Victor Barbosa Martin

**Melhoria da confiabilidade metrológica na inspeção de
componentes usinados com aplicação na indústria
nuclear**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio
(Área de Concentração: Metrologia para Qualidade
e Inovação).

Orientador:

Professor Dr. Mauricio Nogueira Frota
Programa de Pós-Graduação em Metrologia da Pontifícia Universidade
Católica do Rio de Janeiro (PosMQI/PUC-Rio)

Co-Orientador:

Professor Dr. Gustavo Daniel Donatelli
Programa de Pós-Graduação em Metrologia da Universidade Federal de
Santa Catarina (PosMCI/UFSC)

Rio de Janeiro, 14 abril de 2010

Victor Barbosa Martin

Melhoria da confiabilidade metrológica na inspeção de componentes usinados com aplicação na indústria nuclear

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre em Metrologia pela PUC-
Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo
assinada.

Professor Dr. Mauricio Nogueira Frota

Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia da (PósMQI/PUC-Rio)
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Professor Dr. Gustavo Daniel Donatelli

Co-Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia da (Pós MCI/UFSC)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Carlos Roberto Hall Barbosa

Programa de Pós-Graduação em Metrologia da (PósMQI/PUC-Rio)
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Dr. Maurício de Campos Porath

Fundação Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras (CERTI)

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial da Pós-Graduação
Centro Técnico Científico (PUC-Rio)

Rio de Janeiro, 14 de abril de 2010

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

Victor Barbosa Martin

Graduou-se em Engenharia Mecânica (1989), (habilitação industrial) pelo CEFET-CSF (Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca) no Rio de Janeiro. Atualmente é Engenheiro da INB (Indústrias Nucleares do Brasil).

Ficha Catalográfica

Martin, Victor Barbosa

Melhoria da confiabilidade metrológica na inspeção de componentes usinados com aplicação na indústria nuclear / Victor Barbosa Martin; orientadores: Mauricio Nogueira Frota, Gustavo Daniel Donatelli. – 2010.

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

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, 2010.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Incerteza. 3. Medição por coordenadas. 4. MMC. 5. Indústria nuclear. I. Frota, Mauricio Nogueira. II. Donatelli, Gustavo Daniel. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. IV. Título.

CDD: 389.1

Aos nossos antepassados, dando continuidade à manifestação da curiosidade e à
busca do conhecimento humano.

Agradecimentos

À INB, empresa para a qual trabalho, que pelo seu programa de incentivo a educação proporcionou esta oportunidade.

Ao Professor Gustavo Donatelli pelo inteligente apoio técnico e por ter facilitado o acesso ao Laboratório de Máquinas de Medir Coordenadas da Fundação CERTI, fundamental no desenvolvimento da pesquisa.

E principalmente ao Prof. Maurício N. Frota, que acreditou em minha idéia, e apesar de todos os percalços vivenciados alimentou-me de estímulo, permitindo-me encontrar forças para prosseguir na busca do meu objetivo.

Resumo

Martin, Victor Barbosa; Frota, Mauricio Nogueira. **Melhoria da confiabilidade metrológica na inspeção de componentes usinados com aplicação na indústria nuclear.** Rio de Janeiro, 2010. 130 p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente pesquisa de mestrado contribui para a melhoria da confiabilidade metrológica de componentes usinados, utilizados na indústria nuclear para produção de energia elétrica, produzidos com reduzidas tolerâncias definidas em projeto. O trabalho é de interesse da empresa Indústrias Nucleares do Brasil (INB), que atua na cadeia produtiva do urânio e produz o elemento combustível para as usinas nucleares de Angra, pois aprimora a análise do processo de medir. Cumprindo o **objetivo** da dissertação e fazendo uso da técnica de medição por coordenadas, foi desenvolvida uma metodologia para avaliação do processo de inspeção dimensional de componentes usinados da indústria nuclear. A **motivação** é a melhoria da confiabilidade metrológica requerida na inspeção, agregando conhecimento e inovação tecnológica. O trabalho incorpora uma análise das incertezas associadas ao processo de medição por coordenadas de componentes usinados. A **metodologia** utiliza a pesquisa bibliográfica e a experimental e, à luz dos métodos de avaliação de incertezas baseados numa formulação estatística, avalia processos de medição de interesse da indústria nuclear. Dentre os **resultados** são caracterizadas as influências na medição da característica objeto da medição; é avaliada a divergência da medição em relação a um padrão e desenvolvida uma ferramenta para a avaliação e melhoria do processo de medição. Como **conclusão**, o trabalho contribui com o aprimoramento da técnica de medição por coordenadas incorporando inovações tecnológicas na melhoria da qualidade dos processos de inspeção dimensional.

Palavras-chave

Metrologia; incerteza; medição por coordenadas; MMC; indústria nuclear.

Abstract

Martin, Victor Barbosa; Frota, Mauricio Nogueira (Advisor). **Improvement of the metrological reliability in the inspection of machined components with applications in the nuclear industry.** Rio de Janeiro, 2010. 130 p. MSc. Dissertation - Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de Concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This Master's Thesis contributes to the improvement of metrological reliability of machined components that are used in the nuclear industry for the production of electrical energy and which are produced with reduced tolerances defined in the project. The work is of interest to the company Indústrias Nucleares do Brasil (INB), which operates in production of the uranium fuel assemblies for nuclear power plants in Angra, improving the analysis of the measuring process. The dissertation fulfill the goal, by the development of a methodology to use in evaluation of coordinate measuring technique that is used in the process of dimensional inspection of machined components for the nuclear industry. The motivation is to improve the metrological reliability required in the inspection, adding knowledge and technological innovation. The work incorporates an analysis of uncertainties associated with the measurement process by coordinates, of machined components. The methodology uses bibliographic research and experimental methods of evaluation of uncertainty based on a statistical formulation, in measurement procedures of interest to the nuclear industry. In the results are characterized the influences of the measurement on the object characteristic of measurement, the divergence is evaluated by measuring against a standard. It was developed a tool to evaluate and improve the measurement process. In conclusion, the study contributes to the improvement of the coordinate measuring technique incorporating technological innovations, improving the quality of procedures for dimensional inspection.

Keywords

Metrology; uncertainty; coordinate measuring; MMC; nuclear industry.

Sumário

1 . Introdução	14
1.1. O ambiente da pesquisa	14
1.1.1. O controle dimensional de componentes usinados	15
1.1.2. Particularidades do controle dimensional da INB	17
1.1.3. Garantia da qualidade das medições	18
1.1.4. Práticas da garantia da qualidade das medições na INB	20
1.2. Foco da pesquisa	21
1.3. Objetivos da pesquisa	22
1.3.1. Objetivo geral	22
1.3.2. Objetivos específicos	23
1.4. Metodologia	24
1.5. Estrutura da dissertação	25
2 . Fundamentos da medição por coordenadas	27
2.1. Fontes de erros em medição por coordenadas	28
2.1.1. A máquina de medir por coordenadas	29
2.1.1.1. A estrutura	29
2.1.1.2. O sistema de apalpação	30
2.1.2. Ambiente de medição	32
2.1.3. A peça objeto da medição	32
2.1.4. Estratégia de medição	33
2.1.5. O operador	35
2.2. Avaliação da confiabilidade metrológica de processos por MMC	36
2.2.1. Metrologia para garantia da qualidade	37
2.2.2. O manual de análise dos sistemas de medição	39
2.2.3. A incerteza de medição	41
2.2.4. Incerteza em medição por coordenadas	42
3 . Confiabilidade da inspeção de componentes usinados	45
3.1. Características dos componentes usinados sob avaliação	46

3.1.1. Considerações funcionais das características do estudo	48
3.2. A construção de um padrão geométrico	48
3.2.1. Definição das características a calibrar	50
3.2.2. Seleção e calibração do padrão	51
3.2.3. A estratégia de medição	53
3.2.4. Estratégia da calibração do padrão	54
3.2.5. Estratégia da medição industrial	54
3.3. Metodologia para a realização e implantação dos estudos na MMC INB	57
3.3.1. Estudo da estabilidade e tendência	59
3.3.2. Estudo de repetitividade	60
4 . Resultados experimentais	61
4.1. Controle aplicado à estrutura de medição	62
4.2. Estudo de repetitividade do processo de medição	62
4.2.1. Planeza (AY1) da superfície de referência T	63
4.2.2. Diâmetro (BN) e posição (BE) dos furos S1 e S2	64
4.2.3. Paralelismo (CZ) em relação a referência “T” e espessura (BA)	66
4.2.4. Diâmetro (BM) e posição (BD) dos furos P de fixação dos tubos guia	68
4.2.5. Resumo dos resultados dos estudos de repetitividade	70
4.3. Estudo de estabilidade e tendência do processo de medição	70
4.3.1. Estabilidade da temperatura	71
4.3.2. Planeza (AY1) da superfície de referência “T”	72
4.3.3. Diâmetro (BN) e posição (BE) dos furos S1 e S2	73
4.3.4. Paralelismo(CZ) e espessura(BA) das sapatas em referência à “T”	77
4.4. Resumo dos resultados do estudo de estabilidade	81
4.5. Correlação com a temperatura	82
5 . Discussão e oportunidade de melhoria	84
5.1. Análise da medição na INB	86
5.1.1. Análise dos pontos fortes	86
5.1.2. Análise dos pontos fracos	87

5.1.3. Análise das oportunidades para melhorar a gestão da medição tridimensional na INB	87
5.1.4. Oportunidades para melhorar a medição do Bocal Inferior	88
6 . Conclusões	90
7 . Bibliografia	97
8 . Siglas e abreviações	103
9 . Anexos	105

Lista de figuras

Figura 1. Instalações da Fábrica de Combustível Nuclear (FCN1) da INB	15
Figura 2. Fluxo de produção de componente usinado	18
Figura 3. Medição do componente Bocal Inferior (BI) na INB	21
Figura 4. Erros geométricos associados à operação de uma máquina de medir por coordenadas	30
Figura 5. O processo de medição e suas consequências	38
Figura 6. Bocal Inferior do Elemento Combustível (BI do EC)	46
Figura 7. Estrutura do Elemento Combustível	47
Figura 8. Elemento Combustível 16 NGF e uma vareta do EC em corte	47
Figura 9. MMC utilizada para calibrar a peça padrão na CERTI	49
Figura 10. Localização, no BI, das características do estudo	51
Figura 11. Peça BI fixada em dispositivo	55
Figura 12. Medição no modo <i>scanning</i> do furo S, na INB	55
Figura 13. Sequência de medição do furo P, por apalpação, na INB	56
Figura 14. Sequência de medição da característica CZ, na INB	56
Figura 15. Sequência de medição da característica AY1, na INB	57
Figura 16. Esquema da estrutura física do laboratório de medição	62
Figura 17. Região de planeza AY1	63
Figura 18. Característica de planeza AY1	64
Figura 19. Localização dos furos de posicionamento S1 e S2	64
Figura 20. Característica de dimensão BN, furos S1 e S2	65
Figura 21. Característica de posição BE	65
Figura 22. Localização da base das sapatas de apoio do BI	66
Figura 23. Característica de paralelismo CZ	67
Figura 24. Característica de dimensão BA	67
Figura 25. Localização dos furos de fixação dos tubos guia	68
Figura 26. Característica de diâmetro BM	68
Figura 27. Característica de posição BD1	69
Figura 28. Característica de posição BD2	69
Figura 29. Tempo entre repetições	71

Figura 30. Variação da temperatura	72
Figura 31. Característica de planeza AY1	73
Figura 32. Diâmetro BN do furo S1	74
Figura 33. Diâmetro BN do furo S2	74
Figura 34. Característica de posição BE do furo S1	75
Figura 35. Característica de posição BE do furo S1	76
Figura 36. Característica de posição BE do furo S2	76
Figura 37. Controle do diâmetro BM do furo P4	77
Figura 38. Controle do diâmetro BM do furo P2	78
Figura 39. Desvio vetorial da característica de posição BD1 do furo P4	79
Figura 40. Desvio vetorial da característica de posição BD1 do furo P2	79
Figura 41. Desvio vetorial da característica de posição BD2 do furo P4	80
Figura 42. Desvio vetorial da característica de posição BD2 do furo P2	81
Figura 43. Característica geométrica de planeza AY1	82
Figura 44. Característica geométrica de posição BE no furo S1	83
Figura 45. Influência da variação de temperatura no resultado da medição	83

Lista de tabelas

Tabela 1. Tabela de similaridade, fonte ISO TS 15530-3	51
Tabela 2. Resultados de repetitividade	70
Tabela 3. Resultados de estabilidade	82