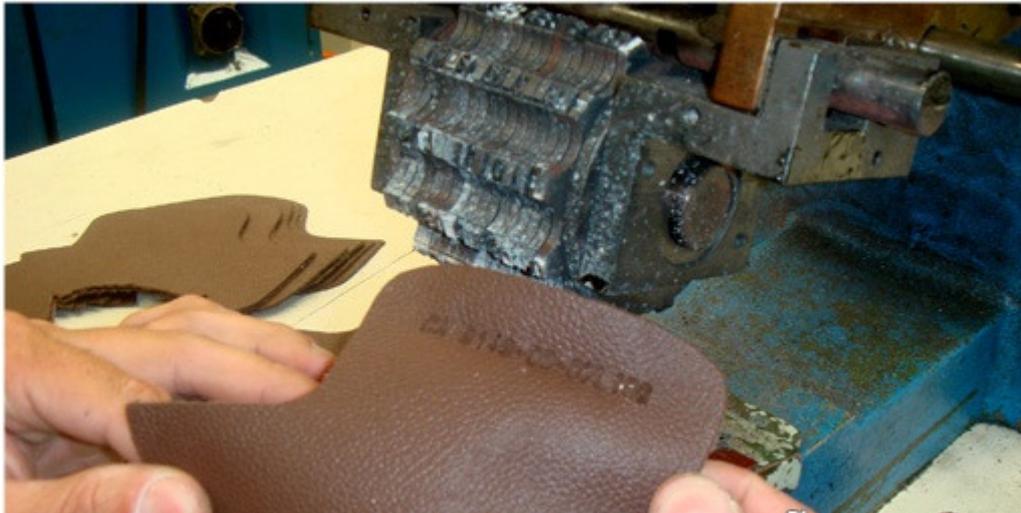


Figura 5.4: Gravação CA  
Fonte: MARLUVAS (2011)

### Passo 4 : Pesponto

Após a preparação das peças é realizada a costura, ou seja, o pesponto.



Figura 5.5: Pesponto  
Fonte: MARLUVAS (2011)

### **Passo 5 : Fase intermediária**

Depois do cabedal pronto, passa-se para a fase intermediária. Nesta fase são colocados os contrafortes, os ilhoses e os rebites e também molda-se a curvatura do pé. A palmilha de montagem também leva a identificação da ficha de produção, para que o calçado seja rastreado.



Figura 5.6: Fase intermediária  
Fonte: MARLUVAS (2011)

### **Passo 6 : Montagem**

No setor de montagem, a palmilha é fixada no cabedal. Nesta fase a fôrma é colocada no cabedal, assim como a biqueira e palmilha. O material da biqueira e palmilha irá depender da aplicação do calçado de segurança.



Figura 5.7: Montagem  
Fonte: MARLUVAS (2011)

### **Passo 7: Asperagem**

Após o processo de montagem o calçado é asperado para receber a injeção do solado.



Figura 5.8: Asperagem  
Fonte: MARLUVAS (2011)

### **Passo 8: Injeção do Solado**

Já montados os cabedais são colocados nas injetoras e recebem, através do processo de injeção direta, os solados de poliuretano mono ou bi-densidade.



Figura 5.9: Injeção do Solado  
Fonte: MARLUVAS (2011)

### Passo 9: Acabamento

Depois do solado injetado, os calçados ficam em processo de espera para o acabamento. Nesta fase, as fôrmas são retiradas e o couro recebe uma camada de graxa e é escovado para maior durabilidade. Logo em seguida, são colocadas as palmilhas de limpeza que ajudam na higienização dos pés. Os calçados são identificados e embalados para expedição.



Figura 5.10: Acabamento  
Fonte: MARLUVAS (2011)

### Passo 10: Conferência

Os calçados são conferidos antes de embalado.



Figura 5.11: Conferência  
Fonte: MARLUVAS (2011)

## 5.2 Desenvolvimento da FMEA de Processo: Exemplificação

Uma vez analisado, de forma geral, as etapas do processo de fabricação de um calçado de segurança. Foi levantado, além do item verificação do comprimento da biqueira, outros exemplos de falhas potenciais relacionados a este item, conforme pode ser visto na Figura 5.12.

ITEM/NOME/FUNÇÃO DO PROJETO/ PROCESSO	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO (S) DA FALHA EM PODENCIAL	SEVERIDADE	CAUSA (S) POTENCIAL DA FALHA	OCORRÊNCIA	CONTROLE ATUAL DE PREVENÇÃO	CONTROLE ATUAL DE DETECÇÃO	RISCO (RPN)
Biqueira	Biqueira montada na posição incorreta	Ergonomia alterada e possível desconforto ao calçar	8	Set up incorreto da máquina ou condução indevida do processo pelo operador	5	Verificação dos processos pelo operador antes de iniciar a produção	Análise destrutiva do primeiro calçado; 1 a cada quantidade determinada	160
	Biqueira deformada antes da montagem	Ergonomia alterada e possível desconforto ao calçar	8	Falta de Controle de Qualidade na produção da biqueira	5	Verificação do operador antes de iniciar o processo de montagem	Inspeção visual e medidas realizadas segundo ABNT NBR ISO 20334/08	160
	Biqueira deformada durante a montagem	Ergonomia alterada e possível desconforto ao calçar	8	Set up ou operação incorreta da máquina	5	Não identificado	Inspeção Visual	200
	Montagem de uma biqueira destinada a outro modelo	Ergonomia e proteção alterada	9	Falha no abastecimento da Máquina	5	Verificação do operador antes de iniciar o processo	Inspeção Visual	180
	Montagem de uma biqueira de material incompatível	Ergonomia e proteção alterada	9	Falha no abastecimento da Máquina	5	Verificação do operador antes de iniciar o processo	Inspeção Visual	180
	Biqueira com comprimento inadequado	Ergonomia e proteção alterada	9	Falha na verificação do comprimento	5	Não identificado (Validação do Projeto)	Análise destrutiva segundo ABNT NBR ISO 20334/08	180

Figura 5.12: Análise dos Potenciais Modo de Falha Potencial para o item de processo Montagem da Biqueira após a introdução da Técnica Radioscópica.

Fonte:Autor

Analisando a Figura 5.12, os critérios para adoção dos índices de severidade, ocorrência e detecção fundamentaram-se nos índices descritos no referencial teórico, apoiando-se nas boas práticas do QS-9000. Porém, como a aplicação da técnica de radioscopia é nova, não há informações históricas. Neste sentido, o índice ocorrência precisaria ser melhor apurado.

No entanto, a FMEA de processo nos mostra que os modos de falha, além daqueles previstos em norma, apresentam severidade grave. A QS-9000 recomenda que, de modo geral, deve ser dada atenção especial quando a *severidade é alta*, independente do RPN resultante. A FMEA - *Reference Manual* (AIAG, 2001) sugere que RPN acima de 100 e/ou severidades acima de 8 (oito) tenham ações corretivas no projeto, a fim de minimizar a gravidade da falha identificada no estudo.

Deve ser ressaltado que, uma vez aprovado o projeto do calçado, precisam ser estabelecidas garantias a fim de maximizar a detecção destes potenciais modos de falha durante o processo de produção. A técnica radioscópica aumenta a capacidade de detecção das falhas, o que corresponde a minimizar o índice de detecção da FMEA, que implica na redução do valor do RPN. Deste modo, verifica-se na Figura 5.13 que o parâmetro detecção pode ser reduzido com a implantação da técnica radioscópica nas linhas de produção.

Para cada modo de falha deve ser descrito quais ações foram realmente adotadas, bem como a data em que entraram em vigor. Obviamente, as ações devem ser tomadas de acordo com a realidade de cada planta.

A FMEA conduz a mitigação dos riscos de eventuais falhas humanas ou de controles de processo. Além disso, a saída da FMEA resulta em modos de falha priorizados, assim como existe a indicação dos meios de prevenção e detecção destes modos de falha. Estas informações serão fundamentais para a execução do plano de controle.

AÇÃO PREVENTIVA RECOMENDADA	NOME DO RESPONSÁVEL E PRAZO	AÇÃO TOMADA	SEVERIDADE	OCORRÊNCIA	DETECÇÃO	RISCO (RPN)
Verificação por Radioscopia em 100 % dos calçados completos	A definir	Descartar o calçado e encaminhar para o setor de montagem para avaliação	8	6	2	96
Verificação por Radioscopia em 100 % dos calçados completos	A definir	Descartar o calçado e encaminhar para o setor de montagem para avaliação	8	5	2	80
Verificação por Radioscopia em 100 % dos calçados completos	A definir	Descartar o calçado e encaminhar para o setor de montagem para avaliação	8	5	2	80
Verificação por Radioscopia em 100 % dos calçados completos	A definir	Descartar o calçado e encaminhar para o setor de montagem para avaliação	9	5	2	90
Verificação por Radioscopia em 100 % dos calçados completos	A definir	Descartar o calçado e encaminhar para o setor de montagem para avaliação	9	5	2	90
Verificação por Radioscopia em 100 % dos calçados completos	A definir	Descartar o calçado e encaminhar para o setor de montagem para avaliação	9	5	2	90

Figura 5.13: Análise dos Potenciais Modo de Falha Potencial – Diminuição do RPN.  
Fonte: Autor

### 5.3 FMEA de Processo e Plano de Controle (PQP): Exemplificação

O plano de controle é o documento onde constam as informações necessárias ao controle da qualidade. As principais informações normalmente encontradas no PQP são: Meio de controle; Método de Controle; Frequência de controle; Tamanho da amostra; Limites de especificação; Plano de reação em caso de desvios.

Meio, método, frequência (F) e tamanho da amostra (Q) no controle do processo são as formas de se garantir a detecção de falhas no processo produtivo. Sendo assim, todos afetam a avaliação do nível de detecção da FMEA de Processo. Neste caso, nota-se que todas as informações constantes no plano de controle, exceto o plano de reação, devem também constar na FMEA de processo. Desta forma, os processos de PQP e FMEA estão inter-relacionados. Na Figura 5.14, é apresentado uma exemplificação de um plano de controle, que poderia ser adotado para inspeção radioscópica de calçados completos.

Inspeção Radioscópica de Calçados Completos		PLANO DE CONTROLE										Tipo: Prótipo Pré-série Pré-produção Série		
		Processo: Montagem da Biqueira					Número: xxxxxx					Registro	Responsável	Reação
		Número	Ação de controle	Especificação	Caract. crítica		Meio de controle	Método de avaliação	Amostra		Qualidade			
S	N				Q	F								
FP1	Verificar se a Biqueira está montada na posição correta	Atender especificações ABNT, NBR, ISO	X		Raios X	Inspeção Radioscópica com auxílio Instrução de trabalho	100%	100%	Qualidade	Operador	Verificar configurações da Máquina de Raios X e realizar novamente o teste, caso o problema persistir comunicar ao inspetor/supervisor do setor de montagem			
FP2	Verificar conformação da Biqueira antes da montagem	Atender especificações ABNT, NBR, ISO	X		Raios X	Inspeção Radioscópica com auxílio Instrução de trabalho	100%	100%	Qualidade	Operador	Verificar configurações da Máquina de Raios X e realizar novamente o teste, caso o problema persistir comunicar ao inspetor/supervisor do setor de montagem			
FP3	Verificar conformação da Biqueira após a montagem	Atender especificações ABNT, NBR, ISO	X		Raios X	Inspeção Radioscópica com auxílio Instrução de trabalho	100%	100%	Qualidade	Operador	Verificar configurações da Máquina de Raios X e realizar novamente o teste, caso o problema persistir comunicar ao inspetor/supervisor do setor de montagem			
FP4	Verificação da compatibilidade do modelo da biqueira com o calçado a ser fabricado	Atender especificações ABNT, NBR, ISO	X		Raios X	Inspeção Radioscópica com auxílio Instrução de trabalho	100%	100%	Qualidade	Operador	Verificar configurações da Máquina de Raios X e realizar novamente o teste, caso o problema persistir comunicar ao inspetor/supervisor do setor de montagem			
FP5	Verificação da compatibilidade do material da biqueira com o calçado a ser fabricado	Atender especificações ABNT, NBR, ISO	X		Raios X	Inspeção Radioscópica com auxílio Instrução de trabalho	100%	100%	Qualidade	Operador	Verificar configurações da Máquina de Raios X e realizar novamente o teste, caso o problema persistir comunicar ao inspetor/supervisor do setor de montagem			
FP6	Verificação do comprimento da biqueira	Atender especificações ABNT, NBR, ISO	X		Raios X	Inspeção Radioscópica com auxílio Instrução de trabalho	100%	100%	Qualidade	Operador	Verificar configurações da Máquina de Raios X e realizar novamente o teste, caso o problema persistir comunicar ao inspetor/supervisor do setor de montagem			

Figura 5.14: Exemplificação de um Plano de Controle  
 Fonte: Autor

## 6

### **Análise das imagens radioscópicas realizadas em calçados brasileiros**

#### **6.1 Aplicação da Técnica Radioscópica como ensaio complementar aos ensaios já exigidos por normativas brasileiras**

Quando se aborda o assunto defeitos e reclamações dos consumidores, é importante examinar a procedência do problema e o que realmente se constitui em defeito do calçado. Os principais problemas podem ser oriundos dos estágios de desenvolvimento e fabricação (ABLAC, 2011).

No processo de fabricação podem ocorrer defeitos decorrentes das operações realizadas durante o mesmo ou relativos à qualidade dos materiais empregados. Exemplos de defeitos de fabricação são: falha na costura, fácil descolamento, quebra do solado, presença de objetos estranhos, entre outros.

Diante do exposto, a técnica radioscópica pode ser um ensaio complementar potencial na identificação de falhas mecânicas ou de falta de material do calçado a ser inspecionado.

A técnica radioscópica pode também ser usada como ensaio complementar para a verificação das falhas no estágio de validação do projeto do calçado. Através da inspeção não destrutiva por Raios X, pode-se verificar qual o efeito em partes desejadas do calçado ao longo do ensaio, quando realizados os testes mecânicos.

Dentre os ensaios mecânicos existentes, pode-se citar como exemplos: resistência à tração e alongamento na ruptura (NBR 14552/2006); determinação da resistência da colagem da sola (NBR 15323/2010); determinação da resistência da fixação de tiras ao solado (NBR 15325/2006).

Especificamente, para calçados usados como EPI estabelecidos pela ABNT NBR ISO 20344/2008, destacam-se ainda os seguintes ensaios mecânicos: determinação da resistência à flexão da sola; determinação da resistência à penetração da sola e resistência ao rasgamento da sola.

## 6.2 Materiais e Métodos

O equipamento utilizado nas inspeções foi o NDT SCANNER da fabricante GILARDONI, conforme apresentado na Figura 6.1.



Figura 6.1: Equipamento NDT SCANNER utilizado na inspeção dos calçados

Na Tabela 6.1 são apresentadas as características técnicas do equipamento utilizado para a inspeção dos calçados.

Tabela 6.1: Característica do equipamento utilizado para inspeção  
Fonte: GILARDONI (2011)

Descrição dos Parâmetros	Dados
Tensão máxima de operação da ampola	160 kV
Corrente	3 mA
Velocidade de inspeção	40 cm/segundo
Número de pixel do detector	1536
Resolução de escaneamento	0,4 mm
Dimensões máximas do objeto a ser inspecionado	450 x 250 mm
Formato da imagem digital gerada pelo sistema	TIFF (Tagged Image File Format)

Quanto as amostras de calçados, foram selecionadas ao acaso, sendo adquiridas no comércio varejista dos estados do Rio de Janeiro e Paraná. Analisaram-se 20 pares de calçados, de tamanhos, tipos, fabricantes e marcas diferentes; dos quais 50 % eram calçados usados como EPI e os demais, calçados femininos.

### 6.3 Resultados e Discussões

Para esta dissertação foram selecionados alguns resultados das imagens obtidas, oriundas dos calçados inspecionados. A seguir são apresentados os resultados, seguido das discussões.

Na Figura 6.2 é apresentada a imagem radioscópica de uma sola de um calçado de segurança, verificou-se a presença de porosidade na região de flexão. A presença de porosidades pode influenciar na resistência à flexão, à penetração e ao rasgamento. Os defeitos identificados não foram perceptíveis por inspeção visual. Não foi identificado a presença de corpo estranho ou objeto perfurante na sola objeto de inspeção.

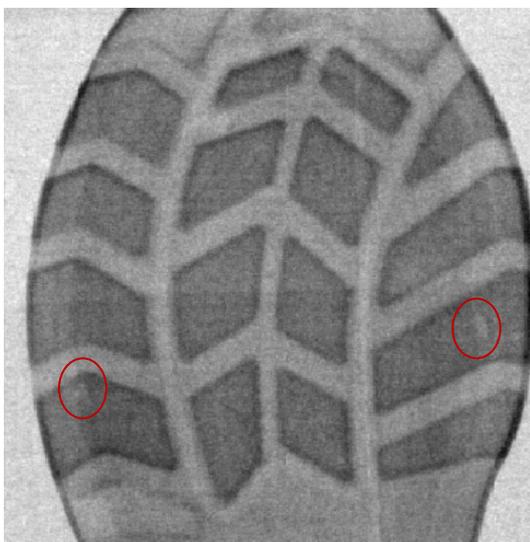


Figura 6.2: Imagem Radioscópica de metade de uma sola de calçado de segurança, sendo identificado a presença de porosidades

Na Figura 6.3 é apresentada a imagem radioscópica de uma sola completa de um calçado de segurança, verificou-se a presença de porosidades na sola do calçado.

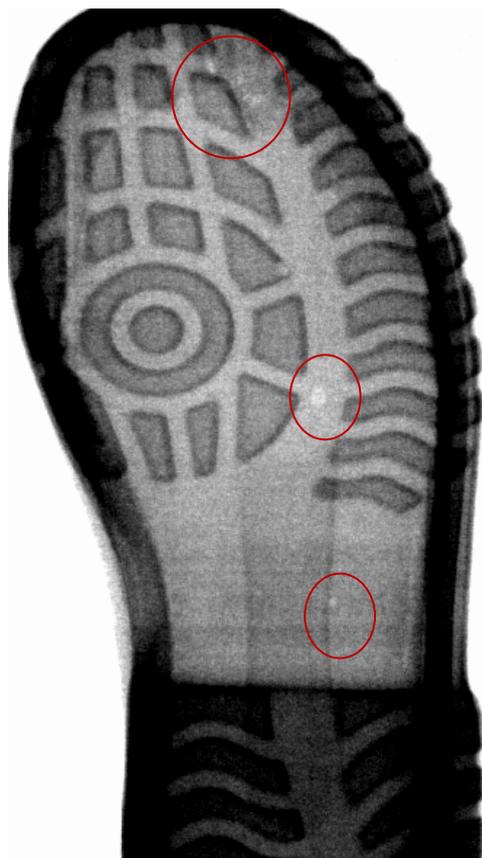


Figura 6.3: Imagem Radioscópica de uma sola completa de calçado de segurança, sendo identificada a presença de porosidades.

Ainda analisando a Figura 6.3, os defeitos identificados não foram perceptíveis por inspeção visual. Não foi identificado a presença de corpo estranho ou objeto perfurante na sola, objeto de inspeção.

No calçado da Figura 6.4 não foi identificado a presença de corpo estranho ou objeto perfurante nos calçados. Verificou-se, neste caso, a presença de todos os ilhoses. No entanto, percebe-se que há um desalinhamento do cabedal, este desalinhamento pode influenciar no conforto aos pés do usuário. Através de recursos do equipamento de Radioscopia, pode-se programá-lo para automaticamente inspecionar o correto posicionamento do cabedal, assim como a contagem dos componentes.

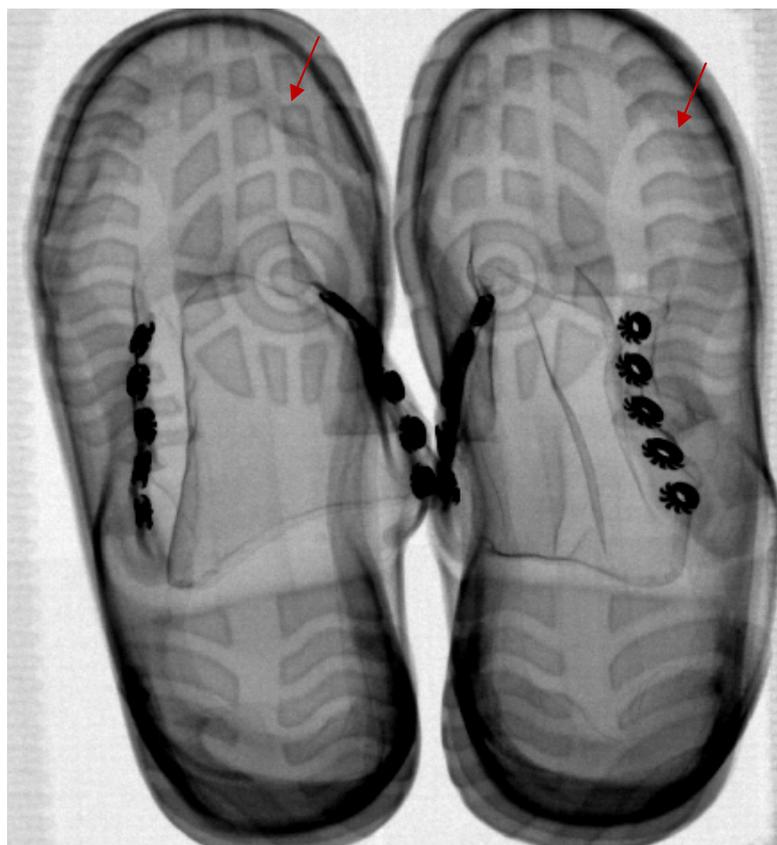


Figura 6.4: Imagem Radioscópica de um calçado completo de segurança, sendo identificado o desalinhamento do cabedal.

No calçado da Figura 6.5 não foi identificado a presença de corpo estranho ou objeto perfurante. A imagem radioscópica tornou evidente a presença das biqueiras. Estas biqueiras são fabricadas em polipropileno, para o par de calçados selecionado. Também foi verificado, neste perfil, que não há presença de rachaduras, porosidades ou falta de material nas referidas biqueiras, assim como nas demais partes do calçado.

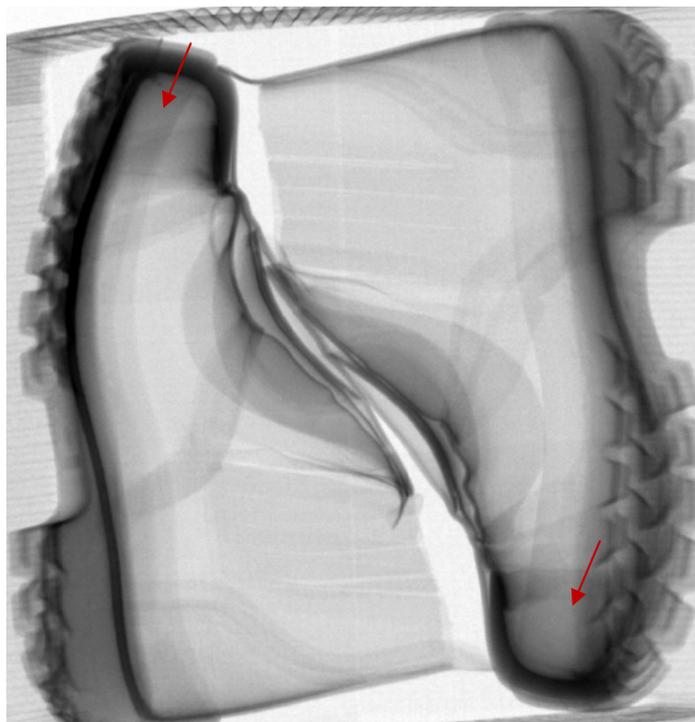


Figura 6.5: Imagem Radioscópica de um calçado completo de segurança, sendo identificado a existência da biqueira

No calçado da Figura 6.6 verifica-se que não há porosidades no salto e que há existência de alma de aço. Percebe-se que há possibilidade de verificar se os pregos estão posicionados de forma correta no salto e se estão sendo utilizados pregos e parafusos adequados e em quantidade conforme especificado no projeto.

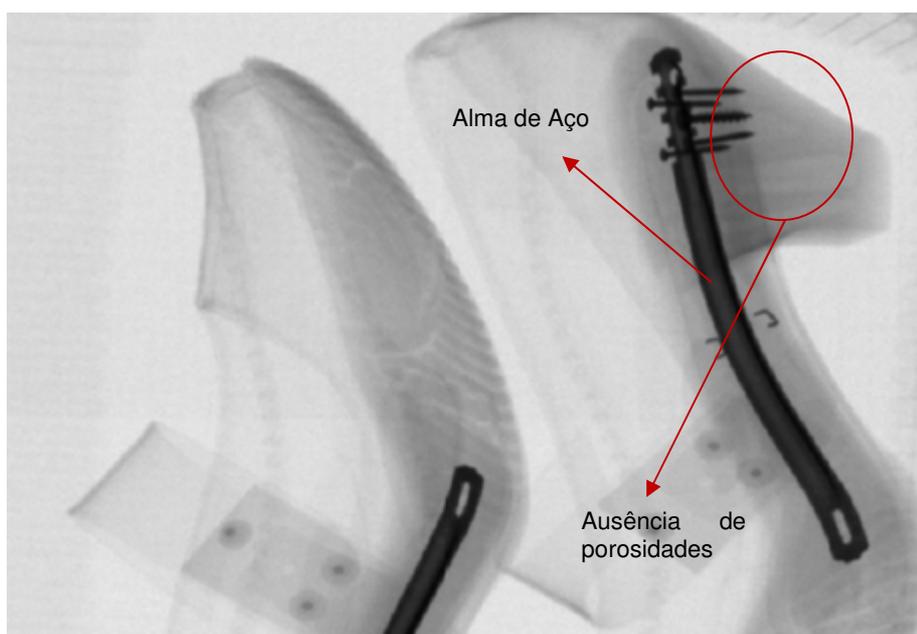


Figura 6.6: Imagem Radioscópica de um calçado feminino, sendo identificado seus elementos de segurança.

Na Figura 6.7 é apresentado um calçado feminino onde verifica-se que existem muitas porosidades no salto e que há existência de alma de aço. Percebe-se que há possibilidade de verificar se os pregos estão posicionados de forma correta no salto e se estão sendo utilizados pregos e parafusos adequados e em quantidade, conforme especificado no projeto.

A presença de porosidades pode influenciar na quebra ou afrouxamento do salto. Estes defeitos não são perceptíveis por inspeção visual.

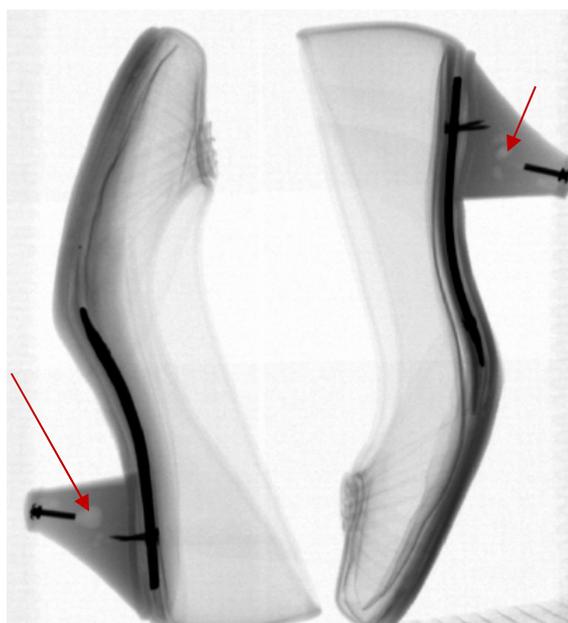


Figura 6.7: Imagem Radioscópica de um calçado feminino, sendo identificado a presença de porosidades no salto.

## 7 Conclusões

Nesta dissertação foi proposto um estudo sobre a radioscopia aplicada à melhoria de processos industriais de controle de qualidade na produção de calçados brasileiros. No Brasil, ainda não são empregados ensaios não destrutivos por inspeção radioscópica nas linhas de produção calçadistas, segundo pesquisa realizada junto aos laboratórios de certificação e fabricantes de calçados.

A potencialidade da verificação do uso da radioscopia foi comprovada positivamente através do estudo sobre os defeitos estruturais que podem ser identificados por Raios X em partes específicas de calçados e artefatos, como discutidos no Capítulo 4 e no Capítulo 6. Concluímos que a técnica radioscópica é potencial para a identificação de falhas mecânicas, falta de materiais e porosidades, tendo seu emprego potencial para o controle de qualidade de saltos em calçados.

Diante do exposto nos Capítulos 4, 5 e 6 conclui-se que a radioscopia pode ser utilizada como ensaio complementar aos já realizados em calçados de segurança como inspeções visuais e ensaios mecânicos, evidenciando a melhoria do controle da qualidade na produção de calçados brasileiros.

No Capítulo 5 foi possível verificar um exemplo da utilização dos conceitos da ferramenta Análise de Modo e Efeitos de Falha (FMEA - *Failure Mode and Effects Analysis*) na condução de processos de controle de qualidade. Após o emprego da Radioscopia foi possível verificar a redução do RPN, onde concluímos que através do emprego da técnica a capacidade de detecção de falhas no processo de fabricação de calçados é aumentada.

O emprego da técnica radioscópica no controle de calçados é recente na indústria de calçados estrangeira, porém muito promissora, pelo fato de permitir análises estruturais mais aprofundadas do calçado, o que reflete em maior segurança e qualidade para os consumidores. Estas avaliações podem se dar no desenvolvimento do projeto do calçado, como durante o processo de fabricação do mesmo.

No entanto, uma das dificuldades encontradas para a criação dos indicadores da FMEA quanto à severidade, ocorrência e detecção, deveu-se a poucos trabalhos publicados no segmento de controle de qualidade em calçados empregando esta ferramenta, como também a inexistência de informações históricas.

Nesta dissertação as avaliações dos indicadores levaram em consideração discussões com os fabricantes de equipamentos de radioscopia, visitas a laboratórios de ensaios em calçados, literatura da área e especialistas na fabricação de calçados. Para o melhor conhecimento da quantificação destes indicadores se faz necessário uma maior discussão entre as partes interessadas, tais como: pesquisadores, fabricantes de calçados, fabricante de equipamentos de radioscopia, institutos metrológicos e normativos, assim como os consumidores.

Ao longo do estudo foi verificado que não há normas técnicas brasileiras, tampouco internacionais que tratem do emprego de ensaios não destrutivos empregando Radioscopia Industrial para a inspeção de calçados, mesmo considerando que esta técnica vem sendo difundida no mercado mundial. Isto faz com que a dissertação apresente um caráter contemporâneo, abrindo possibilidades para o desenvolvimento de trabalhos futuros, assim como a melhoria e criação de novos planos de controle da qualidade para calçados nas mais diversas aplicações e materiais.

## 8

**Referências Bibliográficas**

ABENDI, Disponível em: <http://www.abendi.org.br/snqc.php?w=1024&h=768>, Acesso em 28/01/2011.

ABICALÇADOS, Disponível em : <http://www.abicalcados.com.br/index.html>, Acesso em 28/01/2012.

ABNT NBR ISO 20344/2008: **Equipamentos de Proteção Individual-Métodos de Ensaio para Calçados**, 84 p., 2008

ALMEIDA, D.A; LEAL, F; PINHO, A.F.; FAGUNDES, L.D. **Gestão do Conhecimento na análise de falhas: mapeamento de falhas através de sistema de informação**. Produção, v. 16, n. 1, p. 171-188, Jan./Abr, 2006.

ALVES FILHO, A. G. **Estratégia tecnológica, desempenho e mudança: estudos de casos em empresas da indústria de calçados**. Tese de Doutorado. São Paulo: Escola Politécnica/USP, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LOJISTAS DE ARTEFATOS E CALÇADOS (ABLAC), Disponível em : <http://www.ablac.com.br/>, Acesso em 20/08/2011.

ASTM –E1000- **Standard Guide for Radioscopy**, 2009.

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP. **Potential failure mode and effect analysis (FMEA): Reference Manual**. Michigan, 2001, 78p.

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP. **Quality system requirements: QS-9000**. 3rd Ed., Michigan, 1998. 142p.

BACHEGA, S.; LIMA, A. **Uso da análise de modo e efeitos de falha (FMEA) como apoio à redução do lead time do processo de orçamentação**. XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, São Carlos, SP, Brasil, 2010.

BAYER, **CALÇADOS VERDES**: Bayer desenvolve sapatos feitos de matérias-primas renováveis. Disponível em: [http://www.brasil.diplo.de/Vertretung/brasilien/pt/\\_\\_\\_pr/DZBrasilia\\_\\_Artigos/01\\_\\_\\_2012/110112\\_\\_greenshoebayer.html?archive=3157392](http://www.brasil.diplo.de/Vertretung/brasilien/pt/___pr/DZBrasilia__Artigos/01___2012/110112__greenshoebayer.html?archive=3157392), Acesso 21/01/2012

BEHARA, R. S.; GUNDERSEN, D. E. **Analysis of quality management practices in services**. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 18, n. 6, p. 584-603, 2001.

BIASOLI, P. **Modelagem Bayesiana da confiabilidade de produtos a partir de dados de campo de utilização de garantia.** 2003. 110 p. Monografia - Trabalho de Conclusão para o Curso de Bacharelado em Estatística. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

BRACOL, Disponível em: [http://www.b2bsafety.net/?page\\_id=11](http://www.b2bsafety.net/?page_id=11). Acesso em 20/01/2012

CALARGE, F. A.; LIMA, P. C. **Da abordagem do TQM (Total Quality Management) ao GQM (Global Quality Management): a inserção e utilização da metodologia do projeto axiomático no desenvolvimento de modelos de gestão sistêmica da qualidade.** Gestão & Produção, v. 8, n. 2, p. 196-213, 2001.

CAMPOS, S.H.; CALANDRO, M.L. **Nova configuração do mercado internacional de calçados e os impactos sobre a indústria calçadista gaúcha.** Ensaios FEE, Porto Alegre, v. 30, Número Especial, p. 517-546, out, 2007.

CAVALCANTI, E.M.T; NETO, H.S.C.A; ALMEIDA, S.F. **Inovação tecnológica, gestão do conhecimento e competitividade nas pequenas e médias empresas: um estudo exploratório na indústria calçadista em Campina Grande.** III SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2006.

CENTRO TECNOLÓGICO DO COURO, CALÇADO E AFINS-CTCCAA. **Materiais, Solados e Palmilhas para Montagem.** Centro Tecnológico do Couro e Afins, ABICALÇADOS: PSI/APEX: CTCCA, 2002.

CENTRO TECNOLÓGICO DO COURO, CALÇADO E AFINS-CTCCAB. **Estruturação Fabril: modelagem de calçados, fabricação de calçados.** Centro Tecnológico do Couro e Afins, ABICALÇADOS: PSI/APEX: CTCCA, 2002.

CESAREO, R. *X-ray physics: Interactions with matter, production, detection.* Rivista del Nuovo Cimento, Vol. 23, N° 7, 231p, 2000.

CNEN, Disponível em : <http://www.cnen.gov.br/>. Acesso em 20/01/2011.

CORRÊA, A.R. **O complexo coureiro-calçadista brasileiro.** Rio de Janeiro: BNDES, p.65-92, 2001.

DIKMEN, I.; BIRGONUL, M. T.; KIZILTAS, S. **Strategic use of quality function deployment (QFD) in the construction industry.** Building and Environment, v. 40, n.2, p. 245-255, 2004.

EBRAHIMIPOUR, V.; REZAIE, K. & SHOKRAVI, S. **An Ontology Approach to Support FMEA Studies.** Expert Systems with Applications. Vol. 37, n. 1, pp. 671-677, 2010.

ESTORILIO, C; POSSO, R. **Redução das irregularidades identificadas na aplicação do FMEA de processo: um estudo em produtos estampados. The reduction of irregularities in the use of “process FMEA”: a study for a cold stamping process.** Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v.11, n. 4, p. 995-1027, out./dez, 2011.

FERNANDES, J. M. R. **Proposição de abordagem integrada de métodos da qualidade baseada no FMEA.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2005.

FRANCISCHINI, A. S.; AZEVEDO, P. F. **Estratégias das empresas do setor calçadista diante do novo ambiente competitivo: análise de três casos.** Gestão e produção. VI. 10, nº 3. p. 251-265, dezembro de 2003.

GANIM, A. **Setor Elétrico Brasileiro aspectos regulamentares e tributários.** Editora Canalenergia, 2003.

GARCIA, R.; MOTTA, F. G.; AMATO NETO, J. **Uma análise das características da estrutura de governança em sistemas locais de produção e suas relações com a cadeia global.** Gestão e Produção, v. 11, n. 3, p. 343-354, 2004.

GARCIA, R.C. **Aglomerações setoriais ou distritos industriais: um estudo das indústrias têxtil e de calçados no Brasil.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 1996.

GILARDONI, Disponível em: <http://www.gilardoni.it/>, acesso 20/08/2011.

GODINHO, M. F; FERNANDES, F.C.F.; LIMA, A.D. **Pesquisa em Gestão da Produção na indústria de calçados: revisão, classificação e análise.** Gestão da Produção, São Carlos, v. 16, n. 2, p. 163-186, abr.-jun. 2009.

GORINI, A.P.F.; CORRÊA, A.R.; SILVA, C.V.D.G. **A indústria calçadista de Franca.** Rio de Janeiro: BNDES, dez.p.1-19, 2000.

GREMAUD, A. P.; VASCONCELLOS, M. A. S.; TONETO Jr., R. **Economia brasileira contemporânea.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade.** Rio de Janeiro : Qualitymark Petrobras, 2001. 288p.

LIMA, I. C. B. **Quantificação Histomorfométrica 2D a partir de Tomografia Computadorizada 3D,** Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

LIMA, S.A; MARTINS, M.F. **A indústria de calçados de couro no Brasil: uma descrição a partir do modelo de Porter.** ABEPRO, 2001.

LINS, G.E., **Perfil da indústria de calçados, Relatório final do projeto perfil da indústria de calçados, realizado pelo instituto de economia da UFRJ para o SEBRAE nacional.** SEBRAE, v.3, p.1 - 50, 2005

KNOLL, G.F., **“Radiation Detection and Measurement”**, 2<sup>a</sup> ed., New York, John Willey & Sons, 1989.

MACHADO, A.S. **Estudo Comparativo da Radiografia Convencional e Computadorizada para análise de ligas metálicas**, Dissertação Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro-COPPE, 2011.

MARLUVAS, Disponível : <http://www.marluvas.com.br/br/home/>, acessado em 20/12/2011.

MILANEZE, K.L.N.; BATALHA, M.O. **Análise da competitividade do setor calçadista do estado de São Paulo.** Revista de Administração, São Paulo, v.43, n.2, p.162-175, abr./maio/jun, 2008.

MINAYO, M. C.; SANCHES, O. **Quantitativo-qualitativo: oposição ou complementaridade?** Caderno de Saúde Pública, p. 239-262, 1993

NASCIMENTO, C.L. **Avaliação de Desempenho em Programas Através da Análise de Seus Benefícios: Um Exemplo do Programa TV Digital Para as Áreas Rurais**, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2010.

OLIVEIRA, D. F. **Desenvolvimento de sistema de inspeção por técnicas radiográficas na análise de perda de adesão em dutos compósitos**, Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, Dezembro, 2010.

PEREIRA, G.M.; SELLITTO, M.A; BORCHARDT, M. **Alterações nos fatores de competição da indústria calçadista exportadora devido à entrada de competidores asiáticos.** Produção, v. 20, n. 2, abr./jun., p. 149-159, 2010.

PINTEC (PESQUISA DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA) - IBGE, Disponível em: < <http://www.pintec.ibge.gov.br/>>, Acessado em:06/11/2010.

SANTOS, T.S; SILVA, D.M. **Inovações tecnológicas e organizacionais: práticas e representações de trabalhadores na indústria calçadista do vale dos sinos (RS)**, Barbarói, Santa Cruz do Sul, n. 35, ago./dez. 2011.

SCHMITZ, H. **Sistemas locais de produção e desafios globais: a indústria calçadista do Vale dos Sinos**, no Rio Grande do Sul. In: CASTILHOS, C. (Org). Programa de apoio aos sistemas locais de produção: a construção de uma política publica no RS. Porto Alegre: FEE, 2002.

SILVA, R. L. A.; SOARES, P. R. F. T. & SILVA, A. K. B. **Análise de risco utilizando a ferramenta FMEA em um gerador de vapor.** In: XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 28, 2008, Rio de Janeiro. Anais.Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008.

TAUHATA, L, SALATI, I., DI PRINZIO, R.. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**, Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Comissão Nacional de Energia Nuclear, 5ª revisão, Rio de Janeiro, 2003.

TENG, S. G.; HO, S. M.; SHUMAR, D.; LIU, P. C. **Implementing FMEA in a collaborative supply chain environment. International**. Journal of Quality & Reliability Management, v. 23, n. 2, p. 179-196, 2006.

UENO, A. **Which management practices are contributory to service quality? International**. Journal of Quality & Reliability Management, v. 25, n. 6, p. 585-603, 2008.

VELHO, S.R.K.; HUMMAN, P.V.; GARCIA,R. **Análise dos indicadores empresariais de inovação tecnológica para o setor coureiro-calçadista**. Revista Tecnicouro, 2007.

VERGARA, S.C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**, 6ª Edição. São Paulo: Editora Atlas, 2005.

YIN, Robert K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**, 3ª Edição, Bookman, 2006. Tradução da obra original Case Study Research: Design and Methods, 3rd. Ed. Sage, Newbury Park, CA, 2003.