

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ANDRÉ RICARDO FELÍCIO

**ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO EM PEÇAS AERONÁUTICAS ATRAVÉS
DO ESTUDO DE R&R (REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE)**

Guaratinguetá
2012

ANDRÉ RICARDO FELÍCIO

ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO EM PEÇAS AERONÁUTICAS ATRAVÉS DO
ESTUDO DE R&R (REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE)

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva

Guaratinguetá
2012

F314a	<p>Felício, André Ricardo</p> <p>Análise do sistema de medição em peças aeronáuticas através do estudo de R&R (repetibilidade e reprodutibilidade) / André Ricardo Felício – Guaratinguetá : [s.n], 2012.</p> <p>94 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 94</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva</p> <p>1. Medição I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 681.2.08</p>
-------	---

unesp



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO EM PEÇAS AERONÁUTICAS ATRAVÉS
DO ESTUDO DE R&R (REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE)**

ANDRÉ RICARDO FELÍCIO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MESSIAS BORGES SILVA
Orientador/UNESP-FEG


Prof. MSc RICARDO BATISTA PENTEADO
UNESP-FEG


Eng. GILSON MARQUES
Membro Externo

Dezembro de 2012

Dedico este trabalho, de modo especial, aos meus vitoriosos pais, José Carlos e Édna, que com seus espíritos de confiança e luta, foram os grandes incentivadores para que eu continuasse o curso, aos meus seis irmãos (Beto, Cláudia, Lene, Érica, Rodrigo e Dezza), e à minha futura esposa Priscila, que sempre esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, o criador do Céu e da Terra, o responsável pela minha fé em Jesus Cristo, que me deu vida, inteligência, sabedoria e saúde para eu poder enfrentar todos os obstáculos do dia-a-dia.

Agradeço aos meus excelentíssimos pais, *José Carlos e Édna*, que desde o início da minha vida foram os meus exemplos de extrema humildade, lutas, dificuldades, desafios, esforços e discernimento. Qualidades, as quais foram os alicerces capazes de me incentivar em meus estudos e decisões difíceis, e que também, ao mesmo tempo, sempre acreditaram no meu potencial e nas minhas futuras vitórias.

Aos meus amigos da *República Sarcófago*, que me ajudaram nos estudos e proporcionaram tantos momentos bons durante a vida acadêmica, e estavam por perto nos momentos em que o compromisso com a faculdade e o trabalho estavam difíceis.

Ao meu amigo e ex-gerente da empresa Maxion Sistemas Automotivos S.A., *Eng. Celio Pacheco de Siqueira*, que me presenteou com todo o seu conhecimento técnico em engenharia de máquinas e em especial, ao seu grande ensinamento de vida, me auxiliando, me aconselhando nos momentos de dúvidas e dificuldades enfrentadas em minha vida.

Ao meu professor orientador *Messias Borges*, por todo auxílio durante as aulas de Organização da Produção e de Administração da Manutenção Industrial, e fora de aula quanto às dúvidas enfrentadas durante o período de estágio e da elaboração do trabalho de graduação.

À Liebeherr Aerospace Brasil Ltda, em particular ao supervisor e contratante *Eng. Mário Coelho* pela confiança em mim depositada e pelo conhecimento ensinado, e ao gerente industrial *Eng. Rogério Gimenez* pelas oportunidades e desafios propostos.

A todos os amigos e colegas de trabalho, que me ensinaram parte de suas experiências profissionais e de vida.

À minha futura esposa Priscila, que soube me mostrar que os momentos mais difíceis da vida são de extrema importância para o amadurecimento humano, pois se Deus nos proporcionou estes momentos, foi porque Ele sabia que seríamos capazes de enfrentá-los, vencê-los e de tirarmos algum ensinamento disso.

Este trabalho contou com o apoio da seguinte entidade:

- **Liebherr Aerospace Brasil, Indústria e Comércio de Equipamentos Aeronáuticos Ltda** – pela disponibilização das peças e dos equipamentos de medição para o desenvolvimento do trabalho.

A estrada para o sucesso não é uma reta. Há uma curva chamada fracasso, um trevo chamado confusão, um quebra-molas chamado família. Mas, se você tiver um estepe chamado determinação, um motor chamado fé e um motorista chamado Deus, você chegará a um lugar chamado SUCESSO.

Autor desconhecido

FELÍCIO, A. R. **Análise do Sistema de Medição em peças aeronáuticas através do Estudo de R&R (Repetibilidade e Reprodutibilidade)**. 2012. 94 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

A Análise do Sistema de Medição (MSA – *Measurement System Analysis*) é uma metodologia estatística desenvolvida para estudar e analisar o comportamento dos sistemas de medição, e com isso, permitir o aumento da confiança das leituras realizadas pelos instrumentos de medição. É muito utilizada no setor automotivo desde a década de 90, sendo um requisito obrigatório para a aprovação de peças conforme a Norma ISO do setor automotivo. Entretanto, a indústria aeroespacial não exige este tipo de Estudo, uma vez que a grande maioria das peças aeronáuticas possuem características (cotas) com tolerâncias muito apertadas, fechadas, ou seja, na casa de microns. Este trabalho tem por objetivo criar listas de recomendações para definições de instrumentos de medição na elaboração de planos de controle, as quais correlacionam os campos de tolerâncias das características para diferentes ajustes e a aceitação do instrumento, classificada em ótimo, recomendável e não recomendável, através do Estudo de R&R (Repetibilidade e Reprodutibilidade) em peças aeronáuticas. Toda a metodologia da parte experimental baseou-se na estratégia moderna de melhoria contínua, o DMAIC (Definir → Medir → Analisar → Implantar → Controlar), a fim de se conseguir melhorar o método de medição utilizado no controle das peças aeronáuticas usinadas, identificando e reduzindo as variações do processo de medição. Os resultados do Estudo de R&R em grande parte dos instrumentos de medições manuais foram considerados aceitáveis e/ou recomendáveis, ou seja, com valores de %P/T e %RR menores do que 30%, fornecendo dados estatísticos que possibilitaram a elaboração de tabelas de recomendações, as quais, a partir deste trabalho, transformaram-se em documentos de extrema importância e auxílio para a Engenharia de Processos, tendo em suas mãos um estudo técnico capaz de identificar qual instrumento é o mais adequado para se obter um controle dimensional mais robusto de uma dada característica presente no desenho ou projeto de uma peça aeronáutica.

PALAVRAS-CHAVE: Medição, Peças Aeronáuticas, Análise do Sistema de Medição, R&R (Repetibilidade e Reprodutibilidade), Ligas de alumínio.

FELÍCIO, A. R. **Measurement System Analysis in aeronautics parts through of the R&R Study (Repeatability and Reproducibility)**. 2012. 94 f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

The Measurement System Analysis (MSA - Measurement System Analysis) is a statistical methodology developed to study and analyze the behavior of the measurement systems, and, therefore, allow the increased of the confidence readings performed by measuring instruments. It's widely used in the automotive industry since the 90's and is a mandatory requirement for the approval of the parts according to ISO Standard of the automotive sector. However, the aerospace industry doesn't require this type of Study, once which the vast majority of aeronautics parts have characteristics (dimensions) with very tight tolerances, closed, ie, at the home of microns. This work aims to create lists of recommendations for definitions of measuring instruments in developing of control plans, which correlates tolerances fields of characteristics for different settings and acceptance of the instrument, classified as optimum, recommended and not recommended, through of the study of R&R (Repeatability and Reproducibility) in aeronautics parts. Every methodology of the experimental part was based on modern strategy of continuous improvement, the DMAIC (Define → Measure → Analyze → Implant → Control), in order to achieve better measurement method used in the control of milling aeronautics parts, identifying and reducing the variations of the measurement process. The results of the R&R Study in large part of measuring instrument manuals were considered acceptable and/or recommended, ie with values of %P/T and %RR lower than 30%, providing statistical data which have enabled the elaboration of tables of recommendations, which, from this work, have turned into very important documents and aid for Process Engineering, having in their hands a technical study able to identify which is the most appropriate instrument to get a more robust dimensional control of a given feature present in the drawing or design of a aeronautics part.

KEYWORDS: Measurement, Aeronautics Parts, Measurement System Analysis, R&R (Repeatability and Reproducibility), Aluminum Alloys.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia DMAIC, estratégia moderna de melhoria contínua	21
Figura 2 – Conceitos de exatidão, precisão e incerteza	22
Figura 3 – Linearidade na avaliação da exatidão de um método	22
Figura 4 – Comparação de um processo com boa e baixa discriminação	24
Figura 5 – Soma da variabilidade da medição à variabilidade do processo, o resultado pode ser uma grande confusão	25
Figura 6 – A variabilidade total dos dados de um processo é constituída de dois componentes: o próprio processo e o sistema de medição	26
Figura 7 – Sistema de medição não exato: as medidas de posição do processo serão viciadas	26
Figura 8 – Sistema de medição não preciso: a variabilidade do sistema de medição afeta muito a variação observada do processo (caso b)	27
Figura 9 – Fatores que contribuem para a variabilidade dos resultados	28
Figura 10 – Estratégia para a escolha de planos para ensaio de R&R	30
Figura 11 – Comparação do erro de medição com %P/T 30% e 10%	33
Figura 12 – Impacto da medição com %P/T = 30% na especificação do produto	33
Figura 13 – Plano hierárquico com os fatores operador e amostra	34
Figura 14 – Plano cruzado com os fatores operador e amostra	34
Figura 15 – Gráfico eletrônico criado no software Excel ilustrando o valor do CV% para 3 analistas e 10 amostras	36
Figura 16 – Certificado de matéria-prima da Liga Al 2618A T8511 fornecido pela Kastens & Knauer	37
Figura 17 – Part Number 6713-0731, propriedade de Liebherr Aerospace Brasil	38
Figura 18 – Certificado de matéria-prima da liga Al 3.4364 T73 fornecido pela Fuchs	39
Figura 19 – Part Number 1386-2201, propriedade da Liebherr Aerospace Brasil	40
Figura 20 – Paquímetro quadrimensional	41
Figura 21 – Súbuto convencional (a), diatest (b) e ogiva (c), respectivamente	42
Figura 22 – Extensores e suportes utilizados nos instrumentos súbuto, diatest e ogiva	42
Figura 23 – Micrômetro interno de três pontas	43
Figura 24 – Passos para a melhoria do sistema de medição	44

Figura 25 – Separação das peças, desenhos e instrumento de medição	45
Figura 26 – Sequência de como criar uma planilha de coleta de dados para o Estudo de R&R no Minitab 15	47
Figura 27 – Planilha para a coleta de dados do Estudo de R&R	48
Figura 28 – Planilha já com os dados coletados e lançados do Estudo do paquímetro	49
Figura 29 – Procedimento Stat/Quality Tools/Gage Study/Gage R&R Study (Crossed)	50
Figura 30 – Procedimento Gage R&R Study (Crossed), entrada dos dados do Estudo	50
Figura 31 – Procedimento Gage R&R Study (Crossed)/Options ..., dados do campo de tolerância (Upper spec – Lower spec)	51
Figura 32 – Resultados numéricos do método cruzado para a “orelha” do paquímetro paquímetro quadrimensional	52
Figura 33 – Resultados gráficos do método cruzado para a “orelha” do paquímetro quadrimensional	53
Figura 34 – A melhoria técnica pode ser feita em 7 passos ligados ao DMAIC	56
Figura 35 – Diagrama de causa e efeito com as causas que afetam a medição do Ø interno através da “orelha”	57
Figura 36 – Gráfico de Pareto	58
Figura 37 – Nova análise numérica com foco nas possíveis causas potenciais que afetam a medição do Ø interno	60
Figura 38 – Gráfico de Pareto focando outras possíveis causas potenciais	61
Figura 39 – Corpo-de-prova com 03 (furos) de Ø6,0 mm e profundidades diferentes	62
Figura 40 – Novos resultados numéricos com foco na profundidade de 0,4mm do furo de Ø6,0mm	63
Figura 41 - Novos resultados numéricos com foco na profundidade de 2,0 mm do furo de Ø6,0 mm	64
Figura 42 - Novos resultados numéricos com foco na profundidade de 6,0 mm do furo de Ø6,0 mm	64
Figura 43 – Peça P/N 6713-0731, paquímetro quadrimensional e desenho	67
Figura 44 – Resultados numéricos do método cruzado para os “bicos” do paquímetro quadrimensional	67
Figura 45 - Resultados gráficos do método cruzado para os “bicos” do paquímetro quadrimensional	68
Figura 46 – Resultados numéricos após a retirada da amostra 03 do lote G0902	69

Figura 47 - Peça P/N 6713-0731 e haste” do paquímetro quadrimensional	70
Figura 48 – Resultados numéricos do método cruzado para a “haste” do paquímetro quadrimensional	71
Figura 49 – Resultados gráficos do método cruzado para a “haste” do paquímetro quadrimensional	71
Figura 50 – Diagrama de causa e efeito com as causas que afetam a medição de profundidade	73
Figura 51 – Gráfico de Pareto com possíveis causas potenciais que afetam a medição de profundidade	73
Figura 52 – Novos resultados numéricos com foco nas possíveis causas potenciais que afetam a medição de profundidade	75
Figura 53 - Peça P/N 6713-0731, “encosto traseiro” do paquímetro quadrimensional	76
Figura 54 - Resultados numéricos do método cruzado para o “encosto traseiro” do paquímetro quadrimensional	77
Figura 55 - Resultados gráficos do método cruzado para o “encosto traseiro” do paquímetro quadrimensional	77
Figura 56 – Novos resultados numéricos após a retirada do avaliador C do lote G0902	78
Figura 57 – Peça 1386-2201, ogiva e anel padrão	80
Figura 58 – Resultados numéricos do método cruzado para a ogiva	81
Figura 59 – Resultados gráficos do método cruzado para a ogiva	81
Figura 60 – Peça 1386-2201, súbito convencional e anel padrão	83
Figura 61 - Resultados numéricos do método cruzado para o súbito convencional	84
Figura 62 - Resultados gráficos do método cruzado para o súbito convencional	84
Figura 63 - Peça 1386-2201, diatest e anel padrão	86
Figura 64 - Resultados numéricos do método cruzado para o diatest	87
Figura 65 - Resultados gráficos do método cruzado para o diatest	87
Figura 66 – Corpo-de-prova, micrômetro interno de 3 pontas e anel padrão	89
Figura 67 - Resultados numéricos do método cruzado para o micrômetro interno de 3 pontas	90
Figura 68 - Resultados gráficos do método cruzado para o micrômetro interno de 3 pontas	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resolução de alguns instrumentos manuais de medição	23
Tabela 2 – Número de categorias distintas	24
Tabela 3 – Métodos utilizados para o cálculo dos valores de precisão	30
Tabela 4 – Tabela eletrônica criada no software Excel para o cálculo do CV%	35
Tabela 5 – Cálculo do CV% para 09 analistas, 10 amostras e 3 repetições	46
Tabela 6 – Investigação e priorização das possíveis causas potenciais que afetam a medição do Øinterno	59
Tabela 7 – Melhorias identificadas após o Estudo de R&R da “orelha” do paquímetro quadrimensional	65
Tabela 8 - Melhorias identificadas após o Estudo de R&R dos “bicos” do paquímetro quadrimensional	69
Tabela 9 – Investigação e priorização das possíveis causas potenciais que afetam a medição de profundidade	74
Tabela 10 – Recomendações para o uso do paquímetro quadrimensional	79
Tabela 11 – Recomendações para o uso da ogiva	82
Tabela 12 – Recomendações para o uso do súbito convencional	85
Tabela 13 – Recomendações para o uso do diatest	88
Tabela 14 – Recomendações para o uso do micrômetro interno de 3 pontas com resolução de 0,001 mm	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNC	- Comando Numérico Computadorizado
FEG	- Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
IT	- Instrução de Trabalho
LAB	- Liebherr Aerospace Brasil Ind. e Com. de Eq. Aeronáuticos Ltda.
RIU	- Relatório de Inspeção de Usinagem
UNESP	- Universidade Estadual Paulista
MSA	- Análise do Sistema de Medição, <i>Measurement System Analysis</i>
R&R	- Repetibilidade e Reprodutibilidade
%P/T	- Variação da Análise em Relação à Tolerância do Processo
%RR	- Variação da Análise em Relação à Variação Total do Processo
P/NP	- Calibrador Passa Não Passa
3D	- Máquina de Medição Tridimensional, <i>Coordinate Measuring Machine</i>
ndc	- número de categorias distintas
c.d.p.	- corpo-de-prova

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1.	Objetivo	18
1.1.1.	Objetivo Específico	18
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1.	Terminologia básica	19
2.1.1	Medição	19
2.1.2.	Dispositivo de medição	19
2.1.3.	Sistema de Medição.....	19
2.2.	Qualidade dos dados de medição	19
2.3.	Análise do Sistema de Medição.....	20
2.3.1.	Conceitos básicos nos Estudos de Sistemas de Medição	21
2.3.2.	Estudo de R&R para dados contínuos.....	25
2.3.3.	Condições de repetibilidade e reprodutibilidade.....	27
2.3.4.	Métodos de ensaio para avaliar a precisão da medida	29
2.3.5.	Requisitos necessários ao conduzir um Estudo de R&R.....	31
2.4.	Índices de capacidade do Sistema de Medição	32
2.5.	Planos cruzados.....	33
3.	METODOLOGIA	37
3.1.	Materiais utilizados	37
3.2.	Instrumentos de medição utilizados	40
3.2.1.	Paquímetro Quadrimensional	40
3.2.2.	Ogiva, Diatest e Súbito.....	41
3.2.3.	Micrômetro interno de três pontas	43
3.3.	Software.....	43
3.4.	Métodos	44
3.4.1.	Fase D: Definir o processo a ser melhorado	45

3.4.2.	Fase M: Medir o processo.....	46
3.4.3.	Fase A: Analisar	51
3.4.4.	Melhoria Técnica.....	56
3.4.4.1.	Identificação de causas potenciais.....	56
3.4.4.2.	Investigação e priorização	58
3.4.4.3.	Geração de soluções	60
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1.	Característica distância versus “boca” do paquímetro quadrimensional.....	66
4.2.	Característica profundidade versus “haste” do paquímetro quadrimensional	70
4.3.	Característica ressalto versus “encosto traseiro” do paquímetro quadrimensional ...	76
4.4.	Característica Øinterno versus ogiva.....	80
4.5.	Característica Øinterno versus súbito convencional	83
4.6.	Característica Øinterno versus diatest	86
4.7.	Característica Øinterno versus micrômetro interno de três pontas	89
5.	CONCLUSÕES	92
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94

1. INTRODUÇÃO

Hoje, o grande desafio de um sistema de medição robusto é o mesmo desafio dos outros departamentos da empresa: o de agregar valor ao processo produtivo. Para auxiliar os ávidos usuários de números e informações, existem vários manuais com várias ferramentas a serem aplicadas para análise do sistema de medição, e é justamente neste “mar” de oportunidades que equívocos acontecem.

Não são raras às vezes em que, ao aplicar ferramentas para analisar o sistema de medição, muitas pessoas se esquecem de fazer a seguinte pergunta: “O que isso vai agregar de valor ao meu processo produtivo?”. Ao deixar de fazer esta pergunta, o usuário das ferramentas de análise do sistema de medição potencializa a probabilidade de cometer equívocos.

A decisão de ajustar ou não ajustar um processo de manufatura, agora é comumente baseada em dados de medição. Os dados de medição, ou alguns valores estatísticos calculados a partir deles, são comparados com os limites de controle estatístico do processo; se a comparação indica que o processo está fora de controle estatístico, algum ajuste (de algum tipo) é então realizado. Se não, permite-se que o processo siga sem ajuste (MEASUREMENT SYSTEM ANALYSIS - REFERENCE MANUAL, THIRD EDITION, 2002).

A Análise do Sistema de Medição (MSA – Measurement System Analysis) é uma metodologia estatística desenvolvida para estudar e analisar o comportamento do sistema de medição e, proporcionar o aumento de confiança e certeza na leitura obtida nos instrumentos. Um sistema de medição que não propicia a certeza ou a confiança na medição pode levar a empresa a realizar grandes investimentos na aquisição de instrumentos e outros meios de medição. É importante identificar o que pode causar esta deficiência, antes de tomar a decisão. E estudos mal elaborados podem fazer com que a empresa direcione seus recursos para o lugar errado ou, talvez que não precisem se realizados, Ou seja, a sua empresa pode estar comprando instrumentos mais caros ou com mais recursos do que o que realmente você precisa. Ou ainda, pode estar utilizando o instrumento errado.

Hoje a Análise do Sistema de Medição é utilizada em muitas empresas e a ferramenta mais aplicada é o estudo de R&R (Repetibilidade e Reprodutibilidade), o qual guarda suas peculiaridades e quando mal utilizada pode causar sérios problemas para o sistema de como um todo. O R&R tem a função de analisar a variação da largura, ou seja, como está a variabilidade do sistema de medição que vai causar impacto na dispersão dos dados.

Segundo Mandel (1997), para que um estudo de R&R seja conduzido com êxito, alguns requisitos são importantes, tais como: uso de medidas cegas de forma que os analistas não sabem que está sendo realizada uma avaliação do sistema; é importante que as condições em que são realizadas as análises do estudo de R&R sejam as mesmas que as reinantes no dia-a-dia; distribua as amostras aleatoriamente entre os analistas; as análises realizadas devem ser independentes, isto é, todos os passos são realizados novamente “para cada nova amostra”; é interessante que as amostras utilizadas no estudo representem a faixa de variação usual do processo; a quantidade de amostras devem ser suficiente para poder estimar a variabilidade do método de análise.

1.1. Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é obter listas e/ou tabelas de recomendações para definições de instrumentos de medição na elaboração de planos de controle, as quais correlacionam os campos de tolerâncias para diferentes ajustes e a aceitação do instrumento, classificada em ótimo, recomendável e não recomendável, através do Estudo de R&R (Repetibilidade e Reprodutibilidade) em peças aeronáuticas usinadas.

1.1.1. Objetivo específico

Obter um controle dimensional mais robusto do processo e um maior domínio técnico das variáveis que influenciam um sistema de medição.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Terminologia básica

2.1.1. Medição

É definida como a “atribuição de números [ou valores] às coisas materiais para representar as relações existentes entre elas, no que concerne às suas particularidades”. A atribuição de números é definida como processo de medição, e o valor atribuído é chamado de valor da medição (MSA - REFERENCE MANUAL, 2002).

2.1.2. Dispositivo de medição

É qualquer aparato utilizado para obter medições; este termo é frequentemente utilizado para descrever especificamente os aparatos usados no local onde se situa o processo de produção; inclui os aparatos tipo passa/não-passa, ou seja, medição por atributo (MSA - REFERENCE MANUAL, 2002).

2.1.3. Sistema de Medição

É a coleção de instrumentos ou dispositivos de medição, padrões, operações, métodos, dispositivos de fixação, software, pessoal, ambiente e premissas utilizadas para quantificar a unidade de medição ou corrigir a avaliação de uma característica sendo medida; o processo completo utilizado para obter medições (MSA - REFERENCE MANUAL, 2002).

A partir destas 03 (três) definições básicas mencionadas acima, observa-se que um processo de medição pode ser visto como um processo de manufatura que produz dados como resultado, o que o torna extremamente útil.

2.2. Qualidade dos dados de medição

A qualidade dos dados de medição é definida pelas propriedades estatísticas das múltiplas medições obtidas a partir de um sistema de medição operado sob condições estáveis. Se as medições de uma característica estão próximas ao valor do padrão mestre, diz-

se que a qualidade dos dados é alta. Da mesma maneira, se as medições estão distantes do valor do padrão mestre, então a qualidade dos dados é baixa. Uma das razões mais comuns da baixa qualidade dos dados é a excessiva variação existente num conjunto de medições, em função da interação entre o sistema de medição e o seu ambiente (WHEELER, 1995).

Se esta interação propicia uma excessiva variação, observa-se que a qualidade dos dados torna-se tão baixa, podendo ser considerada inútil, pois a variação do sistema de medição poderá mascarar e / ou influenciar a variação do processo de manufatura.

2.3. Análise do Sistema de Medição

A MSA (Análise de Sistema de Medição – Measurement Systems Analysis) é uma metodologia estatística desenvolvida para estudar e analisar o comportamento dos sistemas de medição, e, com isso, permitir o aumento da confiança das leituras realizadas pelos ou nos instrumentos de medição, sendo utilizada, tanto para instrumentos de medição replicável, como também para instrumentos cuja medição não é possível de ser replicada.

A medição de dados chega a ser frustrante muitas vezes porque a maioria dos sistemas de medição das empresas é inadequada para fazer as melhorias do processo. As estatísticas mostram:

- Dados contínuos: 50 – 100% dos sistemas de medição de todo tipo de empresa são ruins;
- Dados atributos: 85 – 100% dos sistemas de medição são ruins (MANDEL, 1997).

O assunto pode ser tão crítico que a equipe de melhoria de um projeto Lean Seis Sigma pode precisar interromper o projeto até que a medição tenha sido melhorada (Figura 1). Isto significa que antes que a equipe inicie a coleta de dados deve determinar se o seu sistema de medição é bom ou não.

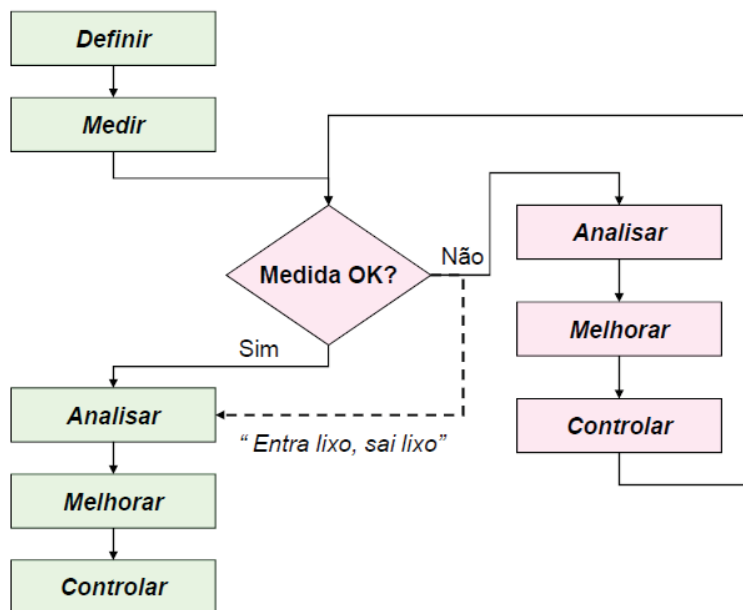


Figura 1 – Metodologia DMAIC, estratégia moderna de melhoria contínua (HARRY, 2000).

2.3.1. Conceitos básicos nos Estudos de Sistemas de Medição

De acordo com Mandel (1997), as propriedades básicas que devem ser avaliadas são:

- Exatidão: especialmente se a mesma propriedade é realizada por diferentes laboratórios com equipamentos diferentes;
- Precisão: avaliar se a variabilidade da medição é pequena quando comparada ao desvio padrão total do processo e à largura da especificação;
- Resolução e Discriminação: o menor valor da escala de medição não pode ser muito grande quando comparado à tolerância do produto;
- Estabilidade: a medição mantém suas propriedades ao longo do tempo;
- Linearidade: a exatidão da medida é a mesma ao longo de toda a escala de valores.

Uma análise apresenta **exatidão** quando a média de várias medidas realizadas na mesma amostra coincide com o valor “verdadeiro” da amostra. Nesta definição adota-se como valor “verdadeiro” às medidas realizadas por laboratórios de referência, usualmente sobre amostras padrão (Figura 2).

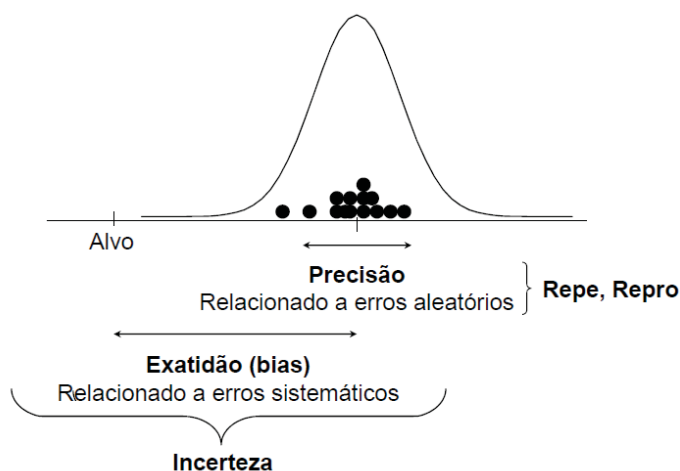


Figura 2 – Conceitos de exatidão, precisão e incerteza (MSA – REFERENCE MANUAL, 2002).

Quando a medição atinge valores em uma faixa considerada grande, é importante manter padrões internos nos extremos e no meio da amplitude para determinar se o sistema tem a propriedade de **linearidade** (Figura 3). A linearidade de um sistema de medição é determinada usando algumas amostras padrão que cobrem a faixa de variação de interesse e medindo algumas vezes cada amostra. Os dados são plotados em um diagrama de dispersão. Se inclinação da reta de mínimos quadrados é próxima de 1 (um), indica que o sistema tem linearidade. Se o sistema tem linearidade, mas o intercepto da reta não é zero, o sistema não é exato (BOTHE, 1997).

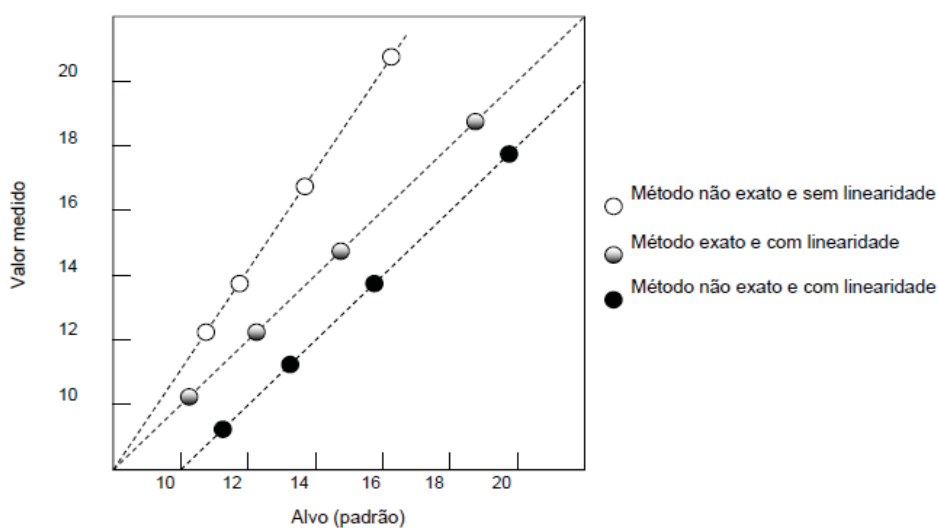


Figura 3 – Linearidade na avaliação da exatidão de um método (BOTHE, 1997).



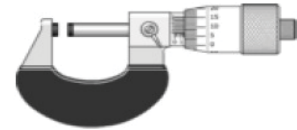
Um sistema de medição tem a capacidade de discriminação se detecta e indica adequadamente pequenas mudanças na característica medida. Quanto maior a discriminação, menor é a mudança que pode ser detectada pelo equipamento de medição. Resolução e discriminação são usadas como sinônimos, mas há uma grande diferenciação entre as duas palavras.

A **resolução** está relacionada com a unidade de medição ou menor valor da escala de medição que pode discriminar eficazmente sem agrupar ou arredondar as medições. Está mais associada ao aparelho de medição (Tabela 1). Como regra geral:

$$\text{Largura de especificação} / \text{unidade} \geq 10$$

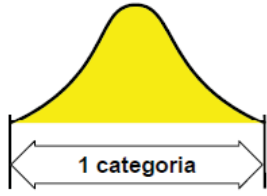
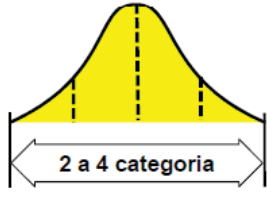
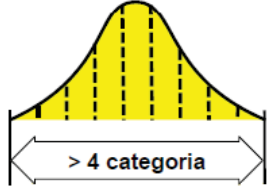
É a chamada “regra dos dez”, ou seja, dentro da largura de especificação, deveriam “entrar” pelo menos 10 unidades da escala de medida do equipamento.

Tabela 1 – Resolução de alguns instrumentos manuais de medição.

<p>Régua Resolução = 1 milímetro</p>	
<p>Paquímetro Resolução = 0,01 milímetro</p>	
<p>Micrômetro Resolução = 0,001 milímetro</p>	

A **discriminação da medição** como um todo está mais relacionada com a variação geral da medição e não só com a resolução do aparelho. Este conceito está relacionado com o número de categorias distintas (ndc: *number of distinct categories*) pelo sistema de medição e é calculado pelo software Minitab. O valor é aceitável se o ndc > 4 ou 5 (Tabela 2 e Figura 4).

Tabela 2 – Número de categorias distintas.

Figura	Controle do Processo	Classificação do Produto
 <p>1 categoria</p>	<p>Somente pode ser usado para controle se:</p> <ul style="list-style-type: none"> • a variação do processo é pequena se comparada com as especificações • A principal fonte de variação causa uma mudança na média do processo 	<ul style="list-style-type: none"> • Inaceitável para estimar parâmetros e índices • Somente indica se o processo produz peças dentro ou fora da especificação (passa/não-passa)
 <p>2 a 4 categoria</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pode ser usado com técnicas de controle de semi-variáveis baseadas na distribuição • Pode produzir gráficos de controle insensíveis 	<ul style="list-style-type: none"> • Geralmente inaceitável para estimar parâmetros e índices pois produz somente estimativas grosseiras
 <p>> 4 categoria</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pode ser usado com gráficos de controle 	<ul style="list-style-type: none"> • Recomendado

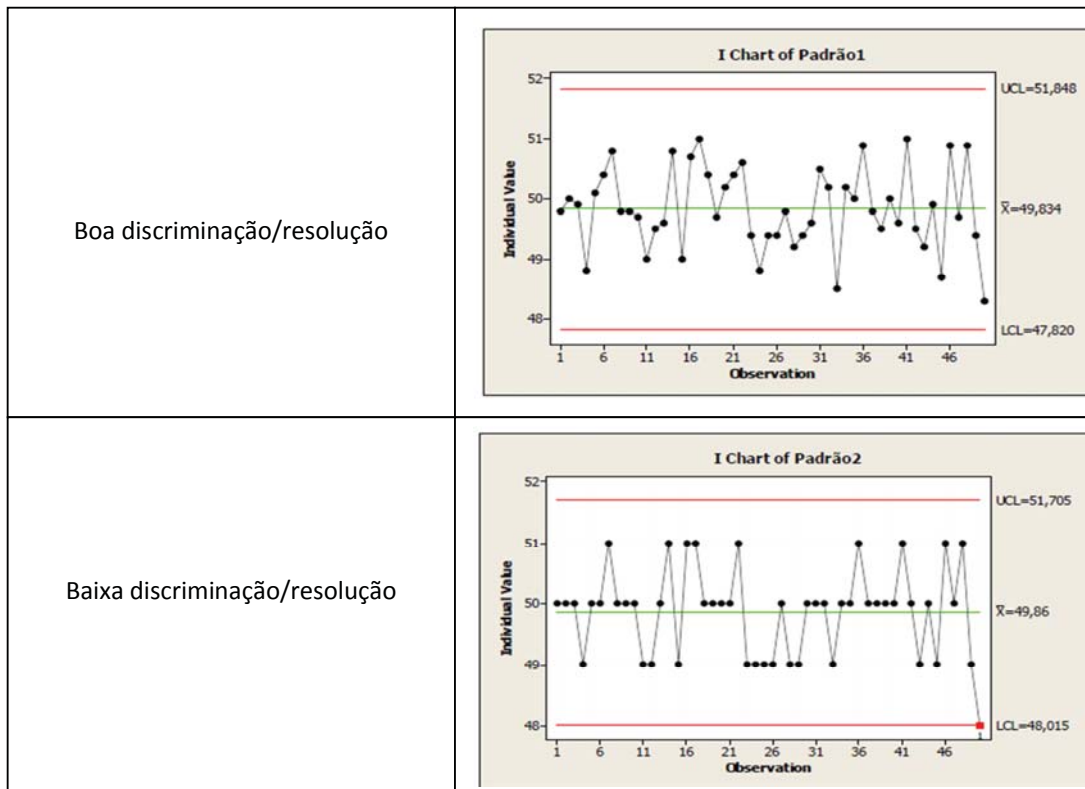


Figura 4 – Comparação de um processo com boa e baixa discriminação (FELÍCIO, 2012).

2.3.2. Estudo de R&R para dados contínuos

A avaliação da precisão da medição é importante, pois é um componente inseparável da variabilidade dos dados coletados no processo. A variabilidade própria do processo se confunde com a variabilidade do “processo de medição” (Figura 5). Uma variabilidade elevada pode impedir qualquer esforço de melhoria.

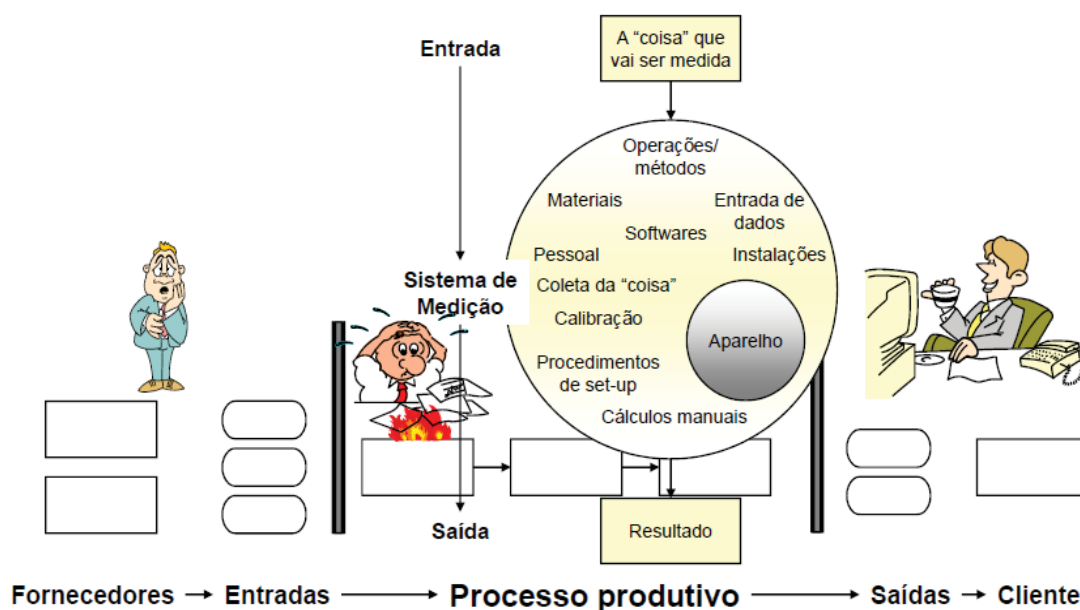


Figura 5 – Soma da variabilidade da medição à variabilidade do processo, o resultado pode ser uma grande confusão (ROTHER, 1999).

Para Costa, Epprecht, Carpinetti (2004), a variabilidade total presente em um conjunto de valores de uma característica X obtidos com um instrumento de medição é resultante da combinação da variabilidade inerente ao processo produtivo (de peça para peça) e da variabilidade inerente à medição. Assim, a partir da lei de aditividade de variâncias, pode-se escrever:

$$\text{Variabilidade total do processo} = \sqrt{(\sigma_p)^2 + (\sigma_{MS})^2} \quad (1)$$

Se a variabilidade do sistema de medição (S_{MS}), a qual tem dois componentes, a repetibilidade e a reprodutibilidade (Figura 6), for grande será difícil tomar qualquer ação de melhoria ou controle do processo, ou seja, “as coisas não ficam claras!”.

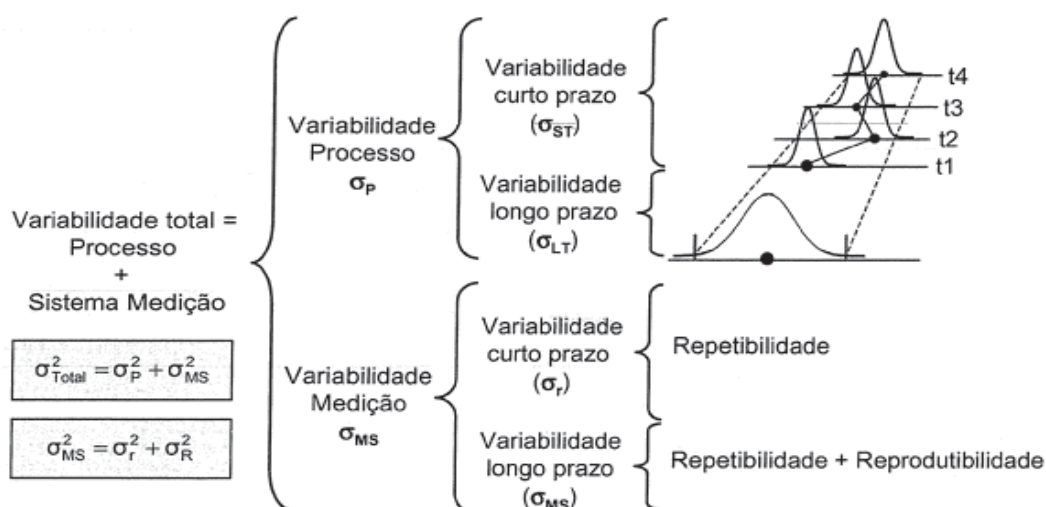


Figura 6 – A variabilidade total dos dados de um processo é constituída de dois componentes: o próprio processo e o sistema de medição (MSA - REFERENCE MANUAL, 2002).

O efeito da inexatidão do sistema de medição sobre a média “visualizada” do processo é ilustrado abaixo, na Figura 7.

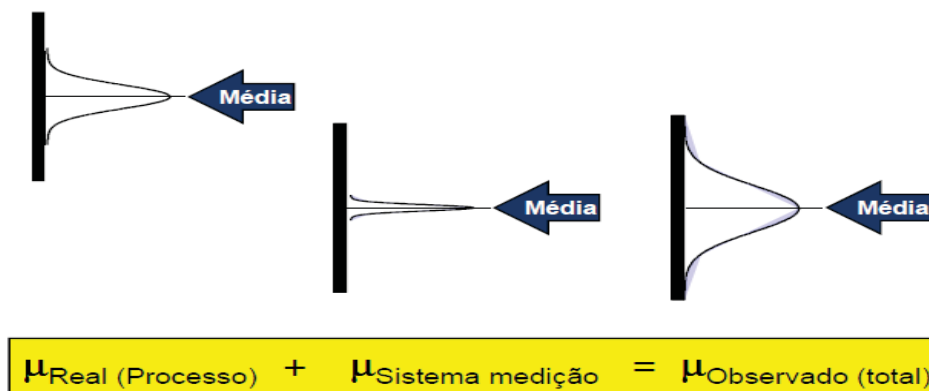


Figura 7 – Sistema de medição não exato: as medidas de posição do processo serão viciadas (MSA - REFERENCE MANUAL, 2002).

O efeito da variabilidade do sistema de medição (precisão) pode ser muito grande e a medição acaba sendo inadequada para inspecionar o produto ou realizar melhorias no processo, como mostra a Figura 8.

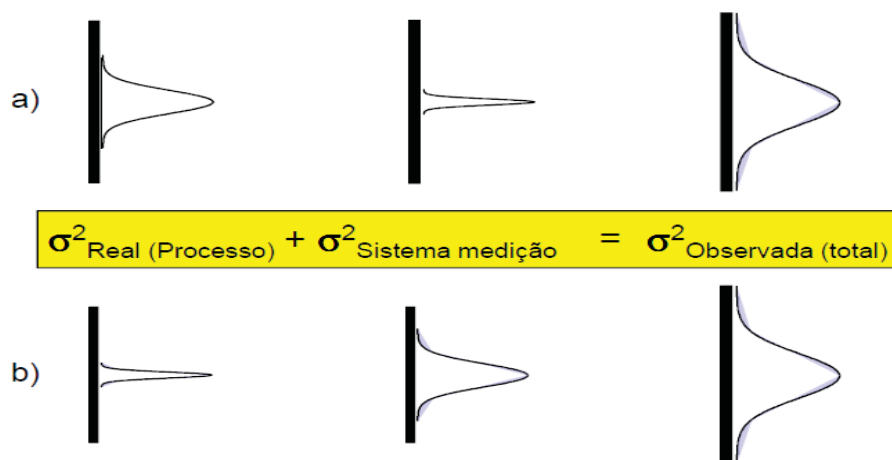


Figura 8 – Sistema de medição não preciso: a variabilidade do sistema de medição afeta muito a variação observada do processo (caso b) (MSA - REFERENCE MANUAL, 2002).

Segundo Eckes (2001), a avaliação dos sistemas de medição envolve os seguintes passos:

- Ensaios de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R) para determinar o desvio padrão da análise;
- Cálculo de índices para avaliar a capacidade da medição (%P/T e %RR);
- Melhoria do sistema de medição;
- Controle do sistema de medição.

2.3.3. Condições de repetibilidade e reprodutibilidade

As medidas quantitativas de precisão dependem das condições estipuladas no momento de realizar as medidas. Condições de repetibilidade e reprodutibilidade são casos particulares de condições extremas (MSA - REFERENCE MANUAL, 2002):

- Condição de repetibilidade: quando não há variação dos fatores que podem contribuir com a variabilidade dos resultados de um método de ensaio;
- Condição de reprodutibilidade: quando pelo menos um dos fatores que podem contribuir com a variabilidade dos resultados de um método de ensaio é variado.

Muitos fatores diferentes (além das variações entre as amostras supostamente idênticas) podem contribuir para a variabilidade dos resultados de um método de ensaio. Alguns destes fatores estão ilustrados na Figura 9.

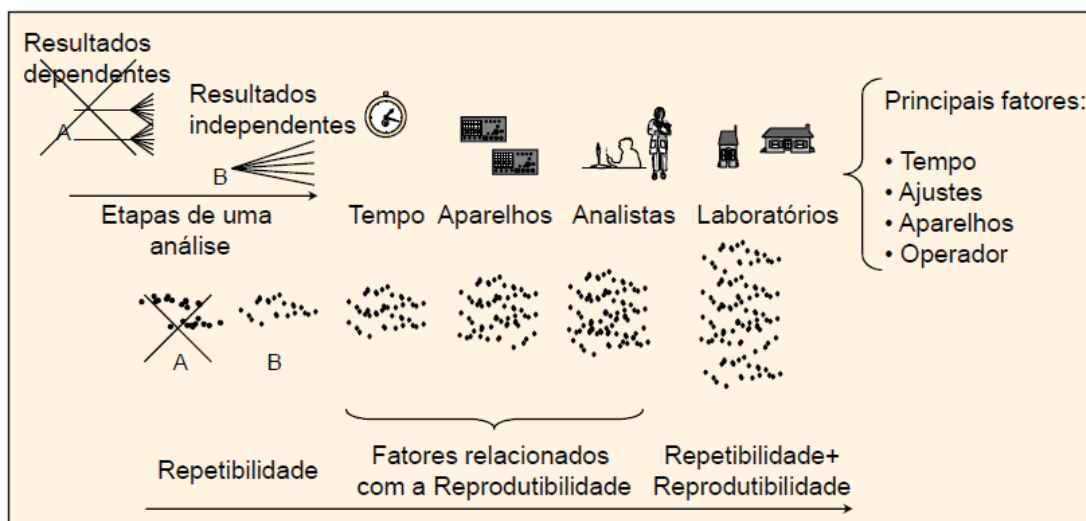


Figura 9 – Fatores que contribuem para a variabilidade dos resultados (NBR-14.597, 2012).

Os quatro principais fatores que influenciam a precisão de um método de medição, dentro de um mesmo laboratório, são (NBR-14.597, 2012):

Tempo: medidas realizadas em um tempo curto têm menos chance de apresentarem variação;

Ajustes: se os instrumentos são aferidos, o desempenho dos equipamentos pode variar;

Aparelhos: aparelhos distintos, mesmo sendo do mesmo fabricante e modelo, podem apresentar diferenças nos resultados;

Operador: usualmente é uma variável importante no Sistema de Medição, especialmente quando o operador é o próprio instrumento de medida.

Desvio padrão de repetibilidade (S_r): Desvio padrão de resultados de ensaio obtidos sob condições de repetibilidade.

O desvio padrão de repetibilidade, geralmente considerado uma propriedade do método de ensaio, será menor ou igual ao desvio padrão de reprodutibilidade.

Limite de repetibilidade (r): Medida abaixo do qual se espera encontrar a diferença absoluta de dois resultados individuais de ensaio, obtidos sob condições de repetibilidade com probabilidade de aproximadamente 0,95 (95%), dada por:

$$\text{Limite de repetibilidade} = r = 1,96 \cdot \sqrt{2} \cdot S_r = 2,8 \cdot S_r \quad (2)$$

Desvio padrão de reprodutibilidade (S_R): Desvio padrão de resultados de ensaio obtidos sob condições de reprodutibilidade.

O desvio padrão de reprodutibilidade inclui o desvio padrão de repetibilidade e a contribuição dos fatores modificados, ou seja, diferenças entre operadores, equipamentos e ambientes.

Limite de reprodutibilidade (R): Medida abaixo da qual se espera encontrar a diferença absoluta de dois resultados individuais de ensaio obtidos sob condições de reprodutibilidade com a probabilidade de aproximadamente 0,95 (95%), dada por:

$$\text{Limite de reprodutibilidade} = R = 1,96 \cdot \sqrt{2} \cdot S_R = 2,8 \cdot S_R \quad (3)$$

2.3.4. Métodos de ensaio para avaliar a precisão da medida

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR-14597 (2012), algumas estratégias de ensaio são destaque para a avaliação da precisão da medida:

- Gráfico de controle;
- Método simples;
- Método alternativo;
- Planos hierárquicos ou cruzados.

No caso de variáveis contínuas, a análise do sistema de medição compreende basicamente a medição de uma mesma amostra várias vezes, modificando os fatores que podem contribuir à variação dos resultados. Os fatores de variação podem ser, por exemplo: analistas; aparelhos e tempo; isto é, os fatores que na rotina normal de trabalho podem mudar de uma análise à seguinte.

Na Figura 10 encontra-se um fluxograma para escolher o método de ensaio mais apropriado em uma certa oportunidade. Os métodos se diferenciam na sua complexidade e na riqueza da análise extraída. A Tabela 3 ilustra os distintos métodos, desde o mais simples até os mais complexos. Neste trabalho, somente o método cruzado será abordado.

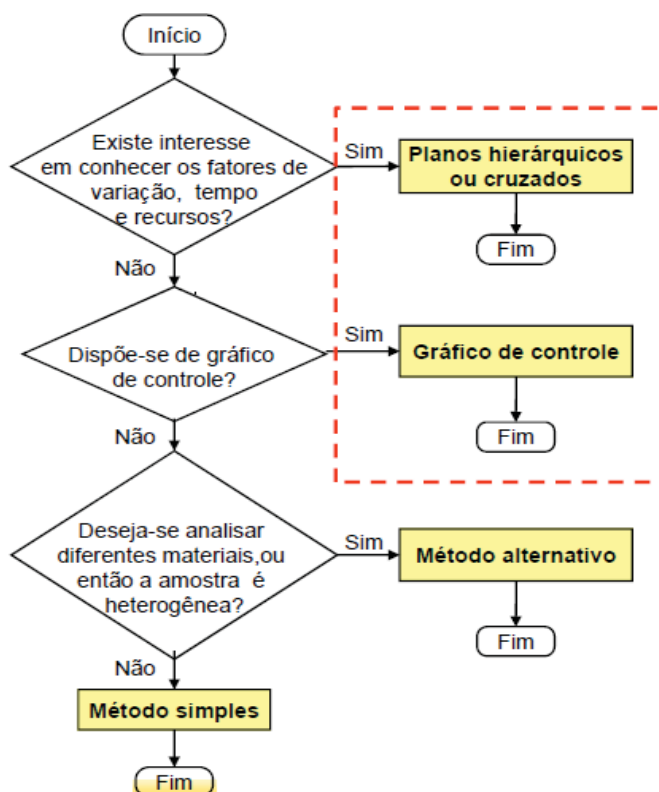
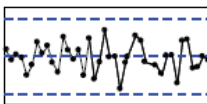

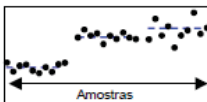
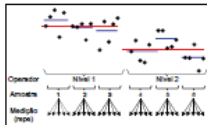


Figura 10 – Estratégia para a escolha de planos para ensaio de R&R (NBR-14597, 2012).

Tabela 3 – Métodos utilizados para o cálculo dos valores de precisão.

Método	Aplicação	Vantagens	Desvantagens
	São aproveitados os resultados dos gráficos de controle realizados com padrões internos do laboratório	Estabilização dos fatores de variabilidade. Não necessita de novo planejamento, quando o CEP já foi implantado	Não mede a contribuição repe e repro
	As medições são obtidas variando-se diversos fatores que podem afetar a precisão	Método rápido. Vários fatores podem ser incluídos no mesmo estudo	Não mede contribuição individual dos fatores
	Estimativa de S_{MS} variando-se as amostras, sendo que em cada uma delas são efetuadas várias medições	Utilizado em situações em que não possam ser realizadas muitas análises na mesma amostra por problemas de instabilidade, heterogeneidade, etc.	Não mede a contribuição individual dos fatores de variação
	Estimativa da repetibilidade e reprodutibilidade, medindo-se a contribuição individual dos fatores	Isola e mede as contribuições de cada fator para a estimativa da precisão	Dificuldade para administrar o plano

2.3.5. Requisitos necessários ao conduzir um Estudo de R&R

Para avaliar a precisão dos métodos é importante satisfazer alguns requisitos:

- No livro sobre análise de sistemas de medição publicado conjuntamente pelas empresas Chrysler, Ford e GM (MSA – REFERENCE MANUAL, 2002) menciona-se que para realizar os testes de avaliação de precisão, dever-se-ia considerar o uso de medidas cegas, que são aquelas usadas pelos analistas (e por qualquer pessoa envolvida no processo) de forma que as mesmas não sabem que está sendo realizada uma avaliação do sistema. Menciona-se que os testes que são bem administrados e que estão baseados em medidas cegas, usualmente não são contaminados pelo efeito Hawthorne¹. Resumindo, é importante que as condições em que são realizadas as análises no estudo R&R sejam as mesmas que as reinantes no dia-a-dia;
- É importante distribuir as amostras aleatoriamente entre os analistas. É melhor realizar as análises mudando analistas do que fazer primeiro todas as amostras/análises do analista A, por exemplo, depois todas as amostras/análises do analista B e assim sucessivamente;
- As análises realizadas devem ser independentes (ver 1ª parte da Figura 9), isto é, todos os passos são realizados novamente “para cada nova amostra”. Não é válido fazer uma preparação comum da amostra e no fim obter vários resultados fazendo a leitura várias vezes;
- É interessante que as amostras utilizadas no estudo representem a faixa de variação usual das amostras do processo;
- A quantidade de amostras deve ser suficiente para poder estimar a variabilidade do método em análise.

¹ Este efeito refere-se aos resultados de uma série de experimentos industriais realizados na Western Electric no trabalho Hawthorne (Hawthorne work) entre 11/1924 e 08/1932. No experimento os pesquisadores modificaram (melhoraram) as condições de trabalho de forma a otimizar os processos. A medida que as modificações iam sendo feitas, eram obtidos resultados cada dia melhores. Após diversas “melhorias” os pesquisadores quiseram verificar o efeito (sobre o processo) da piora das condições de trabalho. Eles ficaram muito surpresos quando verificaram que o processo continuava a melhorar dia após dia. A explicação encontrada para este fato foi que quando os operários perceberam que havia pessoas que estavam interessadas nos seus trabalhos, eles se esforçavam para melhorar o processo sempre.

2.4. Índices de capacidade do Sistema de Medição

A partir do desvio padrão da medida (S_{MS}) e do desvio padrão total (S_T), pode ser estimado o desvio padrão de processo (S_P):

$$S_P = \sqrt{S_T^2 - S_{MS}^2} \quad (4)$$

A partir do desvio padrão total (S_T) e dos limites de especificação, devem ser calculados os seguintes índices para avaliar a capacidade da análise:

- Precisão da análise / Tolerância: $\%P/T = \frac{6S_{MS}}{USL - LSL} \times 100$ (5)
- Precisão da análise / Desvio padrão total: $\%RR = \frac{S_{MS}}{S_T} \times 100$ (6)

Onde:

USL = Limite Superior de Especificação;

LSL = Limite Inferior de Especificação.

Interpretação dos coeficientes:

- Se $\%P/T < 10\%$ e $\%RR < 10\%$ \Rightarrow ótimo!
- Se $10\% < \%P/T < 30\%$ e/ou $10\% < \%RR < 30\%$ \Rightarrow aceitável (a melhorar)
- Se $\%P/T > 30\%$ ou $\%RR > 30\%$ \Rightarrow medida não OK

A $\%P/T$ é essencial quando usamos a medição para inspecionar o produto (para classificar o produto como aprovado ou não); a $\%RR$ é essencial quando usamos o método para realizar experimentos ou para melhoria contínua (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2004).

A Figura 11 mostra visualmente quanto um erro de medição de 30% e 10% impacta na variação do processo. A Figura 12 representa a faixa ao redor dos limites de especificação onde não se tem certeza se o produto está dentro ou fora da especificação.

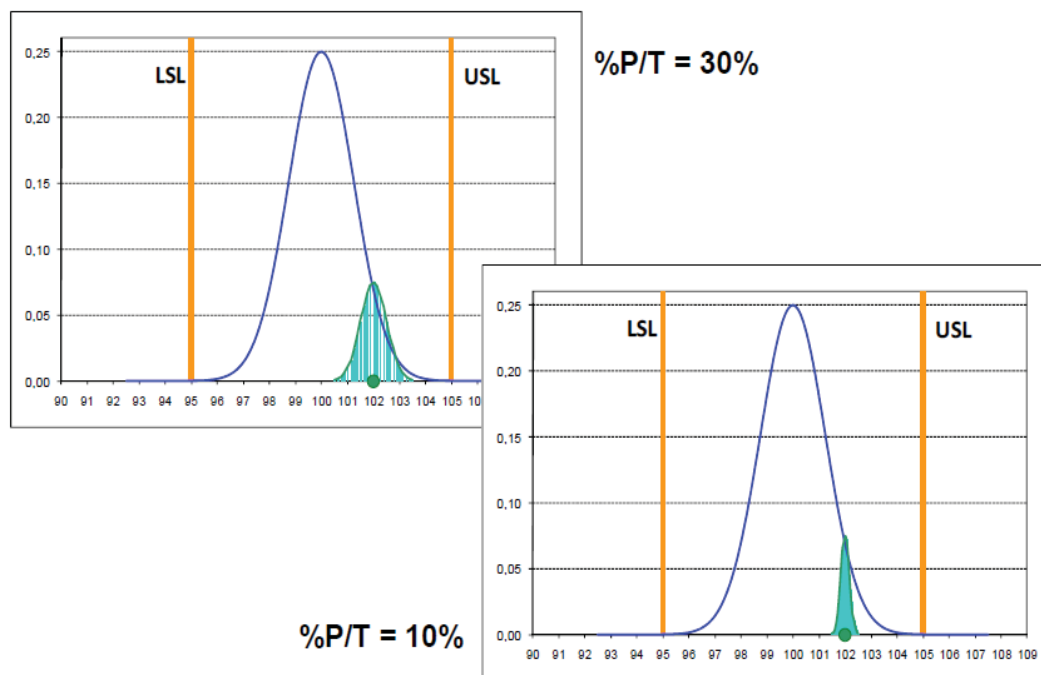


Figura 11 – Comparação do erro de medição com %P/T 30% e 10% (FELÍCIO, 2012).

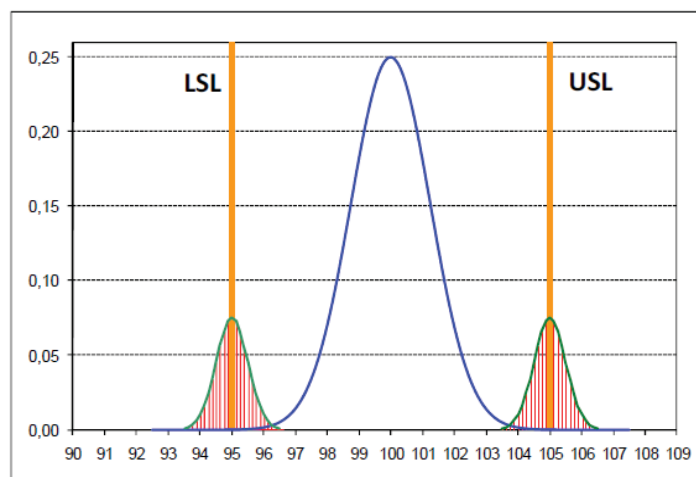


Figura 12 – Impacto da medição com %P/T = 30% na especificação do produto (FELÍCIO, 2012).

2.5. Planos cruzados

A utilização de planos hierárquicos ou cruzados, o qual será abordado neste trabalho, permite analisar a influência de vários fatores de variação dentro de um laboratório, produção fabril, etc, com o objetivo de quantificar separadamente suas contribuições na variabilidade

total. Ao final da análise dos dados, podemos obter tanto a repetibilidade quanto a reprodutibilidade.

Há dois tipos de planos balanceados:

- Plano hierárquico: quando os níveis do fator inferior são diferentes para cada nível do fator superior (Figura 13);
- Plano cruzado: quando os níveis do fator inferior são iguais para cada nível do fator superior (Figura 14). Somente neste caso é possível avaliar a interação entre os fatores.

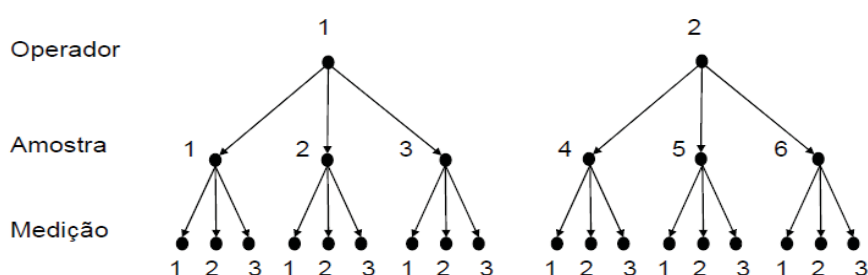


Figura 13 – Plano hierárquico com os fatores operador e amostra (MSA – REFERENCE MANUAL, 2002).

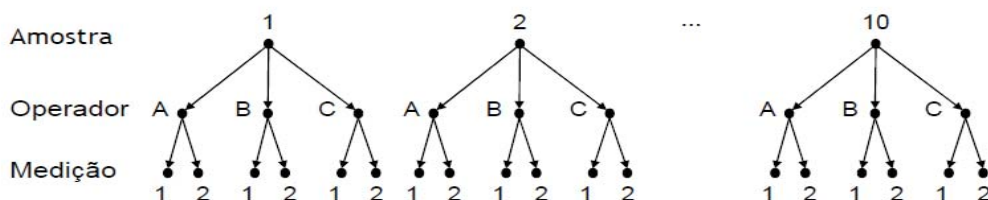


Figura 14 – Plano cruzado com os fatores operador e amostra (MSA – REFERENCE MANUAL, 2002).

A Figura 14 ilustra um esquema muito difundido entre as indústrias do setor automotivo, com 10 peças, 3 operadores/analistas e 2 ou mais repetições. Sempre é conveniente a participação do maior número de operadores/analistas que estão habilitados para realizar a análise.

Para uma boa definição do plano faz-se necessário calcular o tamanho da amostra. Para determinar a importância da variabilidade da análise em relação à variabilidade do processo e à tolerância, é importante que os desvios padrão de repetibilidade e reprodutibilidade sejam estimados com uma variabilidade adequada, o que depende do número de observações utilizadas nos cálculos.

A precisão do desvio padrão pode ser avaliada em termos de Coeficiente de Variação, o qual é calculado pela equação:

$$\text{Coeficiente de variação percentual do desvio padrão} \rightarrow CV\% = 100\sqrt{1/2v} \quad (7)$$

onde v representa os graus de liberdade do desvio padrão. Para maiores detalhes, ver a Norma ABNT:NBR 14597:2012 – Precisão de Métodos Analíticos – Determinação da Repetibilidade e Reprodutibilidade de Métodos para ensaio de produtos químicos – Estudo Intralaboratorial.

Na tabela eletrônica a seguir (Tabela 4), você pode determinar o número de analistas e de medições para que as estimativas dos desvios padrão de repe e de repro sejam confiáveis. Para que seja confiável, o CV do desvio de estar no máximo entre 10% e 15%.

Tabela 4 – Tabela eletrônica criada no software Excel para o cálculo do CV%.

Entre com os parâmetros		Resultados	
Número de analistas (p)	3	gl da repe	60
Número de amostras (a)	10	CV do σ_{repe}	9,1%
número de medições (n)	3		Adequado

A Figura 15 representa o CV% do desvio padrão de repe para diversos valores de n (número de medições) e p (número de analistas).

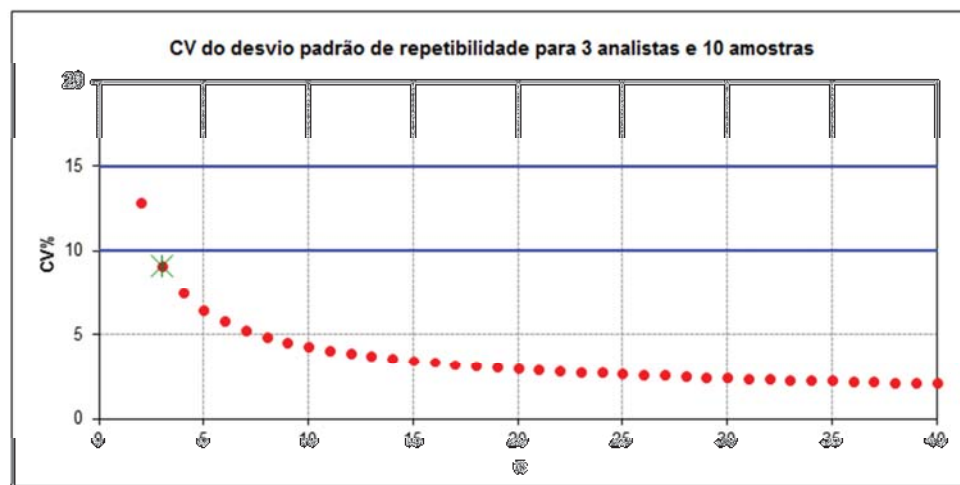


Figura 15 – Gráfico eletrônico criado no software Excel ilustrando o valor do CV% para 3 analistas e 10 amostras (FELÍCIO, 2012).

3. METODOLOGIA

3.1. Materiais utilizados

O material utilizado para a realização dos estudos de R&R envolvendo o instrumento de medição manual paquímetro quadrimensional (medidas de comprimento, diâmetro interno, profundidade e ressalto) foi a liga Al 2618A T8511, de uso aeronáutico, de propriedade da Empresa Liebherr Aerospace Brasil, a qual foi comprada da fornecedora de matérias-primas Empresa Kastens & Knauer GMBH & CO. International KG, sendo entregue na forma de barras cilíndricas com comprimento de 3m e diâmetro externo de 90mm. O certificado de matéria-prima é apresentado na Figura 16.

CERTIFICATE OF CONFORMITY



K&K IS IN FULL COMPLIANCE WITH YOUR PURCHASE ORDER AS FOLLOWS:

**LIEBHERR AEROSPACE BRASIL
IND. E COM. DE EQUIP.
AERONAUTICOS LTDA
RUA DR. HANS LIEBHERR 1/IND. A
BRAZIL 12522-635 GUARATINGUETA**

K&K SALES REFERENCE
DATE: 09.03.2010
ORDER-NO.: 100635 DTD 11.12.2009
SALES-NO.: 164706

QUANTITY	DESCRIPTION	HEAT
1 LENGTH 3 METER 66 KGS	ROUND 3.4364 T73511 LN1799 DIA 100 MM DIN65113 ITEM 20 - 10324869	7654329
3 LENGTHS 9 METER 161 KGS	ROUND 2618A T8511 AIR9049-360 DIA 90 MM ITEM 40 - 10324882	7546433
4 LENGTHS 12 METER 1168 KGS	ROUND 2618A T8 DIA 210 MM ITEM 110 - 10325551	7546433

FOR AND ON BEHALF OF KASTENS & KNAUER

SIGNATURE:  
I.V. THOMAS BILLER
- QUALITY DEPARTMENT -

DATE: 09.03.2010

Figura 16 – Certificado de matéria-prima da Liga Al 2618A T8511 fornecido pela Kastens & Knauer.
(propriedade de Liebherr Aerospace Brasil).

Este material foi usinado transformando-se em produto acabado (Part Number 6713-0731), cujo código é de extrema autoria da Empresa Liebherr Aerospace Brasil. O mesmo é mostrado na Figura 17.



Figura 17 – Part Number 6713-0731 (propriedade de Liebherr Aerospace Brasil).

O material utilizado para a realização dos estudos de R&R envolvendo os instrumentos de medições manuais ogiva, súbito, diatest e micrômetro interno de três pontas (medidas de diâmetro interno) foi a liga Al 3.4364 T73, de uso aeronáutico, de propriedade da Empresa Liebherr Aerospace Brasil, a qual foi comprada da fornecedora de matérias-primas Empresa Fuchs, sendo entregue na mesma forma das barras cilíndricas descritas logo acima. O certificado de matéria-prima da Fuchs é apresentado na Figura 18.

	Abnahmeprüfzeugnis <i>Inspection Certificate</i> DIN EN 10204 3.1 OTTO FUCHS KG	Los-Nr./Lot No.	W9729.04
		Prüflos/Test Lot No.	7041287
		Datum/Date	24.01.2011
		Seite/Page	1/2

Besteller:	Customer	Liebherr Aerospace Brasil
Versand an:	Shipment to	Liebherr Aerospace Brasil
Kundenzeichn. - Nr.:	Customer drawing No.	1386-6005 Rev. 1
Kundenmaterial - Nr.:	Customer ident No.	038575350
O.F. Material - Nr.:	O.F. die No.	034379.001
Kundenwerkstoff:	Customer material	3.4364 T73
O.F. Werkstoff:	O.F. material	AZ64.69
Bestell Nr.:	Purchase Order	PO0901256, item 010
O.F. Auftrags Nr.:	O.F. Order No.	0000355263
Lieferschein Nr.:	Delivery Note	0080599064
Liefermenge:	Quantity	150 pce + 1 remainder
Sicherheitsklasse:	Safety Class	I
O.F. Sicherheitsklasse:	O.F. Safety Class	OF1B
Techn. Lieferbed.:	Terms of delivery	WL 3.4364, DIN 65033, PP-1386-05-EK-2/2

Test test	Spezifikation specification									Befund findings
Chemische Analyse chemical analysis	WL 3.4364									ok
Element	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti %	TiZr %	
Soll/nominal max.	0,40	0,50	2,0	0,30	2,9	0,28	6,1	0,20	0,25	
Soll/nominal min.			1,2		2,1	0,18	5,1			
Ist/actual										
174 RFA/OES	0,06	0,12	1,4	0,02	2,5	0,21	5,9	0,04	0,05	

Test test	Spezifikation specification					Befund findings
Festigkeitsprüfung RT tensile test	DIN 65033, PP-1386-05-EK					ok
S/N	PN	PL	R _{0,2}	R _m	A ₅	
Soll/nominal	3	L	Min. 380 MPa	Min. 440 MPa	Min. 7,0 %	
Ist/actual						
13376	3	L	451	515	12	
13451	3	L	449	514	13	
13652	3	L	471	531	13	
13661	3	L	445	511	13	
1400S	3	L	458	520	12	
14120	3	L	459	522	12	

Geliefert/delivered	S/N
Charge/cast no	13927 - 14004, 14006 - 14077
174	





geprüft/checked /LA

Figura 18 – Certificado de matéria-prima da liga Al 3.4364 T73 fornecido pela Fuchs.

Esta matéria-prima foi usinada transformando-se em produto acabado (Part Number 1386-2201), cujo código é de extrema autoria da Empresa Liebherr Aerospace Brasil (Figura 19) e também em um corpo-de-prova (Figura 65) projetado pelo autor deste trabalho, que foi

criado apenas para efeito de estudo/análise, não sofrendo qualquer codificação para efeito de vendas pela Empresa Liebherr Aerospace Brasil.

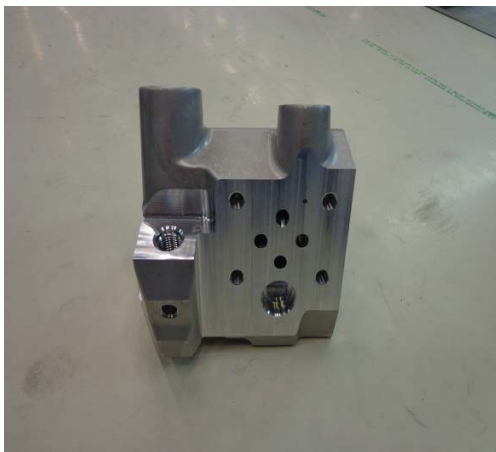


Figura 19 – Part Number 1386-2201, propriedade da Liebherr Aerospace Brasil.

3.2. Instrumentos de medição utilizados

Os instrumentos utilizados nos Estudos de R&R foram disponibilizados pela Empresa Liebherr Aerospace Brasil – Indústria e Comércio de Equipamentos Aeronáuticos Ltda, situada na cidade de Guaratinguetá/SP e os testes foram realizados nas bancadas de produção ao lado dos centros de usinagem CNC do setor fabril da mesma.

3.2.1. Paquímetro Quadrimensional

O paquímetro é um instrumento de medida muito utilizado na indústria mecânica, de usinagem e entre outras, feito geralmente de aço inoxidável.

O instrumento, composto basicamente de uma régua graduada sobre a qual corre um cursor com nônio, permite a medição de dimensões externas, internas, de profundidade e de ressalto (Figura 20).

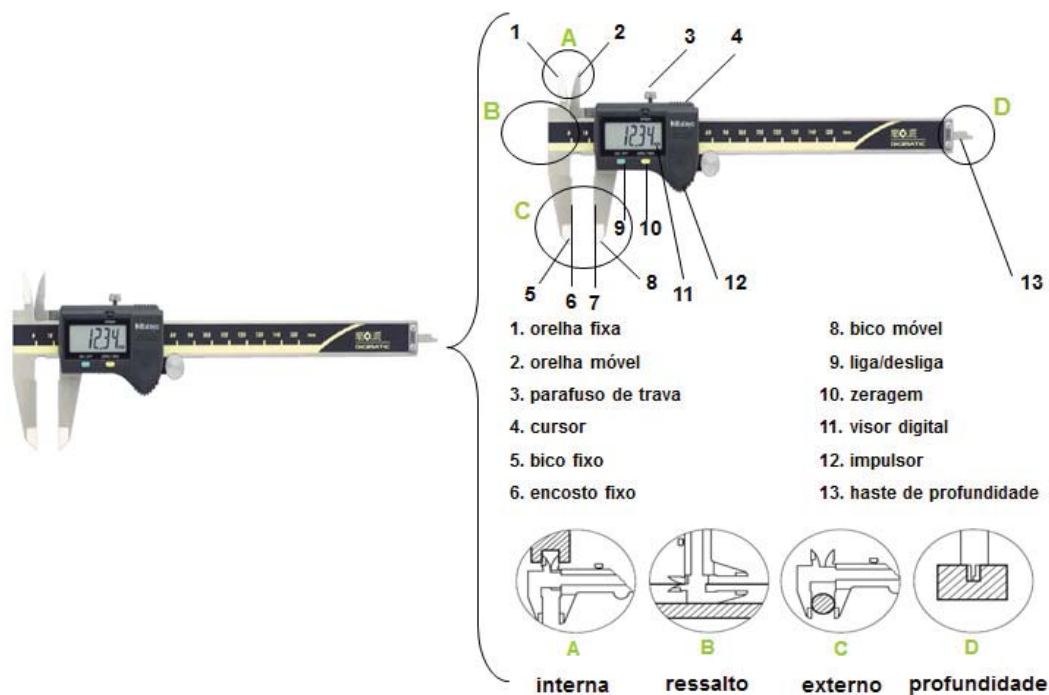


Figura 20 – Paquímetro quadrimensional (fonte: www.mitutoyo.com.br).

3.2.2. Ogiva, Diatest e Súbito

Os 03 (três) instrumentos (Figura 21) são muito semelhantes entre si e são utilizados para medidas de diâmetros internos. O que diferencia um do outro são as pontas de contato, extensores, acessórios, e suportes de acordo com cada tipo de aplicação. O que difere um Súbito Convencional de uma Ogiva ou um Diatest, nada mais é do que o tipo de ponta de contato o instrumento possui, ou seja, Diatest é um dos muitos fabricantes de Súbitos, a expressão correta para este instrumento seria “Medidor Interno de Esfera Bipartida com Relógio”, comumente catalogado como Split-ball. No caso da Ogiva seria “Medidor Interno com Geometria Guia e Relógio” já que cada “geometria” depende do desenho do furo medido.

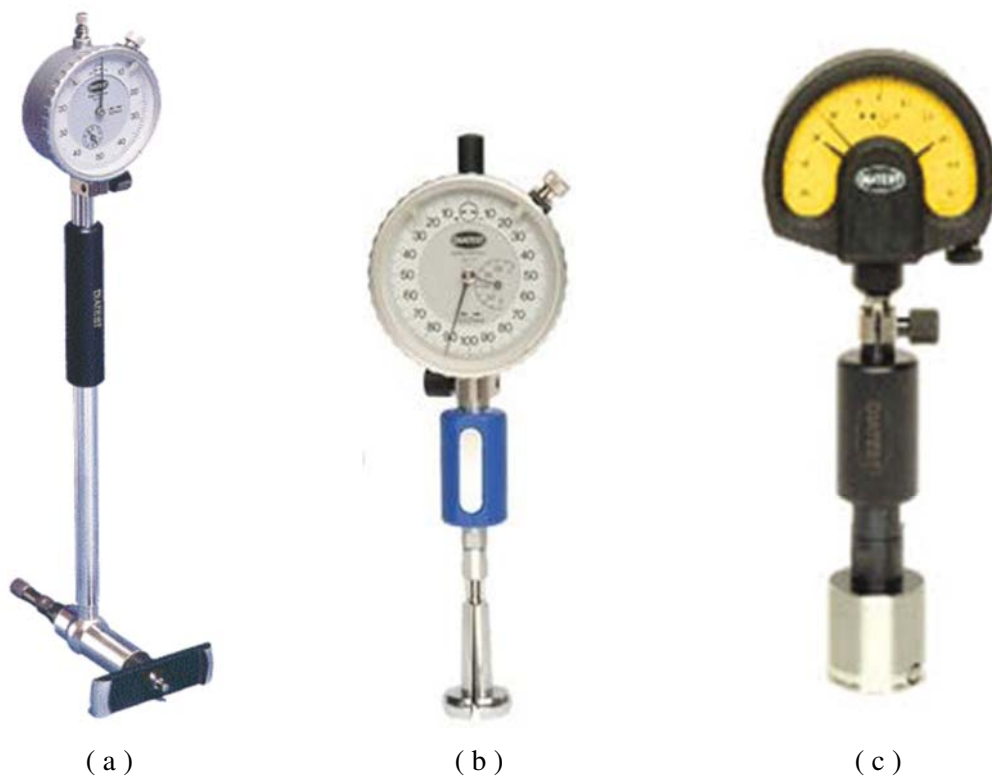


Figura 21 – Súbido convencional (a), diatest (b) e ogiva (c), respectivamente (fonte: www.mahr.com.br e www.diatest.com.br).

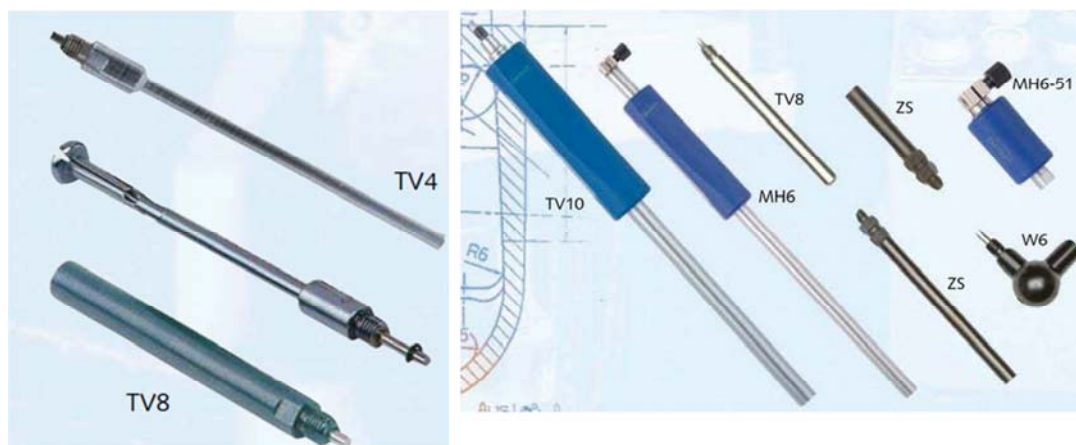
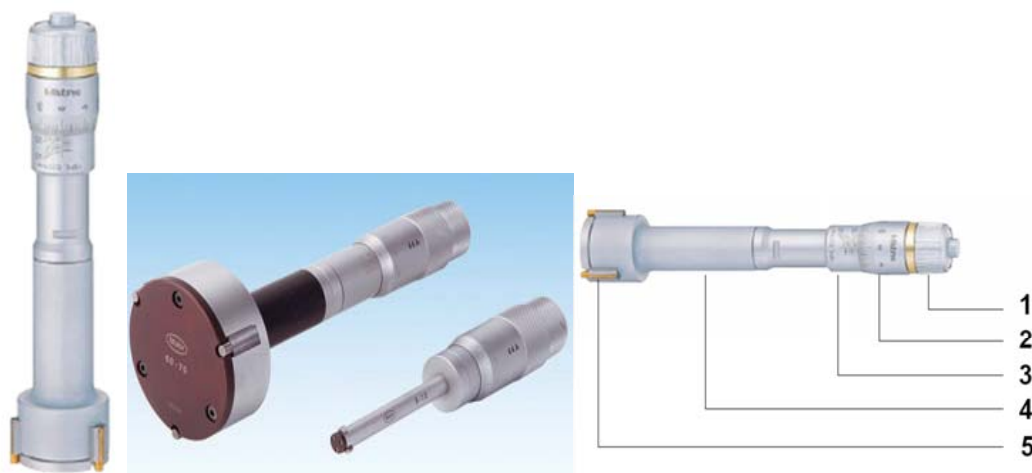


Figura 22 – Extensores e suportes utilizados nos instrumentos súbido, diatest e ogiva (fonte: www.diatest.com.br).

3.2.3. Micrômetro interno de três pontas

O micrômetro interno, Figura 23, é usado exclusivamente para realizar medidas em superfícies cilíndricas internas, permitindo leitura rápida e direta. Sua característica principal é a de ser auto-centrante, devido à forma e à disposição de suas pontas de contato, que formam, entre si, um ângulo de 120°.



Legenda:

- | | |
|-------------|---------------------------------|
| 1. Cabeça | 4. Punho |
| 2. Tambor | 5. Ponta de contato (fixa) |
| 3. Barrilha | 6. Encosto fixo/móvel (patente) |

Figura 23 – Ilustração de micrômetro interno de três pontas (fonte: www.mahr.com.br).

3.3. Software

O software utilizado para as análises numéricas e gráficas do Estudo de R&R em questão foi o Minitab 15. Trata-se de um software estatístico que possibilita o uso de várias ferramentas de qualidade, como a de Análise do Sistema de Medição, Controle Estatístico de Processo, Confiabilidade/Análise de Sobrevivência, Análise de Variância, Análise de Regressão, entre outras estatísticas básicas.

Todas as análises estatísticas deste trabalho foram desenvolvidas por este software, cuja licença de uso é de propriedade da empresa Liebherr Aerospace Brasil.

3.4. Métodos

Todos os passos da parte experimental baseou-se na Estratégia Moderna de Melhoria Contínua, o DMAIC (Definir → Medir → Analisar → Implantar → Controlar), pois da mesma forma em que pensamos na melhoria dos processos produtivos, devemos pensar também na melhoria do processo de medição.

A etapa M (Medir) é usualmente a mais complicada e demorada do DMAIC pela baixa qualidade dos sistemas de medição da maioria das empresas, além de ser a mais importante do trabalho em questão. Assim, para se conseguir melhorar o método de medição utilizado no controle das peças aeronáuticas usinadas, isto é, identificar e reduzir as variações utilizou-se a metodologia DMAIC (Figura 24).



Figura 24 – Passos para a melhoria do sistema de medição (HARRY, 2000).

Inicialmente, exemplificando as etapas desta metodologia, partiremos com o instrumento de medição manual mais utilizado nas grandes empresas de usinagem, o paquímetro quadrimensional. Seguiremos todos os passos da metodologia DMAIC utilizados durante o Estudo de R&R deste instrumento e em seguida, daremos continuidade na seção 4 (Resultados e Discussões) com todos os outros instrumentos de medição mencionados e ilustrados no item 3.2 deste trabalho.

3.4.1. Fase D: Definir o processo a ser melhorado

- PN 6713-0731;
- Característica crítica: $\varnothing 6,0$ mm;
- Tolerância: $+0,2 / -0,0$;
- N° do desenho: 6713-0731;
- Revisão do desenho: 05;
- Localização: seção B4 / folha 1;
- Instrumento de medição: paquímetro quadrimensional (“orelha”).

A Figura 25 ilustra a peça a ser medida, o instrumento de medição e o desenho.

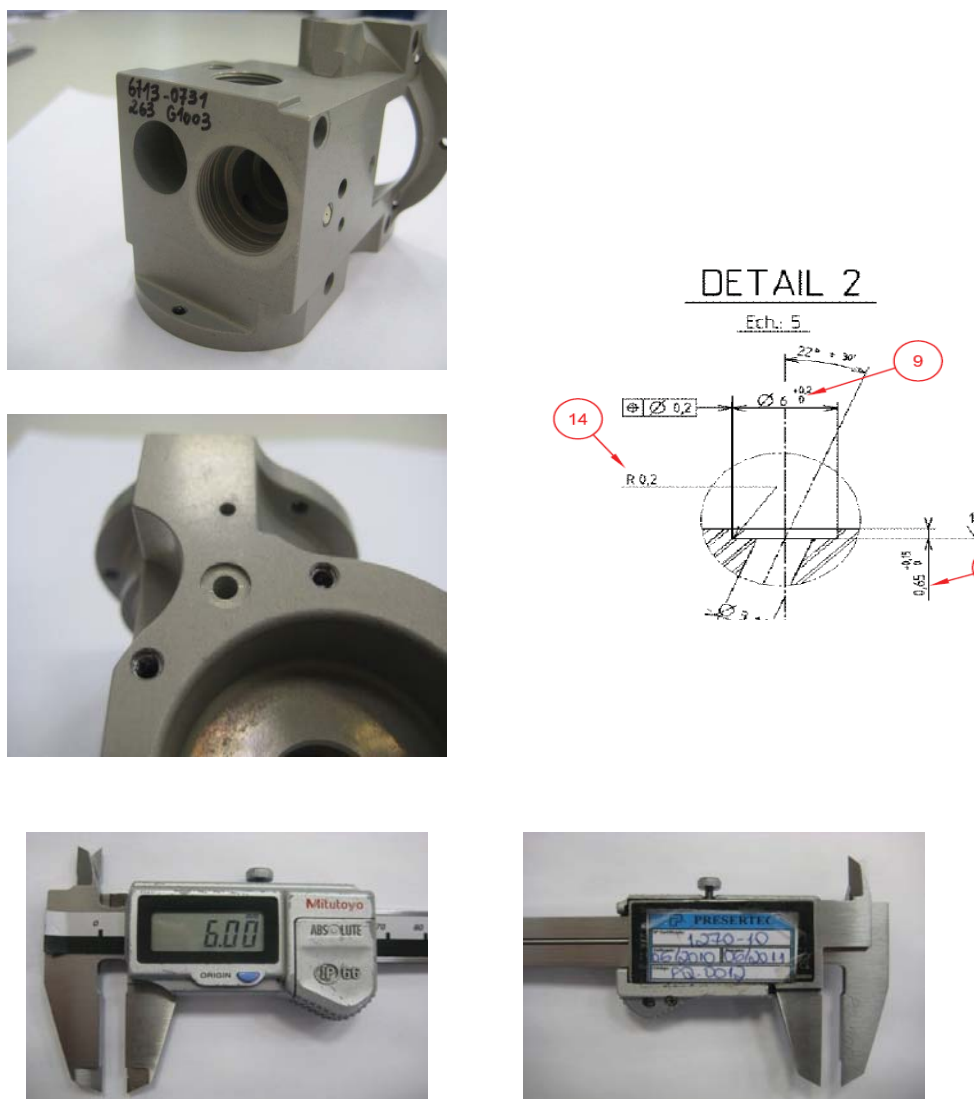


Figura 25 – Separação das peças, desenhos e instrumento de medição (propriedade de LAB).

Em seguida, foi definido o tamanho da amostra:

- número de analistas (p) = 9;
- número de peças (a) = 10;
- número de medições (n) = 3.

Alimentando a tabela eletrônica (Tabela 5) para o cálculo do CV% e conforme cálculos, o CV% obtido foi de 5,3%, ou seja, mais do que adequado.

Tabela 5 – Cálculo do CV% para 09 analistas, 10 amostras e 3 repetições.

Entre com os parâmetros		Resultados	
Número de analistas (p)	9	gl da repe	180
Número de amostras (a)	10	CV do σ_{repe}	5,3%
número de medições (n)	3		Adequado

3.4.2. Fase M: Medir o processo

Agora, utilizando o software estatístico Minitab 15, criou-se a planilha (plano cruzado) para a coleta dos dados das medições, através do caminho “*Stat\Quality Tools\Gage Study\Create Gage RR Study Worksheet...*”. Em seguida, selecionou-se o número 10 na janela “*Number of parts:*”, o número 9 na janela “*Number of operators*” e o número 3 na janela “*Number of replicates*”. O sequencial numérico das peças deve ser inserido na coluna “*Part Name*” e os nomes dos avaliadores/operadores envolvidos no Estudo devem ser inseridos na coluna “*Operator Name*”. Tudo isso está ilustrado na Figura 26, a seguir.

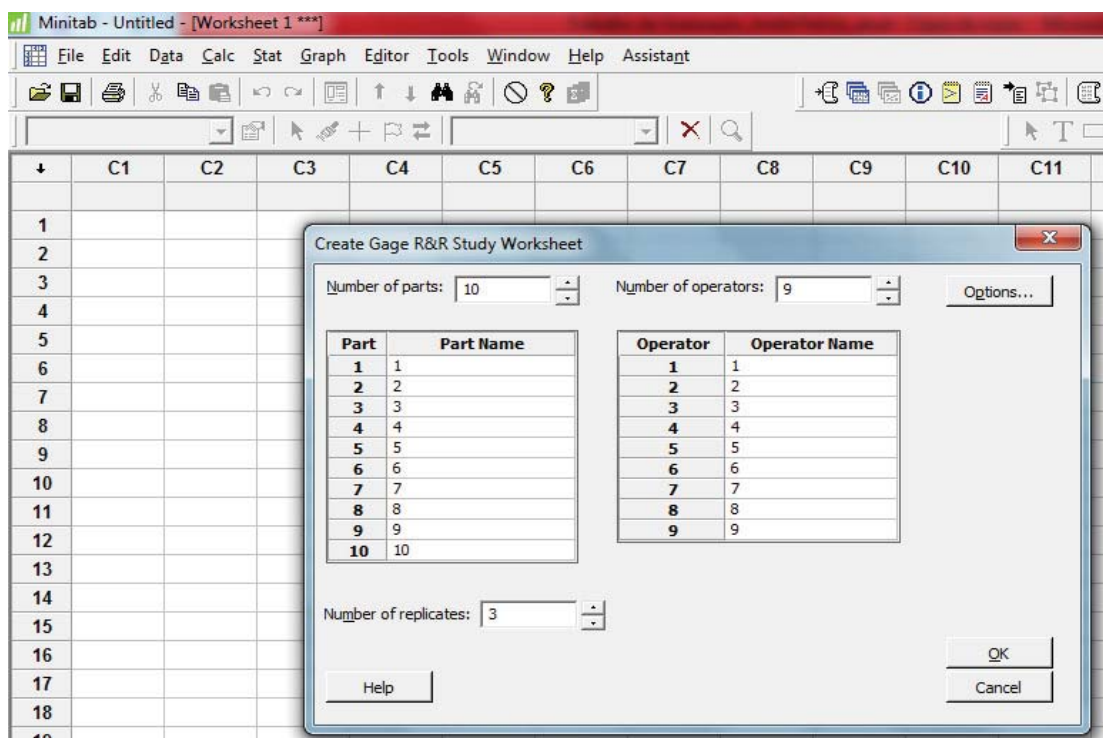
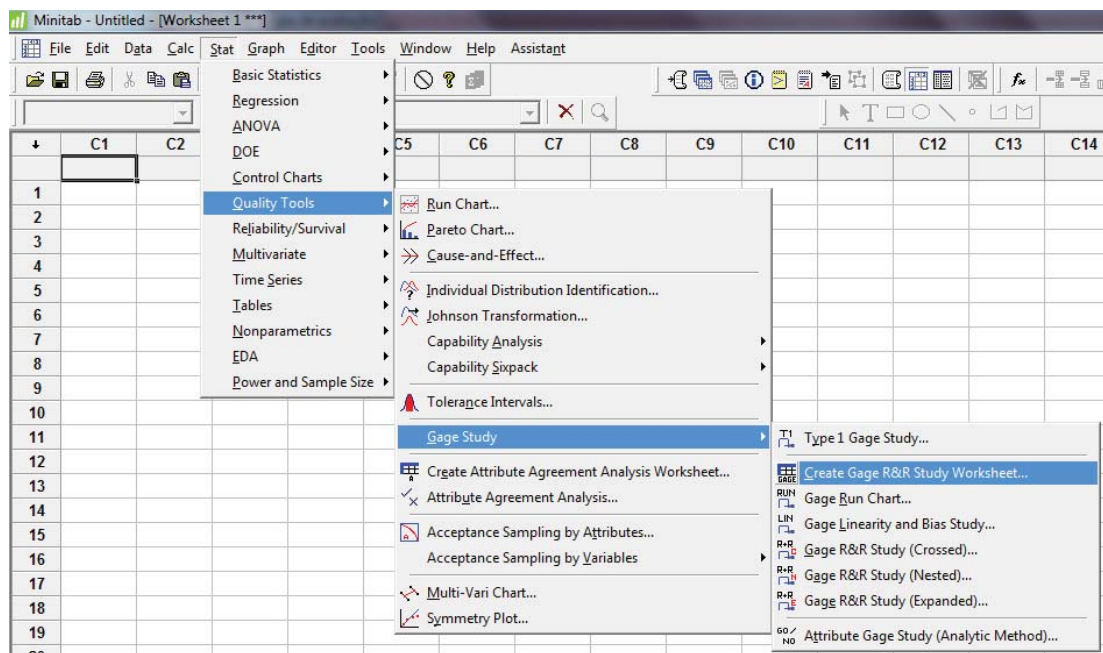


Figura 26 – Sequência de como criar uma planilha de coleta de dados para o Estudo de R&R no Minitab 15.

A Figura 27 mostra a planilha para a coleta de dados do Estudo de R&R.

↓	C1	C2-T	C3-T	C4
	RunOrder	Samples	Appraisers_1	Ø6 (+0,2/-0,0)
1	1	2 (G0903)	A	
2	2	6 (G0903)	A	
3	3	8 (G0903)	A	
4	4	7 (G1003)	A	
5	5	11 (G0902)	A	
6	6	3 (G0902)	A	
7	7	18 (G1003)	A	
8	8	11 (G1003)	A	
9	9	6 (G1003)	A	
10	10	5 (G0902)	A	
11	11	8 (G0903)	B	
12	12	6 (G0903)	B	
13	13	3 (G0902)	B	
14	14	7 (G1003)	B	
15	15	5 (G0902)	B	
16	16	11 (G0902)	B	
17	17	2 (G0903)	B	
18	18	6 (G1003)	B	
19	19	11 (G1003)	B	
20	20	18 (G1003)	B	

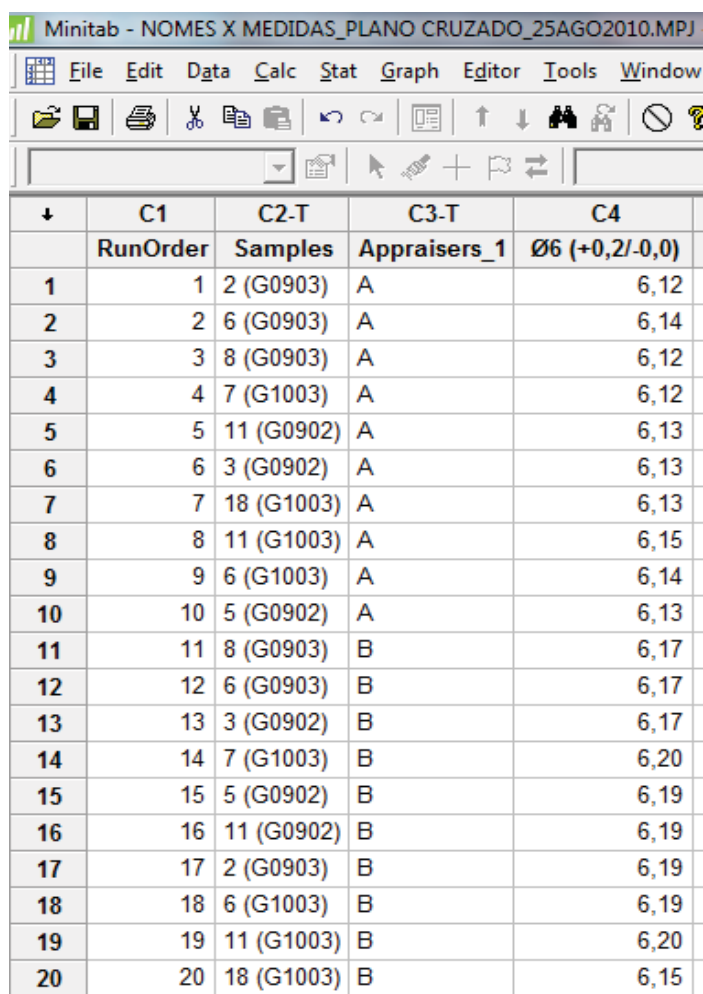
Figura 27 – Planilha para a coleta de dados do Estudo de R&R.

Assim, as 10 amostras foram colocadas sob a bancada de produção do setor fabril, ou seja, simulando um dia-a-dia normal de produção. O desenho do Part Number, bem como o paquímetro quadrimensional, também foi colocado sob a mesa. Assim, cada avaliador foi chamado um a um, onde todos os 09 (nove) executaram a medição das 10 peças aleatoriamente, as quais foram sendo entregues a eles pelo condutor do estudo, efetuando a 1ª repetição no 1º dia. Esta tarefa se repetiu no 2º e no 3º dia, sucessivamente.

Cabe ressaltar, que tudo o que era observado pelo condutor do estudo, foi anotado em seu caderno de bordo, pois qualquer tipo de informação, como a não zeragem do instrumento,

limpeza da superfície de contato do instrumento *versus* peça, entre outras, são de extrema importância para futuras análises envolvendo o sistema de medição.

Após os 03 (três) dias de coleta dos dados, as medições foram lançadas na planilha criada anteriormente no software Minitab, conforme Figura 28.



↓	C1	C2-T	C3-T	C4
	RunOrder	Samples	Appraisers_1	Ø6 (+0,2/-0,0)
1	1	2 (G0903)	A	6,12
2	2	6 (G0903)	A	6,14
3	3	8 (G0903)	A	6,12
4	4	7 (G1003)	A	6,12
5	5	11 (G0902)	A	6,13
6	6	3 (G0902)	A	6,13
7	7	18 (G1003)	A	6,13
8	8	11 (G1003)	A	6,15
9	9	6 (G1003)	A	6,14
10	10	5 (G0902)	A	6,13
11	11	8 (G0903)	B	6,17
12	12	6 (G0903)	B	6,17
13	13	3 (G0902)	B	6,17
14	14	7 (G1003)	B	6,20
15	15	5 (G0902)	B	6,19
16	16	11 (G0902)	B	6,19
17	17	2 (G0903)	B	6,19
18	18	6 (G1003)	B	6,19
19	19	11 (G1003)	B	6,20
20	20	18 (G1003)	B	6,15

Figura 28 – Planilha já com os dados coletados e lançados do Estudo do paquímetro.

Em seguida, foi elaborado as análises numérica e gráfica através do software Minitab. Para analisar os dados usamos “Stat\Quality Tools\Gage Study\Gage RR Study (Crossed)...”, conforme Figura 29. Ingressa-se com a variável *Samples* na janela “Part numbers:”, a variável *Appraisers* na janela “Operators:” e a resposta Ø6 (+0,2/-0,0) na janela “Measurement data:” (Figura 30). No botão “gage info...” podem-se introduzir informações gerais do estudo. No botão “Options...”, na janela “Upper: spec – lower spec:” deve-se introduzir o campo de tolerância (USL – LSL) da característica em estudo (Figura 31).

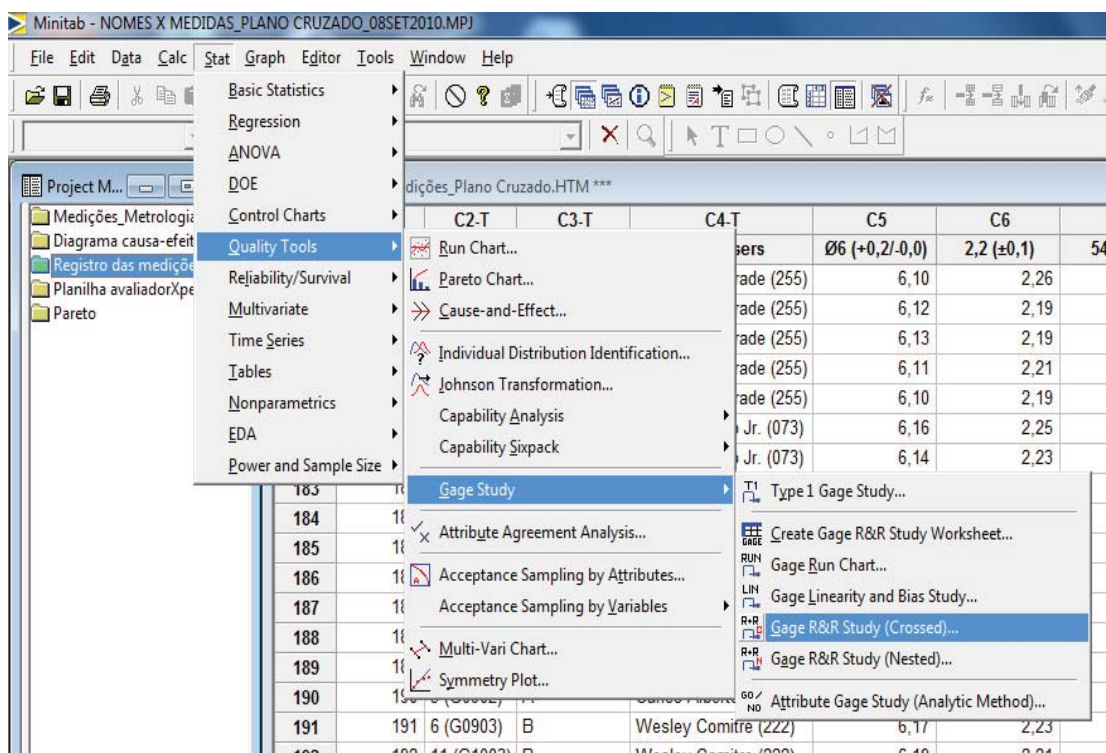


Figura 29 – Procedimento *Stat/Quality Tools/Gage Study/Gage R&R Study (Crossed)*...

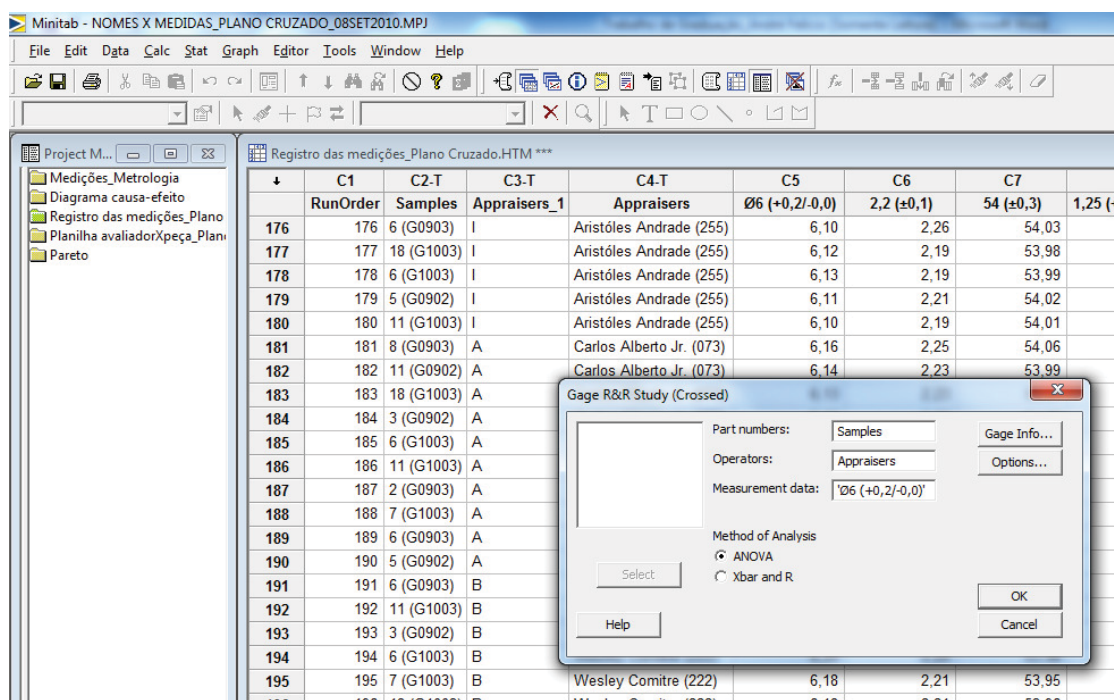


Figura 30 – Procedimento *Gage R&R Study (Crossed)*..., entrada dos dados do Estudo.

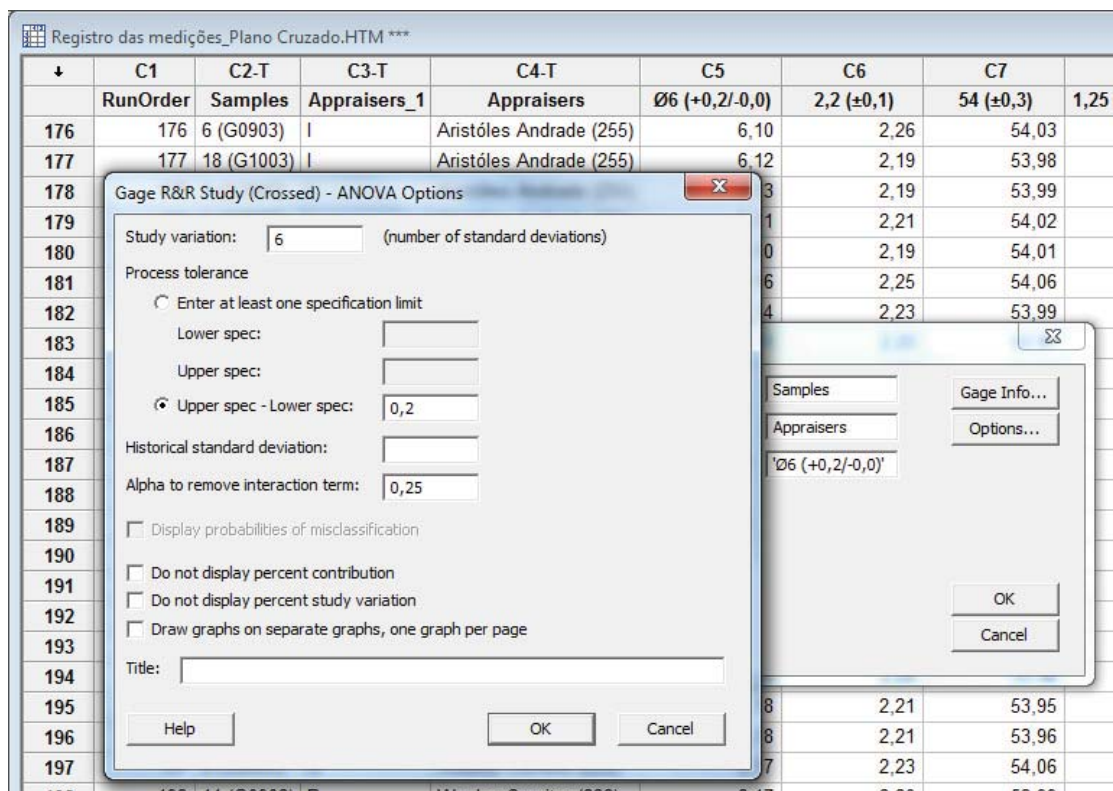


Figura 31 – Procedimento Gage R&R Study (Crossed)/Options ..., dados do campo de tolerância (Upper spec – Lower spec).

3.4.3. Fase A: Analisar

Devemos analisar os resultados numéricos (Figura 32) e os resultados gráficos (Figura 33).

- Resultados numéricos para a “orelha” do paquímetro quadrimensional:

Gage R&R

Informações	Componente de Variância	% Contribuição (da Comp.Var.)
Varição Total da Medição	0,0008848	97,63
Repetibilidade	0,000292	32,22
Reprodutibilidade	0,0005927	65,41
Avaliadores	0,0005927	65,41
Peça à Peça	0,0000215	2,37
Varição Total	0,0009062	100

Tolerância de Processo	0,2
Desvio-padrão histórico	0,0173828

Informações	Desvio-padrão	Variância do Estudo (6 * SD)	% Variância do Estudo (%SV)	% Tolerância (SV/Toler)	% Processo (SV/Proc)
Varição Total da Medição	0,0297451	0,17847	98,81	89,24	171,12
Repetibilidade	0,0170889	0,102534	56,77	51,27	98,31
Reprodutibilidade	0,0243462	0,146077	80,87	73,04	140,06
Avaliadores	0,0243462	0,146077	80,87	73,04	140,06
Peça à Peça	0,0046333	0,0278	15,39	13,9	26,65
Varição Total	0,0301038	0,180623	100	90,31	173,18

Número de Categorias Distintas	1	ndc < 4, não aceitável
--------------------------------	---	------------------------

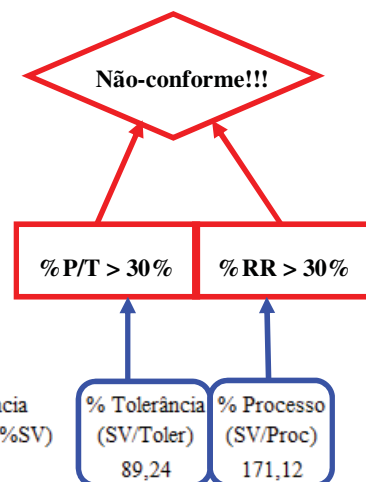


Figura 32 – Resultados numéricos do método cruzado para a “orelha” do paquímetro quadrimensional.

Podemos concluir parcialmente os resultados numéricos do Estudo de R&R para a “orelha” do paquímetro quadrimensional:

- %P/T (variação da análise comparada à tolerância do processo) foi de **89,24%**;
- %RR (variação da análise comparada à variação do processo) foi de **171,12%**;
- ndc (número de categorias distintas) foi igual a **1**.

- Resultados gráficos para a “orelha” do paquímetro quadrimensional:

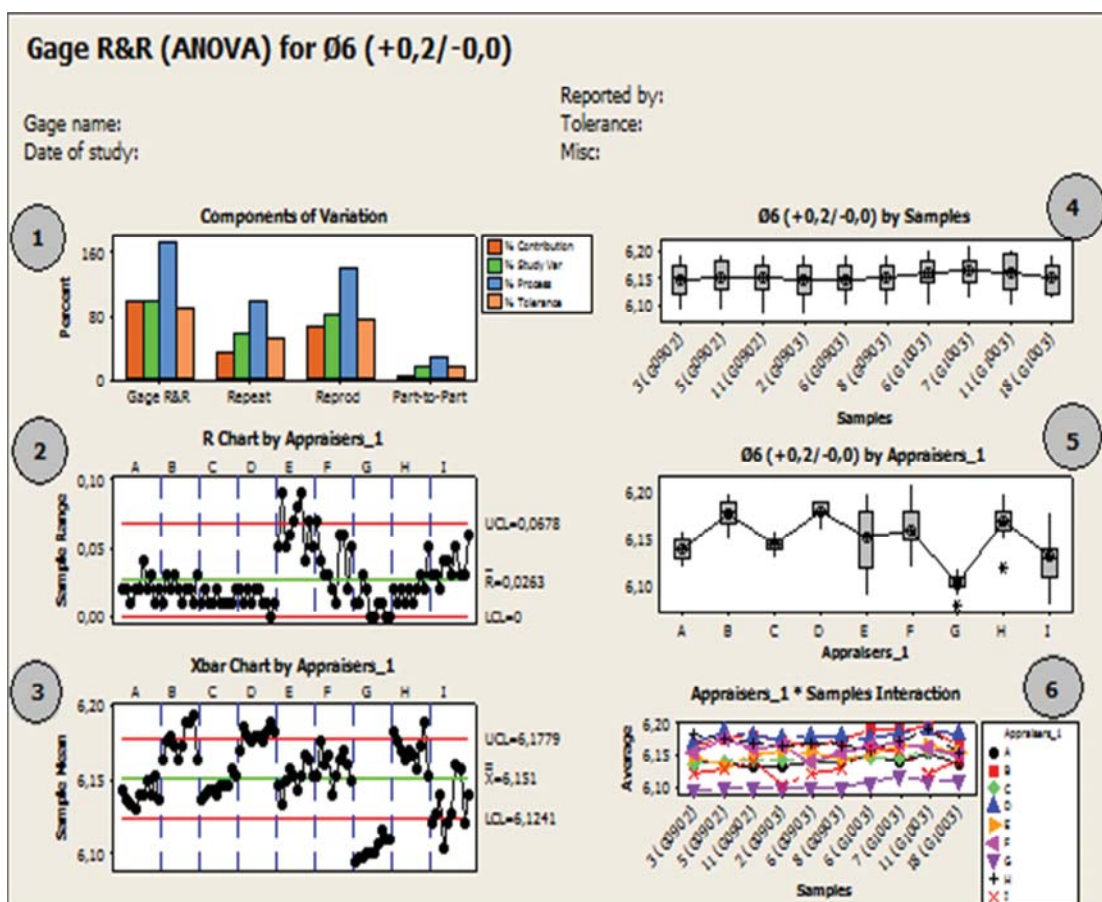


Figura 33 – Resultados gráficos do método cruzado para a “orelha” do paquímetro quadrimensional.

- Gráfico 2:

Observa-se que os operadores A, B, C, D, G e H apresentaram os valores das amplitudes (para cada amostra) menores do que os demais avaliadores.

Os operadores E, F e I apresentam os valores das amplitudes maiores, ou seja, em algumas peças, estes ora obtiveram um valor baixo da medida, ora obtiveram um valor alto da mesma. Assim, conclui-se que estes operadores tiveram uma grande variação de medição entre as amostras, ou seja, baixa repetibilidade. Em contrapartida, o avaliador C apresenta a melhor repetibilidade, ou seja, a menor variação de medição entre as peças ou amostras.

Se os avaliadores E, F e I não estivessem no estudo, os valores das amplitudes estariam baixos e a repetibilidade de cada operador excelente. Isso melhoraria a %RR e a %P/T apenas da repe.

- Gráfico 3:

Este gráfico relata a média das amostras, ou seja, analisa a reprodutibilidade entre os avaliadores.

Observa-se que há avaliadores (B, D, G, H e I) com as médias de suas medidas para cada amostra fora dos limites de controle (UCL e LCL). As médias dos operadores B, D e H ficaram bem acima da linha central (média geral de todas as medidas realizadas por todos os operadores) e as médias dos operadores G e I, ficaram bem abaixo da mesma. Estes 5 (cinco) avaliadores "fugiram" um pouco das médias dos operadores A, C, E e F, os quais mantiveram suas médias próximas à linha central.

Uma observação importante é o avaliador C, pois este manteve as médias de suas medidas próximas à linha central e também obteve a menor variação de suas médias ($6,1567 - 6,1367 = 0,02\text{mm}$).

Percebe-se também que como a média entre os analistas é diferente, aparentemente cada um está fazendo de forma diferente ou encontrando dificuldades para manusear este instrumento ao medir esta característica (\emptyset interno com a orelha do paquímetro) ou ainda, colocando mais ou menos força no instrumento.

Temos uma idéia gráfica do ndc., que no nosso caso foi igual a 1. Nota-se que há uma diferença muito acentuada entre os analistas, o que comprova que temos um grande problema de repro. Seria excelente se a média da maioria das amostras estivesse "saindo" fora dos limites de controle da análise, o que não acontece.

O n.d.c. é uma comparação entre a variação usual do processo e a variação da análise (faixa dos limites de controle da análise). Seria quantas vezes consegue-se colocar o intervalo da análise dentro do processo. No nosso caso, o fato do $\text{ndc} = 1$ é porque o erro geral da análise foi grande se comparado com a variação do processo.

Obs. 1: os limites de controle são calculados com o desvio-padrão da repe dos analistas, obtido a partir do range médio.

Obs. 2: o ndc é calculado com o gage total (repe + repro).

- Gráfico 4:

Este gráfico é para ver se tem alguma amostra mais crítica, uma que esteja variando muito, ou seja, uma amostra com algum problema intrínseco que provoque variação indevida na medição.

Observa-se que a peça 11 (lote G0902), peça 6 (G0903), peça 8 (G0903) e a peça 7 (G1003) são as que apresentam a menor variação entre as medidas.

Pode-se mencionar também que a peça 11 (G1003) apresenta a maior variação entre as medidas.

- Gráfico 5:

Observa-se mais uma vez, que o avaliador C é o que apresenta menor variação entre as suas medidas e por consequência, melhor repetibilidade. Ao contrário, ocorre com o avaliador E, que apresenta grande variação entre suas medidas, ou seja, pior repetibilidade.

Analisando o gráfico com todos os operadores, notamos que a reprodutibilidade entre eles está muito ruim pelo fato das médias de cada operador não estarem alinhadas na mesma reta.

- Gráfico 6:

Este gráfico tem grande semelhança com o gráfico 3, ou seja, um gráfico de interação.

Observa-se que o avaliador G mediu quase todas as peças com o mesmo valor, mas muito abaixo de todos os outros operadores.

O avaliador C está com as médias de suas medidas próximas à linha central e também com poucas variações.

Já o avaliador I, percebe-se que suas medidas não são constantes, variando muito.

Assim, podemos concluir que as supostas "retas" dos avaliadores C, G e D são paralelas, mas não coincidentes.

De modo geral, os avaliadores não possuem suas "retas" coincidentes, o que comprova uma péssima reprodutibilidade.

Ou seja, serão necessárias melhorias no sistema de medição.

Assim, devemos voltar todo o ciclo DMAIC, onde a melhoria técnica pode ser feita em 7 passos ligados ao mesmo (Figura 34).

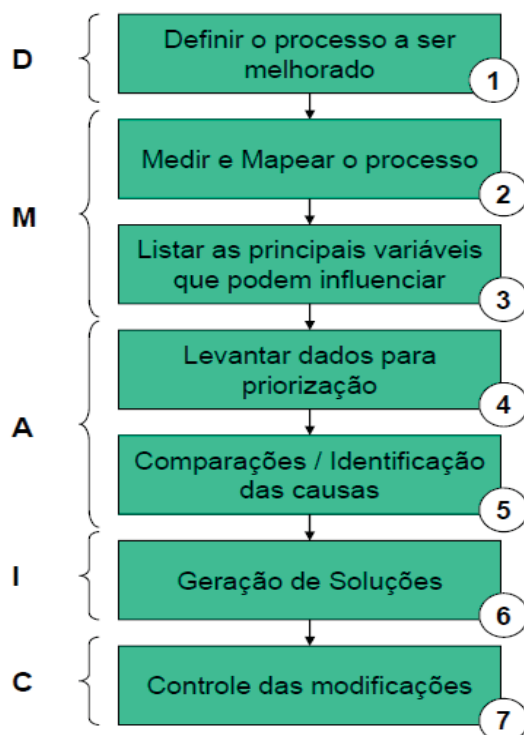


Figura 34 – A melhoria técnica pode ser feita em 7 passos ligados ao DMAIC (HARRY, 2000).

3.4.4. Melhoria Técnica

Tecnicamente, a forma de fazer esta melhoria é estudando a importância dos fatores influentes através de aplicação de ferramentas estatísticas e de solução de problemas.

Como já sabemos qual é a medida que precisa ser melhorada, qual é o instrumento envolvido, quais as pessoas que participaram das avaliações e principalmente, quais os resultados obtidos e os detalhes observados durante o estudo, cabe agora, listarmos as principais variáveis que podem ter influenciado nos resultados insatisfatórios.

3.4.4.1. Identificação de causas potenciais

A ferramenta utilizada dentro do DMAIC para a identificação das possíveis causas potenciais foi o brainstorming e o diagrama de causa e efeito (Diagrama de Ishikawa), conforme Figura 35.

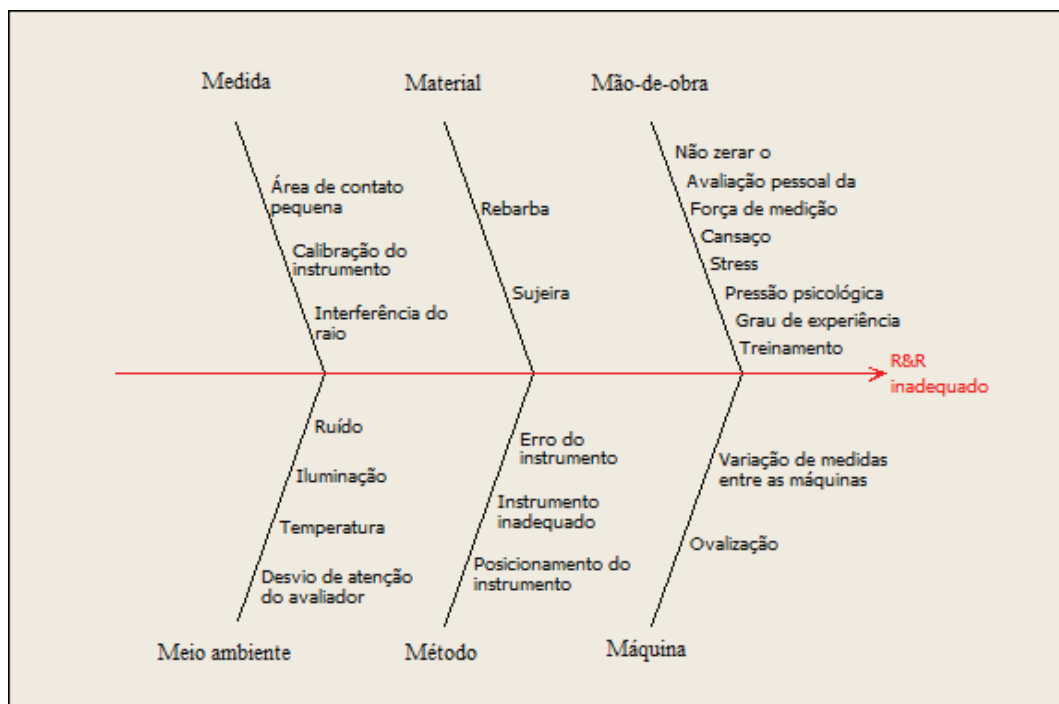


Figura 35 – Diagrama de causa e efeito com as causas que afetam a medição do Ø interno através da “orelha”.

O diagrama de causa e efeito ajuda a listar, organizar e priorizar fatores importantes para serem otimizados.

Após o brainstorming com o time envolvido no processo de medição, foi possível criar um Gráfico de Pareto (Figura 36) com o objetivo de auxiliar na investigação e priorização das possíveis causas potenciais.

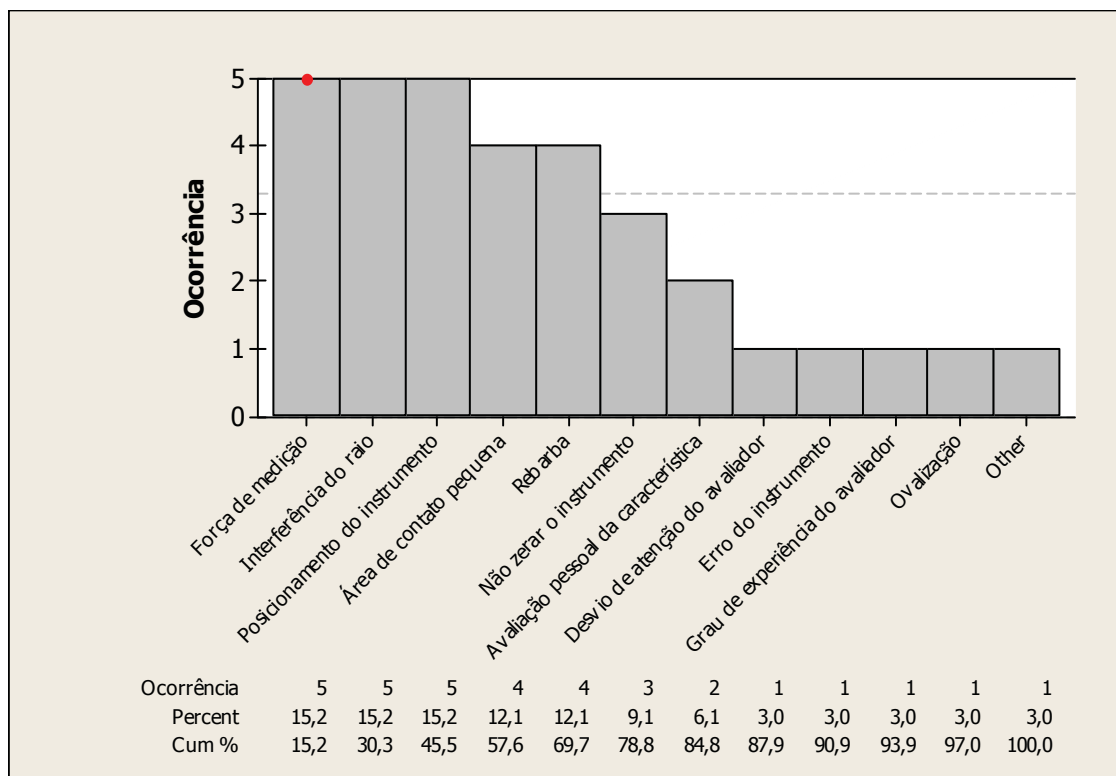


Figura 36 – Gráfico de Pareto.

3.4.4.2. Investigação e priorização

Com base nas informações do Gráfico de Pareto, uma planilha de Excel (Tabela 6) foi criada para a investigação das possíveis causas potenciais, utilizando métodos de comparação para verificar se as diferenças são ou não significativas.

Tabela 6: Investigação e priorização das possíveis causas potenciais que afetam a medição do Øinterno.

POSSIVEL CAUSA	AÇÃO	RESULTADO
	Verificar as fotos tiradas durante as medições à fim de observar as maneiras como os operadores manuseiam o equipamento junto à peça.	As fotos foram analisadas e nada de anormal foi detectado.
Posicionamento do instrumento junto à peça	Verificar novamente (pessoalmente) como os avaliadores manuseiam o equipamento junto à peça, fornecendo uma peça e o instrumento para o operador sem avisá-lo, simulando um pedido de ajuda em uma medida. Repetir o procedimento depois de uns 20 min.	Os operadores foram analisados e nada de anormal foi detectado.
Interferência do raio na medida	Verificar se o operador está tendo a cautela de não encostar a orelha do paquímetro sob o raio durante a medição	A maioria dos operadores encostaram a orelha do paquímetro sob o raio existente no final do comprimento do diâmetro, o que comprova a divergência entre as medidas sob o raio e fora dele.
Força de medição	Não é passível de ação	A força varia de operador a operador.
Rebarba no diâmetro	Verificar se há rebarbas nos diâmetros das peças, analisando peça-a-peça com o microscópio na sua ampliação máxima.	Nenhuma rebarba foi encontrada no diâmetro das peças.
Área de contato pequena da peça junto ao instrumento	Verificar a área de contato da peça junto ao instrumento utilizando um Diatest centesimal.	Foi verificado e constatado que a área de contato do diâmetro e os instrumentos, tanto o paquímetro quadrimensional como o Diatest centesimal, é muito pequena. Houve uma grande divergência entre os avaliadores.
Não zeragem do instrumento	Verificar se o operador "zera" o instrumento antes de iniciar uma medição, fornecendo uma peça e o instrumento para o operador sem avisá-lo, simulando um pedido de ajuda em uma medida. Repetir o procedimento depois de uns 20 min.	Alguns limpam e zeram o instrumento, outros não limpam e também não zeraram o instrumento antes de suas medições. Houve operadores que colocaram o instrumento sob a bancada durante as suas medições e quando as retomou, não zerou o instrumento novamente.
Avaliação pessoal da característica	Verificar se o avaliador realiza a medição em apenas um ponto do diâmetro, pois pode haver ovalização no diâmetro, o que pode acarretar medidas diferentes em os avaliadores.	Teve operador que forneceu corretamente a média de 03 pontos. Outro, além de não fornecer a média de 03 pontos, para cada medida, pegou 01 ponto diferente no diâmetro. Teve outro que forneceu a média dos valores do mesmo ponto, mudando de ponto entre os 03 resultados, ou seja, cada resultado é a média de 01 ponto diferente.
Sujeira no diâmetro	Verificar se há sujeiras nos diâmetros das peças, analisando peça-a-peça com o microscópio na sua ampliação máxima.	Nenhuma sujeira foi encontrada no diâmetro das peças.
Desvio da atenção do operador	NA	NA
Ovalização no diâmetro	Verificar através do scanning e gerando gráficos, se o diâmetro das peças possuem ovalização, pois peças com diâmetro ovalizado medidas em apenas 01 (um) ponto, apresentam diferenças no valor das medidas entre os avaliadores.	Realizada a medição do Diâmetro de Ø6,0mm utilizando máquina tridimensional, através do método scanning. Observou-se que 80% das peças apresentou erro menor que 0,02mm, ou seja, 10% do campo de tolerância especificada em desenho e os outros 20% das peças apresentaram erro de 25% do campo de tolerância.
Erro de indicação do instrumento	Verificar se o instrumento possui erro de indicação da calibração através do certificado de calibração e do critério de aceitação da LAB. Há um erro permissível do instrumento (exatidão).	Foi verificado que o erro do instrumento + a incerteza de medição (0,02 + 0,01mm = 0,03mm) possui um valor menor do que o critério de aceitação da LAB (+ ou - 0,033mm). Assim, o instrumento está aprovado para ser utilizado em medidas internas.
Grau de experiência do operador	NA	NA

3.4.4.3. Geração de soluções

Após a identificação das possíveis causas de variação, a equipe propôs um novo Estudo de R&R a partir de um tamanho de amostra de:

- 03 (três) avaliadores do setor de metrologia;
- 10 (dez) amostras;
- 03 (três) repetições por avaliador.

Focando em 03 (três) possíveis causas potenciais:

- Interferência do raio;
- Avaliação pessoal da característica;
- Não zeragem do instrumento.

Novamente, elaboraram-se os resultados numéricos através do software Minitab 15 utilizando o plano cruzado (Figura 37).

Gage R&R

Informações	Componente de Variância	% Contribuição (da Comp.Var.)
Varição Total da Medição	0,0001407	83,74
Repetibilidade	0,00007	41,65
Reprodutibilidade	0,0000707	42,09
Avaliadores	0,0000605	35,97
Avaliadores*Peças	0,0000103	6,12
Peça à Peça	0,0000273	16,26
Varição Total	0,0001681	100
Tolerância de Processo	0,4	
Desvio-padrão histórico	0,0173828	

Informações	Desvio-padrão	Variância do Estudo (6 * SD)	% Variância do Estudo (%SV)	% Tolerância (SV/Toler)	% Processo (SV/Proc)
Varição Total da Medição	0,0118634	0,0711805	91,51	35,59	68,25
Repetibilidade	0,0083666	0,0501996	64,54	25,1	48,13
Reprodutibilidade	0,0084108	0,0504645	64,88	25,23	48,39
Avaliadores	0,0077751	0,0466508	59,97	23,33	44,73
Avaliadores*Peças	0,0032075	0,019245	24,74	9,62	18,45
Peça à Peça	0,0052273	0,0313641	40,32	15,68	30,07
Varição Total	0,012964	0,0777841	100	38,89	74,58

Número de Categorias Distintas 1 → ndc < 4, não aceitável

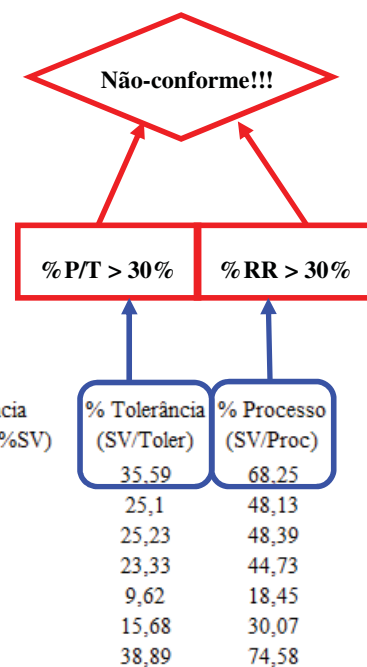


Figura 37 – Novos resultados numéricos com foco nas possíveis causas potenciais que afetam a medição do Øinterno.

Mais uma vez os resultados do Estudo de R&R para a “orelha” do paquímetro quadrimensional foram insatisfatórios, apesar de ser visível uma melhora significativa nos valores de %P/T e de %RR, porém inaceitáveis:

- %P/T (variação da análise comparada à tolerância do processo) foi de **35,59%**;
- %RR (variação da análise comparada à variação do processo) foi de **68,25%**;
- ndc (número de categorias distintas) foi igual a **1**.

Ou seja, devemos voltar ao Gráfico de Pareto (Figura 38) e fazer uma nova priorização das possíveis causas potenciais que não foram dadas importâncias anteriormente e investigá-las.

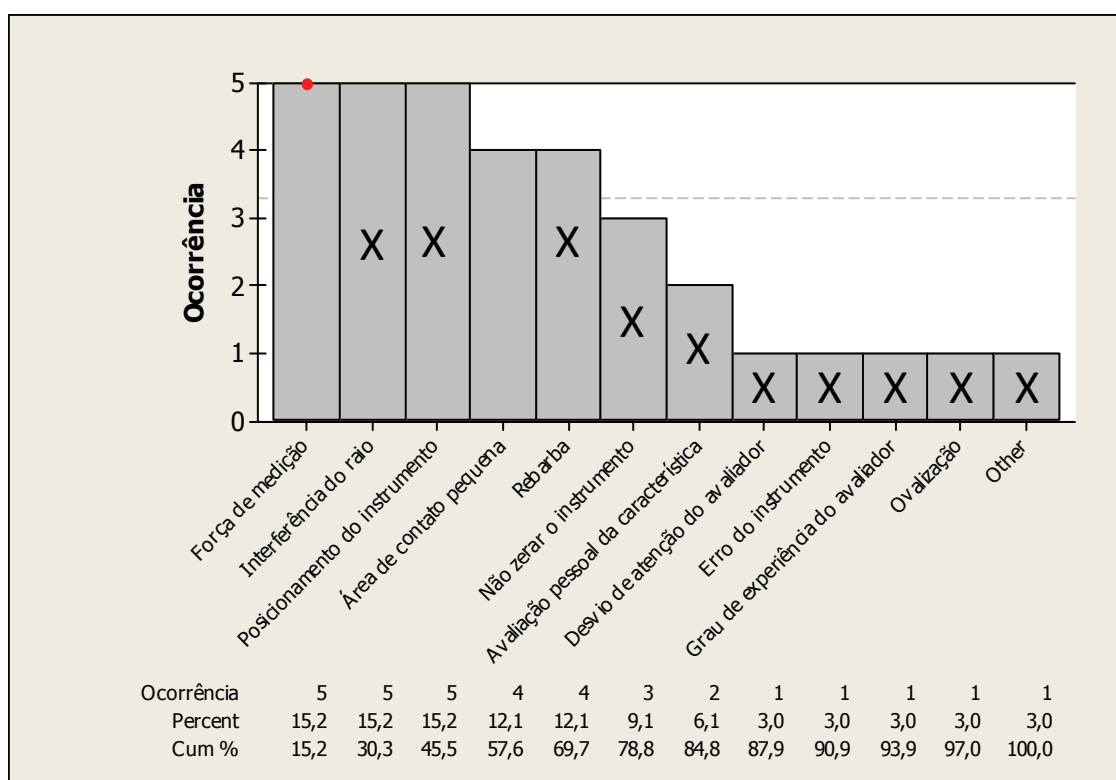


Figura 38 – Gráfico de Pareto focando outras possíveis causas potenciais.

Assim, um novo Estudo de R&R foi sugerido a partir de um tamanho de amostra de:

- 03 (três) avaliadores do setor de metrologia;
- 10 (dez) amostras;
- 03 (três) repetições por avaliador.

Mantendo as melhorias identificadas anteriormente e foco em uma possível causa potencial:

- Área de contato pequena.

As 10 (dez) amostras para este novo Estudo foram desenvolvidas em forma de c.d.p. (corpos-de-prova), com 03 (três) furos de $\text{Ø}6,0$ mm, ou seja, mantendo a mesma característica iniciada no projeto, na 1ª análise, entretanto alterando a profundidade dos mesmos, conforme Figura 39.

- $\text{Ø}6,0 \times 0,4$ mm (4% da área de contato da “orelha” do paquímetro);
- $\text{Ø}6,0 \times 2,0$ mm (20% da área de contato da “orelha” do paquímetro);
- $\text{Ø}6,0 \times 6,0$ mm (60% da área de contato da “orelha” do paquímetro).

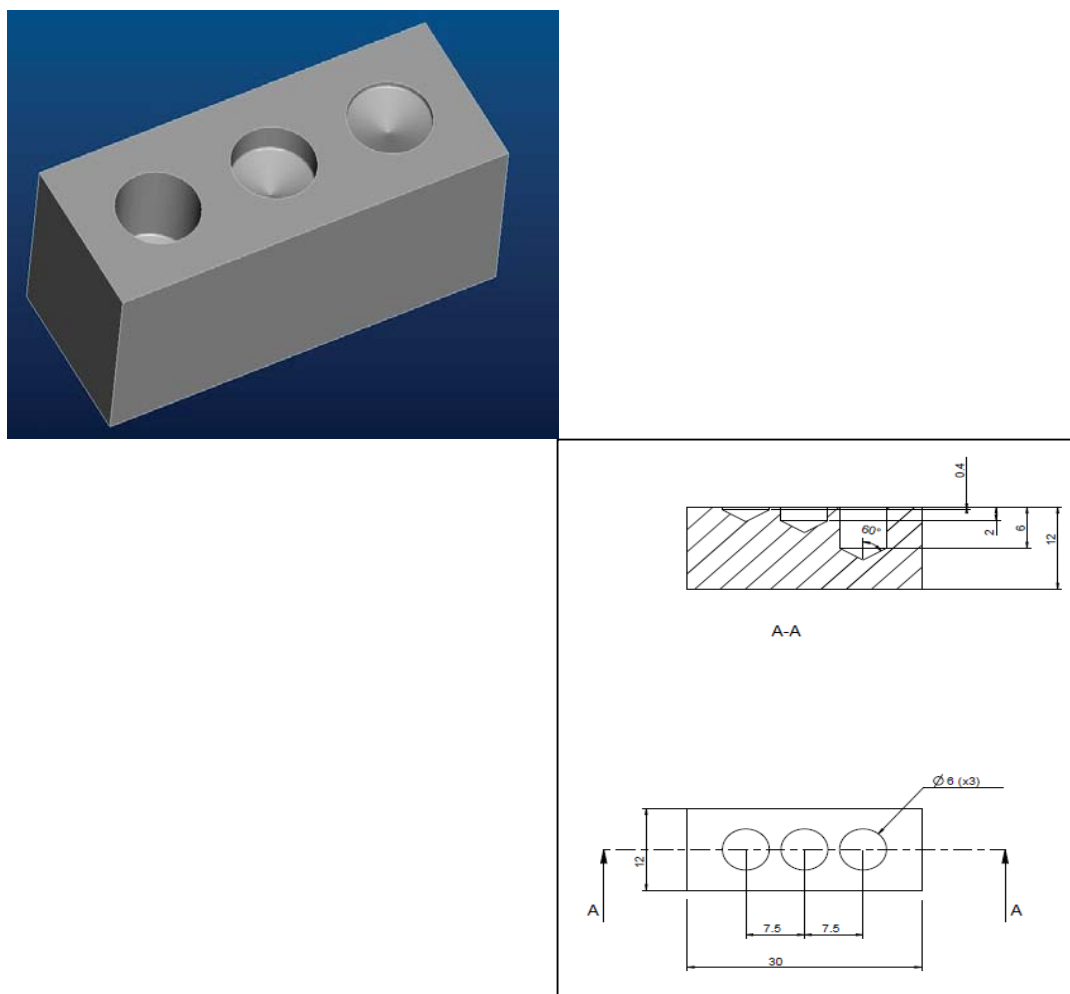


Figura 39 – Corpo-de-prova com 03 (furos) de $\text{Ø}6,0$ mm e profundidades diferentes.

Novamente, foi elaborado os resultados numéricos através do software Minitab para as 03 (três) profundidades dos furos de Ø6,0 mm.

A Figura 40 mostra os resultados numéricos para a profundidade de 0,4 mm.

Gage R&R

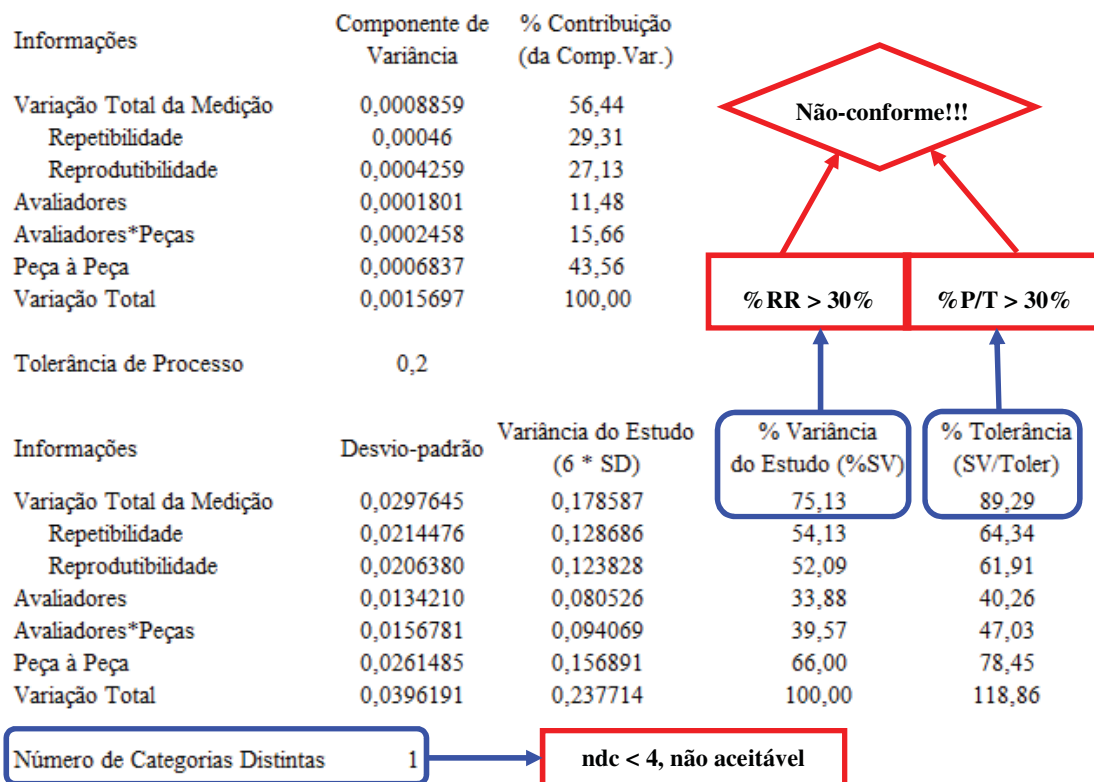


Figura 40 - Novos resultados numéricos com foco na profundidade de 0,4 mm do furo de Ø6,0 mm.

A Figura 41 mostra os resultados numéricos para a profundidade de 2,0 mm.

Gage R&R

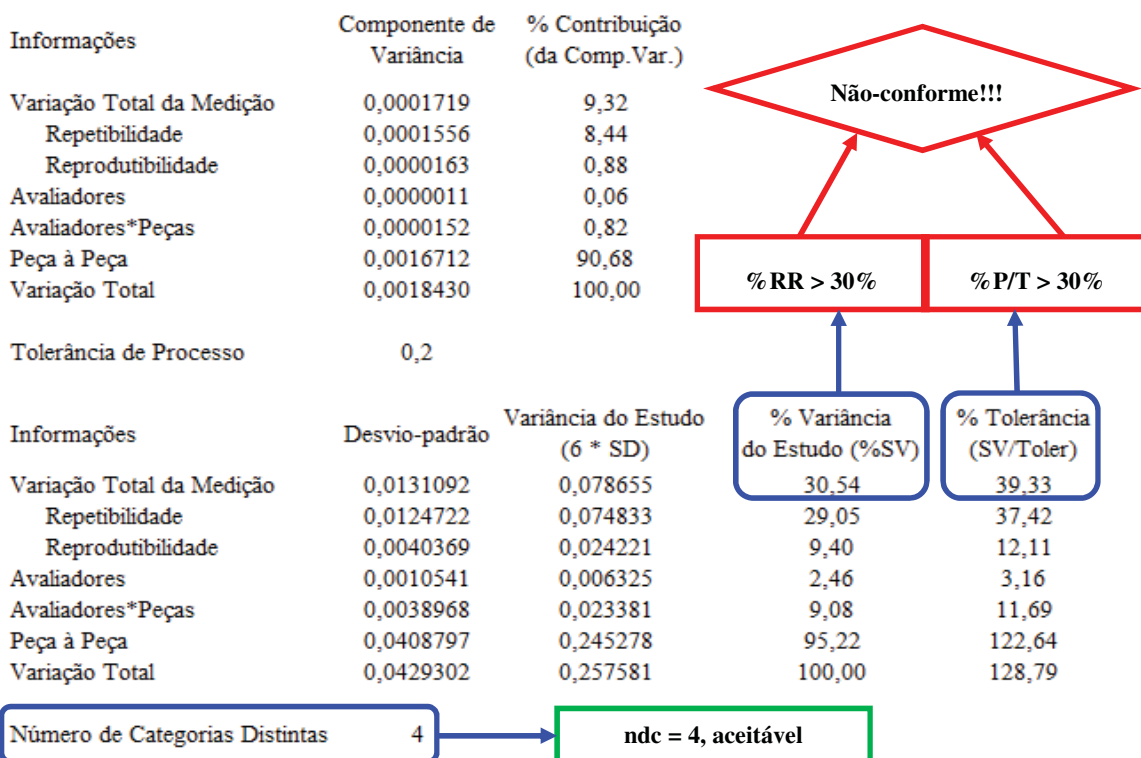


Figura 41 - Novos resultados numéricos com foco na profundidade de 2,0 mm do furo de Ø6,0 mm.

A Figura 42 mostra os resultados numéricos para a profundidade de 6,0 mm.

Gage R&R

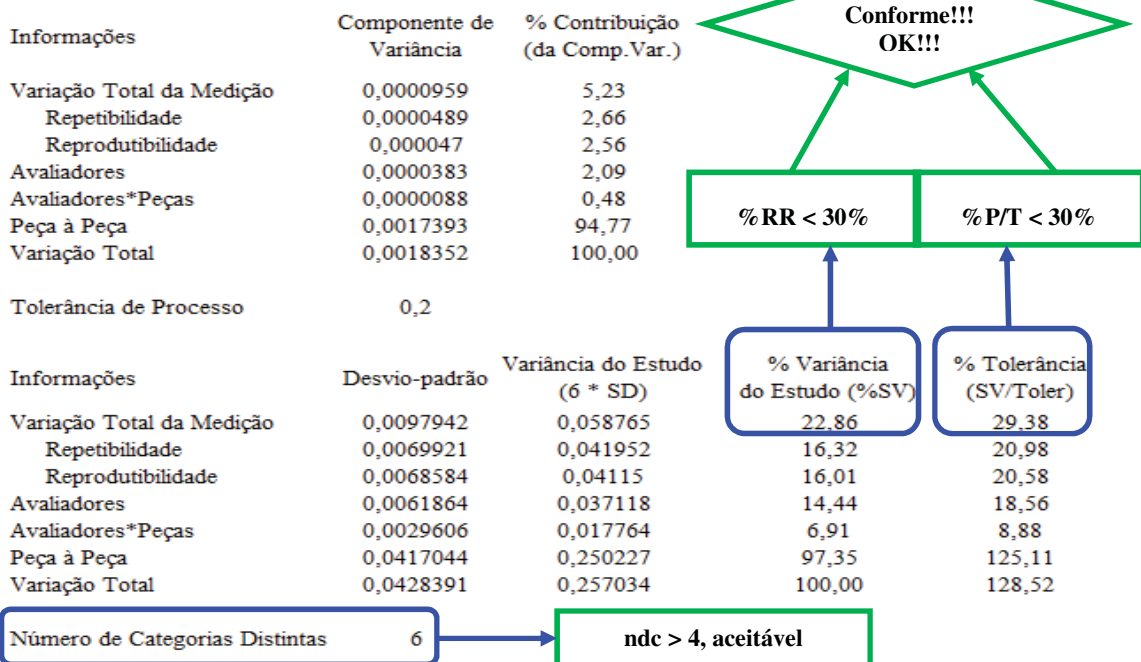


Figura 42 - Novos resultados numéricos com foco na profundidade de 6,0 mm do furo de Ø6,0 mm.

Podemos observar que os resultados numéricos para a profundidade de 6,0 mm do furo de $\varnothing 6,0$ mm, ou seja, 60% da área de contato da “orelha” do paquímetro, foram considerados aprovados:

- %P/T (variação da análise comparada à tolerância do processo) foi de **29,38%**;
- %RR (variação da análise comparada à variação do processo) foi de **22,86%**;
- ndc (número de categorias distintas) foi igual a **6**.

Ou seja, Estudo de R&R para \varnothing interno *versus* “orelha” do paquímetro quadrimensional está aprovado.

A partir das soluções e modificações feitas, algumas melhorias foram identificadas através do Estudo de R&R envolvendo a “orelha” do paquímetro quadrimensional (Tabela 7).

Tabela 7 – Melhorias identificadas após o Estudo de R&R da “orelha” do paquímetro quadrimensional.

CARACTERÍSTICA	SUGESTÃO
Diâmetros com profundidade < 50% da área de contato da “orelha” do paquímetro	Calibrador P/NP
Diâmetros com profundidade \geq 50% da área de contato da “orelha” do paquímetro	Paquímetro Quadrimensional
Campo de tolerância < 0,2mm	Calibrador P/NP ou Instrumento milesimal
Padrão de medição	Treinamento com foco em padronização do método de medição: Média 3 pontos / Zeragem do instrumento / Interferência de raio

Assim, comprovou-se a eficiência em se utilizar a metodologia DMAIC durante todo o Estudo de R&R, ou seja, desde a parte experimental até o momento em que se fez necessário o uso da melhoria técnica no sistema de medição analisado.

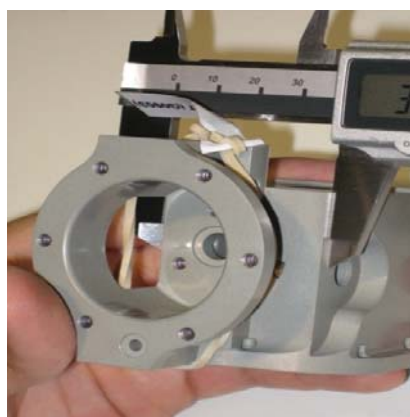
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seguindo o mesmo raciocínio dado como exemplo na metodologia do trabalho, a seguir serão analisados os resultados do Estudo de R&R para as dimensões de comprimento externo, profundidade e ressalto, todas controladas com o paquímetro quadrimensional e também dimensões internas (\varnothing internos) para o súbito convencional, o diatest, a ogiva e o micrômetro interno de três pontas, ou seja, abrangendo grande parte dos principais instrumentos manuais utilizados no dia-a-dia de uma linha de produção, a fim de se garantir um controle dimensional mais robusto de peças aeronáuticas usinadas.

4.1. Característica distância versus “bicos” do paquímetro quadrimensional

- PN 6713-0731;
- Característica crítica: 38,5 mm;
- Tolerância: +0,5 / -0,0;
- N° do desenho: 6713-0731;
- Revisão do desenho: 05;
- Localização: seção C13 / folha 1;
- Instrumento de medição: paquímetro quadrimensional (“bicos”).

A Figura 43 ilustra a peça a ser medida, o instrumento de medição e o desenho.



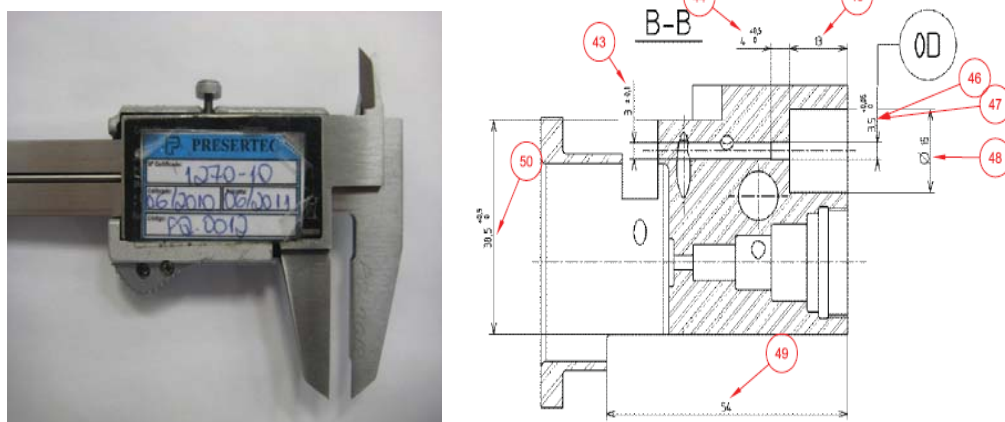


Figura 43 – Peça P/N 6713-0731, “bicos” do paquímetro quadrimensional e desenho (propriedade de LAB).

- Resultados numéricos (Figura 44):

Gage R&R

Informações	Componente de Variância	% Contribuição (da Comp.Var.)
Varição Total da Medição	0,0002385	13,62
Repetibilidade	0,0001267	7,23
Reprodutibilidade	0,0001119	6,39
Avaliadores	0,0000834	4,76
Avaliadores*Peças	0,0000284	1,62
Peça à Peça	0,0015123	86,38
Varição Total	0,0017508	100,00

Tolerância de Processo 0,5
Desvio-padrão histórico 0,0396329

Informações	Desvio-padrão	Variância do Estudo (6 * SD)	% Variância do Estudo (%SV)	% Tolerância (SV/Toler)	% Processo (SV/Proc)
Varição Total da Medição	0,015444	0,092664	36,91	18,53	38,97
Repetibilidade	0,0112546	0,067528	26,90	13,51	28,4
Reprodutibilidade	0,010576	0,063456	25,28	12,69	26,68
Avaliadores	0,0091332	0,054799	21,83	10,96	23,04
Avaliadores*Peças	0,0053326	0,031995	12,74	6,4	13,45
Peça à Peça	0,0388878	0,233327	92,94	46,67	98,12
Varição Total	0,0418423	0,251054	100,00	50,21	105,57

Número de Categorias Distintas 3

ndc < 4, não aceitável

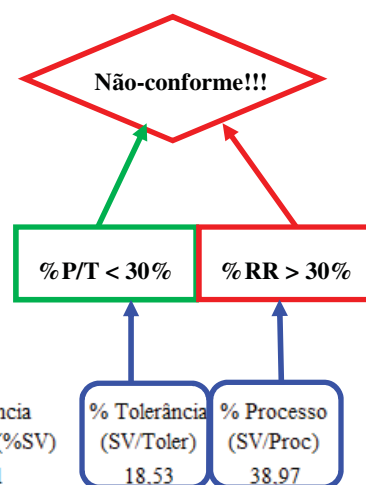


Figura 44 – Resultados numéricos do método cruzado para os “bicos” do paquímetro quadrimensional.

- Resultados gráficos (Figura 45):

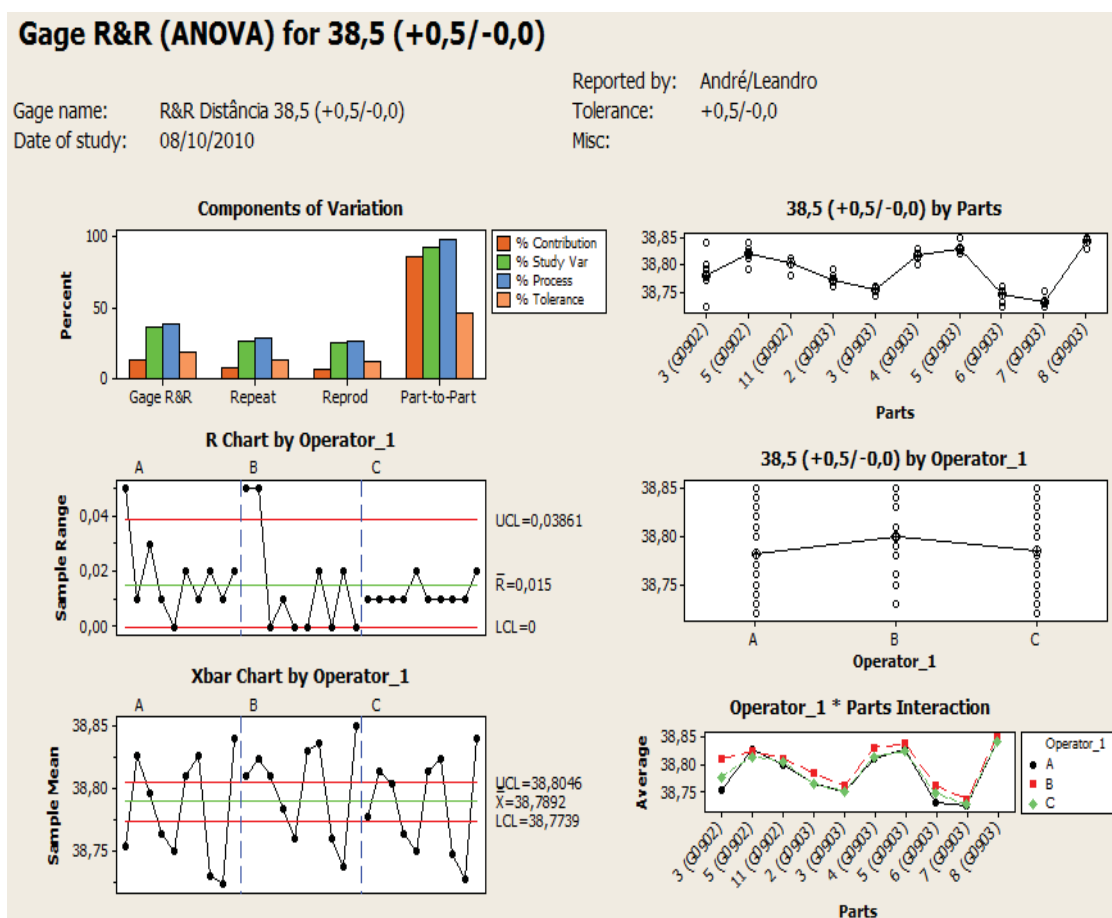


Figura 45 - Resultados gráficos do método cruzado para os “bicos” do paquímetro quadrimensional.

Concluindo parcialmente os resultados numéricos, tem-se:

- %P/T (variação da análise comparada à tolerância do processo) foi de **18,53%**;
- %RR (variação da análise comparada à variação do processo) foi de **38,97%**;
- ndc (número de categorias distintas) foi igual a **3**.

Observou-se uma amostra mais crítica, a peça 3 (G0902), a qual está variando muito, ou seja, esta possui algum problema intrínseco que está provocando variação indevida na medição.

Assim, foi decidido retirar esta amostra do estudo e refazer toda a análise numérica e gráfica com o intuito de verificar se a %RR (variação da análise comparada à variação do processo) irá diminuir.

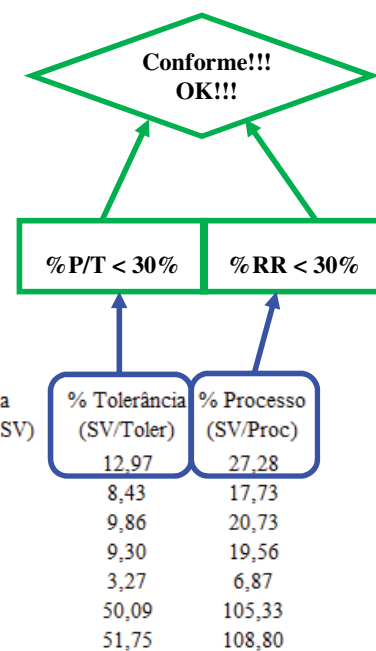
A Figura 46 ilustra os novos resultados numéricos após a retirada da peça 3 (G0902).

Gage R&R

Informações	Componente de Variância	% Contribuição (da Comp.Var.)
Varição Total da Medição	0,0001169	6,29
Repetibilidade	0,0000494	2,66
Reprodutibilidade	0,0000675	3,63
Avaliadores	0,0000601	3,23
Avaliadores*Peças	0,0000074	0,40
Peça à Peça	0,0017426	93,71
Varição Total	0,0018595	100,00

Tolerância de Processo	0,5
Desvio-padrão histórico	0,0396329

Informações	Desvio-padrão	Variância do Estudo (6 * SD)	% Variância do Estudo (%SV)
Varição Total da Medição	0,0108108	0,064865	25,07
Repetibilidade	0,0070273	0,042164	16,30
Reprodutibilidade	0,0082152	0,049291	19,05
Avaliadores	0,0077513	0,046508	17,98
Avaliadores*Peças	0,0027217	0,01633	6,31
Peça à Peça	0,0417444	0,250466	96,81
Varição Total	0,0431215	0,258729	100,00



Número de Categorias Distintas	5	ndc ≥ 4, aceitável
--------------------------------	---	--------------------

Figura 46 – Resultados numéricos após a retirada da amostra 03 do lote G0902.

Agora, tem-se uma conclusão final após a retirada da amostra:

- %P/T (variação da análise comparada à tolerância do processo) foi de **12,97%**;
- %RR (variação da análise comparada à variação do processo) foi de **27,28%**;
- ndc (número de categorias distintas) foi igual a **5**.

Ou seja, o Estudo de R&R está aprovado.

A partir das soluções e modificações feitas, algumas melhorias foram identificadas envolvendo os “bicos” do paquímetro quadrimensional (Tabela 8).

Tabela 8 - Melhorias identificadas após o Estudo de R&R dos “bicos” do paquímetro quadrimensional.

CARACTERÍSTICA	SUGESTÃO
Campo de tolerância $\geq 0,2\text{mm}$ (preferencialmente $\geq 0,25\text{mm}$)	Paquímetro Quadrimensional
Campo de tolerância $< 0,2\text{mm}$	Instrumento milesimal

4.2. Característica profundidade versus “haste” do paquímetro quadrimensional

- PN 6713-0731;
- Característica crítica: 2,2 mm;
- Tolerância: $\pm 0,1$ mm;
- N° do desenho: 6713-0731;
- Revisão do desenho: 05;
- Localização: seção A14 / folha 1;
- Instrumento de medição: paquímetro quadrimensional (“haste”).

A Figura 47 ilustra a peça a ser medida e o instrumento de medição manual utilizado.

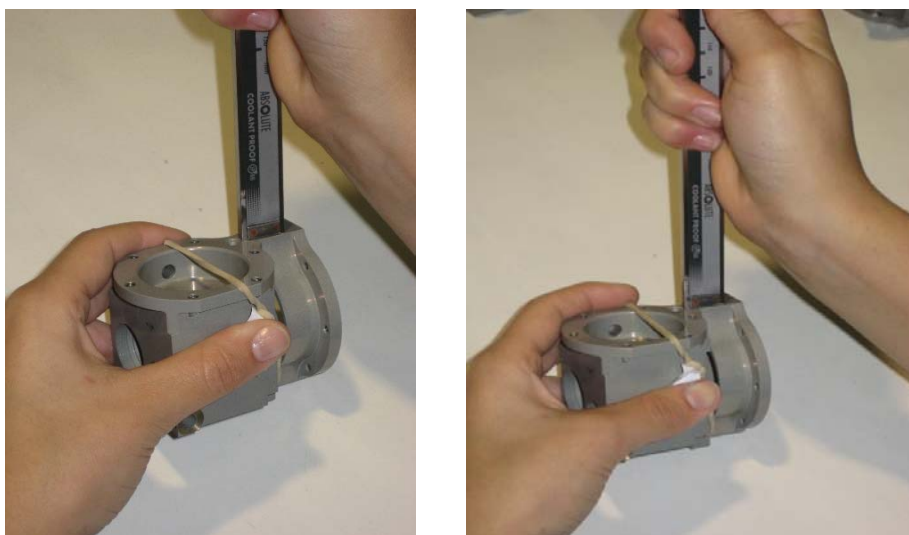


Figura 47 - Peça P/N 6713-0731 e “haste” do paquímetro quadrimensional (propriedade de LAB).

O estudo foi considerado inadequado, pois através da:

- Resultados numéricos: notamos que a %P/T (variação da análise comparada à tolerância do processo) foi de 30,33% e a %RR (variação da análise comparada à variação do processo) foi de 53,86%, ambos deveriam ser menor do que 30%. Notamos também que o n.d.c. (número de categorias distintas) foi igual a 1, sendo aceitável um valor superior a 4. Isso é justificado pelo fato da faixa dos limites de controle ser grande comparado à variação usual do processo.
- Resultados gráficos: concluímos que há analistas com péssima repetibilidade e também há uma grande diferença entre as médias das medidas dos analistas, o que comprova um grande problema com reprodutibilidade.

Assim, podemos concluir que será necessária a realização de melhorias no sistema de medição.

Visando melhorar o método de medição, foi utilizada a metodologia DMAIC, seguindo as seguintes fases:

Fase D: Definição do processo a ser melhorado;

- Medida: profundidade 2,2 mm;
- Tolerância: $\pm 0,1$ mm;
- Local de medição: bancada central situada na linha de produção;

Fase M: Foi realizado um brainstorming e elaborado um Diagrama de Causa e Efeito (Figura 50) com toda a equipe, visando discutir e listar as possíveis causas ou variáveis responsáveis pelo sistema de medição ter sido considerado inadequado.

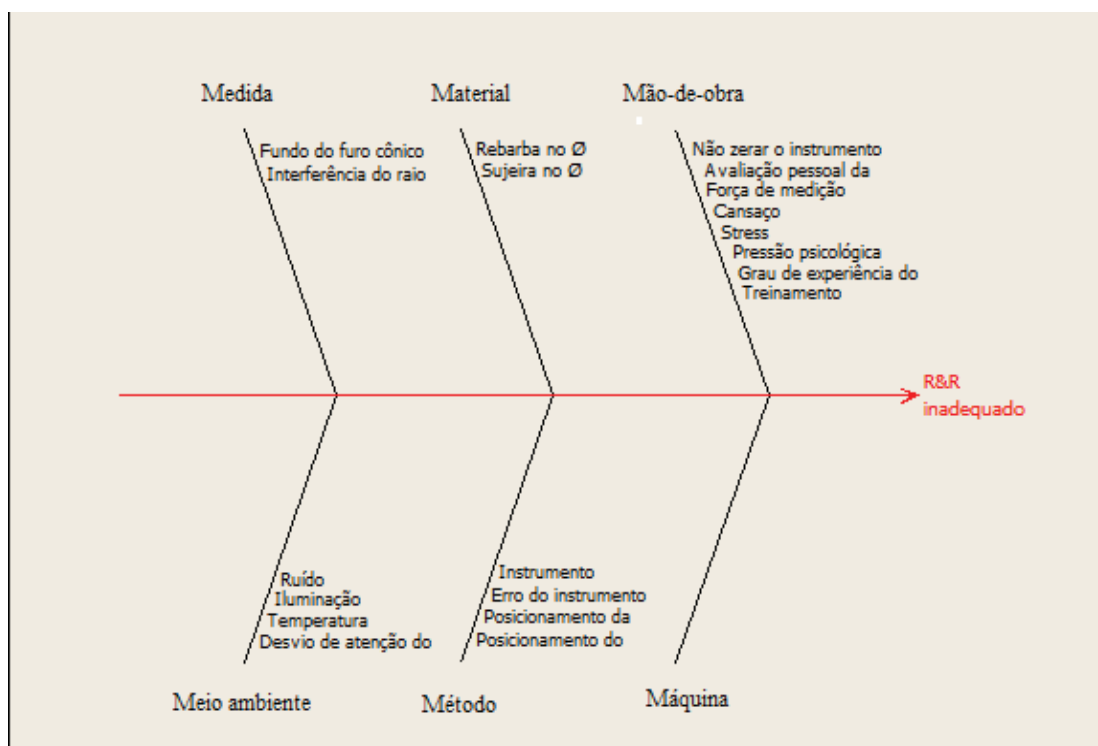


Figura 50 – Diagrama de causa e efeito com as causas que afetam a medição de profundidade.

Fase A: Após se determinar a importância de cada entrada, organizam-se em um gráfico de Pareto (Figura 51) e o foco será nas variáveis de maiores níveis.

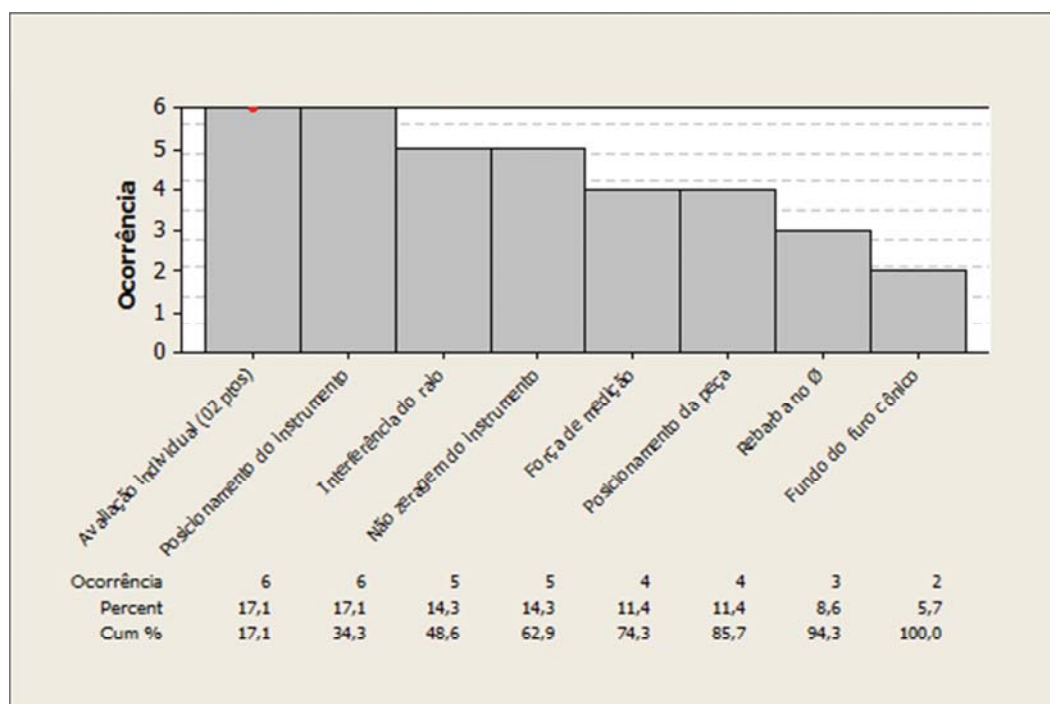


Figura 51 – Gráfico de Pareto com possíveis causas potenciais que afetam a medição de profundidade.

Na tabela 9, resumam-se as ações efetuadas para se investigar ou estudar cada uma das possíveis causas potenciais e descreve-se qual resultado obtido na sequência dessas mesmas ações.

Tabela 9 – Investigação e priorização das possíveis causas potenciais que afetam a medição de profundidade.

POSSÍVEL CAUSA	AÇÃO	EXECUTADA POR	QUANDO	RESULTADO
Posicionamento do instrumento junto à peça	Verificar as fotos tiradas durante as medições a fim de observar as maneiras como os operadores manuseiam o equipamento junto à peça.	André	03/11/2010	Pelas fotos ficou visível que todos os avaliadores posicionaram o instrumento perpendicular à peça para realizar a medição (maneira correta).
	Verificar novamente (pessoalmente) como os avaliadores manuseiam o equipamento junto à peça, fornecendo uma peça e o instrumento para o operador sem avisá-lo, simulando um pedido de ajuda em uma medida. Repetir o procedimento depois de uns 20 min.	André	03/11/2010	Todos os avaliadores posicionaram o instrumento perpendicular à peça para realizar a medição (maneira correta). Em contrapartida, houve momentos em que os avaliadores <u>encostaram a haste do paquímetro na parede do diâmetro e também momentos em que centralizaram a haste no diâmetro do furo.</u>
Avaliação individual da característica	Verificar se o avaliador realiza a medição em pelo menos 02 (dois) pontos do diâmetro, o que pode acarretar medidas diferentes entre os avaliadores.	André	03/11/2010	<u>Nenhum dos 03 (três) operadores realizou a medição em dois pontos do diâmetro.</u> não fornecendo a média dos mesmos. Assim, a forma de medição está incorreta.
Interferência do raio	Verificar se o operador está tendo a cautela de não encostar a haste do paquímetro sob o raio durante a medição	André	03/11/2010	Pelo fato da ferramenta de corte ser uma broca com um ângulo de abertura de 140°, o fundo do diâmetro está cônico, <u>impossibilitando a medição correta da profundidade do furo utilizando a haste do paquímetro quadridimensional.</u> Como o diâmetro do furo é de 2,0mm e o diâmetro da haste do paquímetro é de 1,9mm, juntamente com o raio de 0,2mm produzido pela ferramenta, fica impossível de se ter a medida correta/real da profundidade do furo.
Não zeragem do instrumento	Verificar se o operador "zera" o instrumento antes de iniciar uma medição, fornecendo uma peça e o instrumento para o operador sem avisá-lo, simulando um pedido de ajuda em uma medida. Repetir o procedimento depois de uns 20 min.	André	03/11/2010	Houve uma grande divergência entre os avaliadores. Alguns limparam e zeram o instrumento, outros colocaram o instrumento sob a bancada durante as suas medições e quando as retomou, <u>não zeraram o instrumento</u> novamente.
Posicionamento da peça	Verificar se o operador ao realizar a sua medição, apóia a peça sobre a bancada, sobre o seu corpo ou de qualquer outra maneira.	André	03/11/2010	Todos os operadores apoiaram a peça sobre a bancada para realizarem as suas medições.
Força de medição				
Rebarba no diâmetro	Verificar se há rebarbas nos diâmetros das peças, analisando peça-a-peça com o microscópio na sua ampliação máxima.	Vladimir	04/11/2010	Nenhuma rebarba foi encontrada no diâmetro das peças.
Fundo do furo cônico	Verificar se o furo está cônico nos diâmetros das peças, analisando peça-a-peça com o microscópio na sua ampliação máxima e também através da máquina de contorno.	Vladimir	04/11/2010	Pela visualização através do microscópio não foi possível investigar se o fundo do furo é cônico. <u>Já com a máquina de contorno foi possível identificar que o fundo do furo está cônico,</u> o que mostra que a medição da profundidade do furo não fornecerá um valor exato, confiável.

Assim, 05 (três) possíveis causas potenciais foram selecionadas com o intuito de comprová-las ou não de serem as causas-raízes do caso em questão.

Optou-se em utilizar outro furo do mesmo *Part Number* com profundidade maior ($18,6 \pm 0,1$ mm), e desenvolver um novo estudo envolvendo 03 (três) avaliadores do setor de metrologia, ou seja, um pessoal mais experiente, orientando-os ao realizarem as medições, atentarem-se às 05 (cinco) possíveis causas potenciais mencionadas acima. O resultado da nova análise (Figura 52) foi:

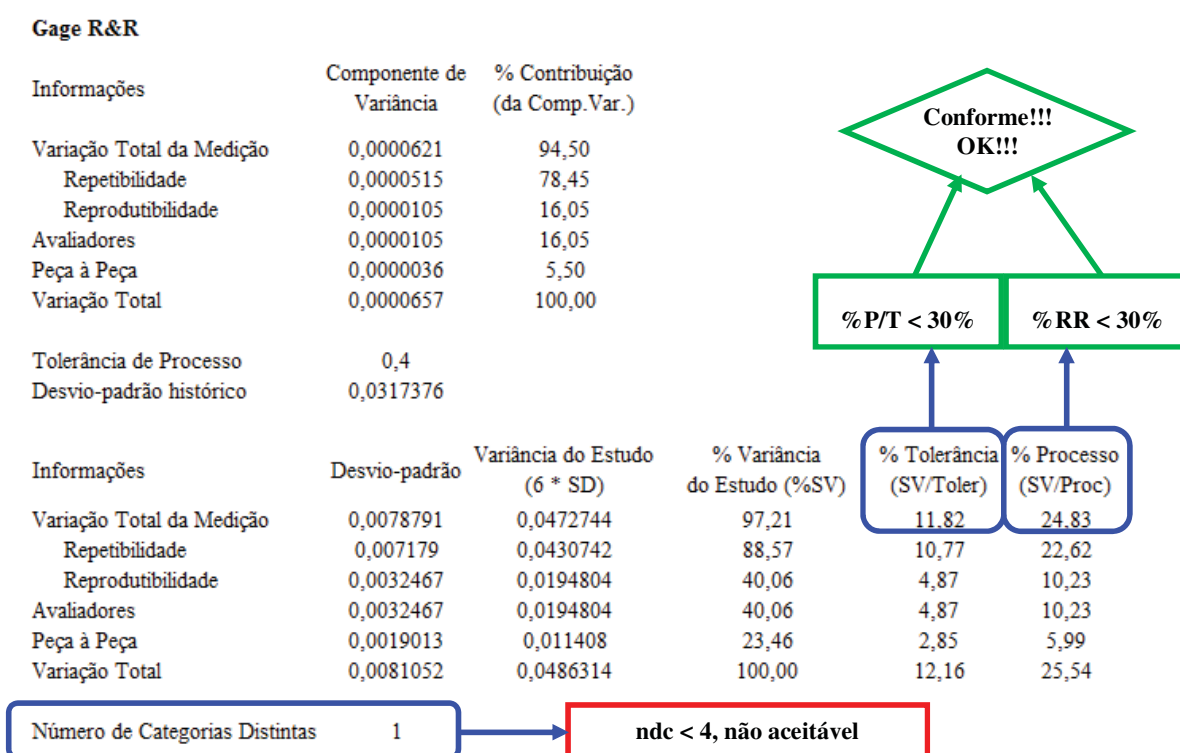


Figura 52 – Novos resultados numéricos, foco nas possíveis causas potenciais que afetam a medição de profundidade.

Apesar do ndc. (número de categorias distintas) não estar dentro da especificação (≥ 4), o Estudo de R&R foi considerado aceitável.

A partir das modificações feitas, algumas melhorias foram identificadas envolvendo a "haste" do paquímetro quadridimensional, as quais serão reportadas, mais adiante, em uma tabela geral de recomendações do uso do paquímetro (Tabela 10).

4.3. Característica ressalto versus “encosto traseiro” do paquímetro quadrimensional

- PN 6713-0731;
- Característica crítica: 1,25 mm;
- Tolerância: +0,5 / -0,0;
- N° do desenho: 6713-0731;
- Revisão do desenho: 05;
- Localização: seção G9 / folha 1;
- Instrumento de medição: paquímetro quadrimensional (“encosto traseiro”).

A Figura 53 ilustra a peça a ser medida e o instrumento de medição manual utilizado.

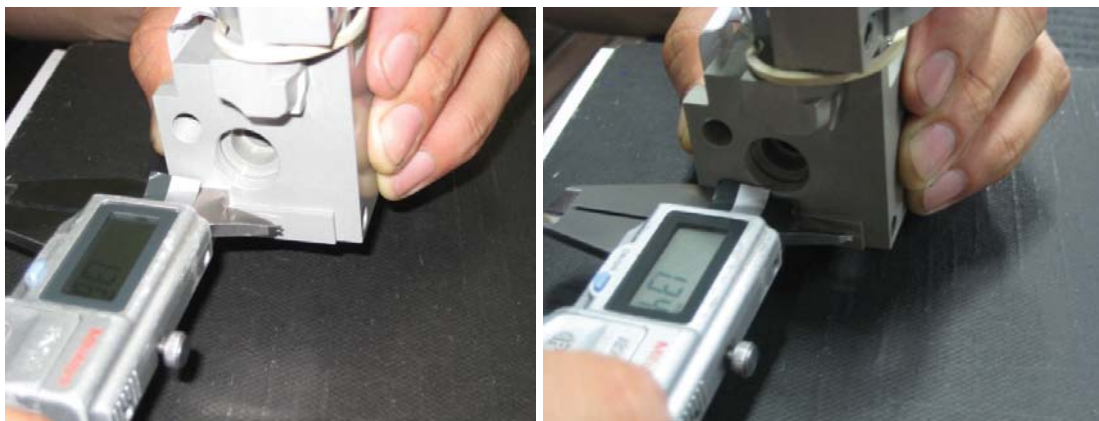


Figura 53 - Peça P/N 6713-0731, “encosto traseiro” do paquímetro quadrimensional (propriedade de LAB).

- Resultados numéricos para o “encosto traseiro” do paquímetro quadrimensional (Figura 54):

Gage R&R

Informações	Componente de Variância	% Contribuição (da Comp.Var.)
Varição Total da Medição	0,00	86,33
Repetibilidade	0,00	31,41
Reprodutibilidade	0,00	54,92
Avaliadores	0,00	48,15
Avaliadores*Peças	0,00	6,78
Peça à Peça	0,00	13,67
Varição Total	0,00	100,00

Tolerância de Processo	0,5
Desvio-padrão histórico	0,0146548

Informações	Desvio-padrão	Variância do Estudo (6 * SD)	% Variância do Estudo (%SV)	% Tolerância (SV/Toler)	% Processo (SV/Proc)
Varição Total da Medição	0,0220353	0,132212	92,92	26,44	150,36
Repetibilidade	0,0132916	0,07975	56,05	15,95	90,70
Reprodutibilidade	0,0175752	0,105451	74,11	21,09	119,93
Avaliadores	0,0164555	0,098733	69,39	19,75	112,29
Avaliadores*Peças	0,0061731	0,037039	26,03	7,41	42,12
Peça à Peça	0,0087677	0,052606	36,97	10,52	59,83
Varição Total	0,0237156	0,142293	100,00	28,46	161,83

Número de Categorias Distintas 1

ndc < 4, não aceitável

Figura 54 - Resultados numéricos do método cruzado para o “encosto traseiro” do paquímetro quadrimensional.

- Resultados gráficos para o “encosto traseiro” do paquímetro quadrimensional (Figura 55):

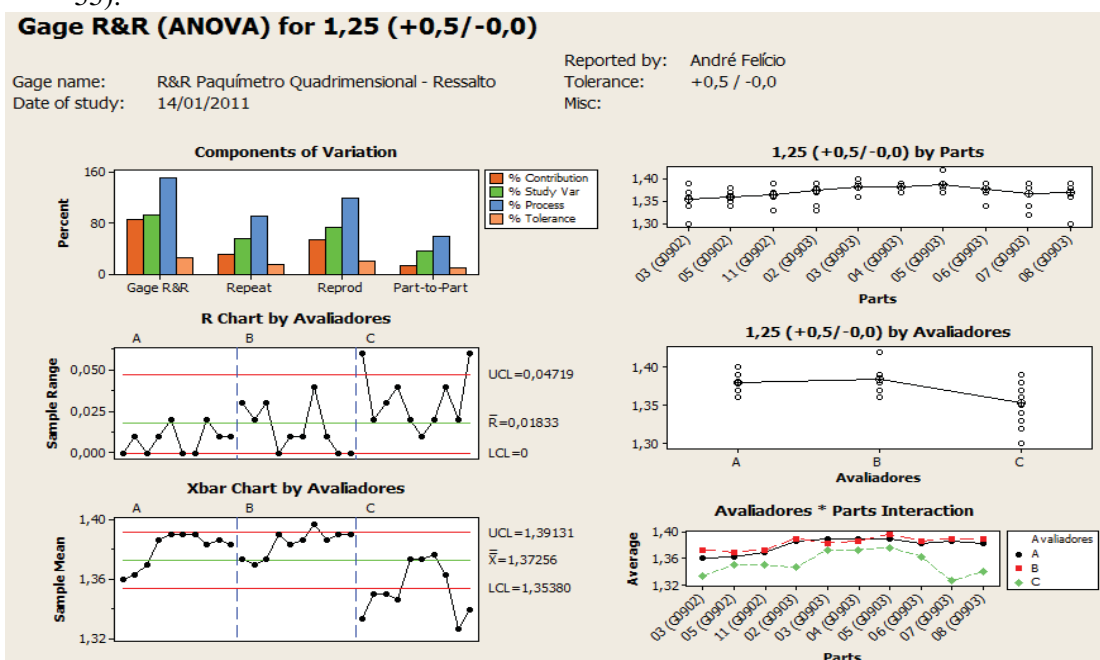


Figura 55 - Resultados gráficos do método cruzado para o “encosto traseiro” do paquímetro quadrimensional.

Concluindo parcialmente, tem-se:

- %P/T (variação da análise comparada à tolerância do processo) foi de **26,44%**;
- %RR (variação da análise comparada à variação do processo) foi de **150,36%**;
- ndc (número de categorias distintas) foi igual a **1**.

Ou seja, o Estudo foi considerado inadequado.

Observou-se que o avaliador C manteve as médias de suas medidas bem abaixo das médias dos outros dois operadores, ou seja, este não manteve uma boa interação com os avaliadores A e B. Assim, resolvemos retirar esta amostra do estudo e refazer toda a análise (Figura 56).

Gage R&R

Informações	Componente de Variância	% Contribuição (da Comp.Var.)
Varição Total da Medição	0,0000728	45,79
Repetibilidade	0,0000683	42,99
Reprodutibilidade	0,0000044	2,80
Avaliadores	0,0000044	2,80
Peça à Peça	0,0000862	54,21
Varição Total	0,0001590	100,00

Tolerância de Processo	0,5
Desvio-padrão histórico	0,0146548

Informações	Desvio-padrão	Variância do Estudo (6 * SD)	% Variância do Estudo (%SV)	% Tolerância (SV/Toler)	% Processo (SV/Proc)
Varição Total da Medição	0,008531	0,0511859	67,67	10,24	58,21
Repetibilidade	0,0082664	0,0495984	65,57	9,92	56,41
Reprodutibilidade	0,0021082	0,0126491	16,72	2,53	14,39
Avaliadores	0,0021082	0,0126491	16,72	2,53	14,39
Peça à Peça	0,0092829	0,0556976	73,63	11,14	63,34
Varição Total	0,0126076	0,0756454	100,00	15,13	86,03

Número de Categorias Distintas 1

ndc < 4, não aceitável

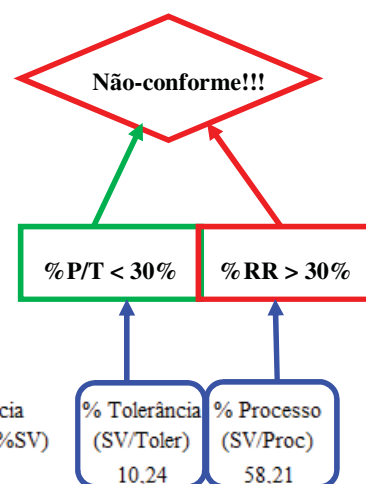




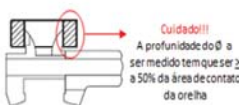

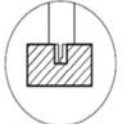
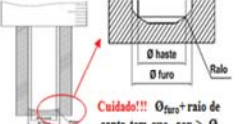

Figura 56 – Novos resultados numéricos após a retirada do avaliador C.

Devido às dificuldades em se efetuar as medições com esta parte do paquímetro e também pelo fato de, mesmo de se tentando uma melhoria no sistema, não houve sucesso com o Estudo, esse sistema de medição foi considerado ineficiente quando se trata de melhoria de processo.

Em relação ao Estudo de R&R com todas as 04 (quatro) possíveis formas de medições com o paquímetro quadrimensional, elaborou-se uma lista de recomendações, conforme

Tabela 10, para o uso ou não deste instrumento, como opção para o controle dimensional de uma dada característica.

Tabela 10 – Recomendações para o uso do paquímetro quadrimensional.

RECOMENDAÇÃO GERAL				
	RECOMENDAÇÃO GERAL	SUGESTÃO	RECOMENDAÇÃO ESTATÍSTICA	OBSERVAÇÕES
 1. Paquímetro Quadrimensional	Aceitável para selecionar peças conformes/não conformes desde que o campo de tolerância seja $\geq 0,2$, porém preferencialmente $\geq 0,3$	NA	NA	NA
RECOMENDAÇÕES ESPECÍFICAS				
CARACTERÍSTICA	RECOMENDAÇÃO ESPECÍFICA	SUGESTÃO	RECOMENDAÇÃO ESTATÍSTICA	OBSERVAÇÕES
 2. "orelha" - Ø interno	Não recomendado para Ø com profundidade menor que 50% da área de contato da orelha	Substituir por: Calibrador P/NP ou Instrumento milesimal	Se atendidas as recomendações geral e específica, pode ser utilizado para melhoria do processo (ex: CEP)	
 3. "bico" - distância	NA	NA	Se atendida a recomendação geral, pode ser utilizado para melhoria do processo (ex: CEP)	NA
 4. haste cilíndrica - profundidade	Não recomendado para medida (Øfuro + raio de canto) < Ø da haste	Substituir por: Ponte + Relógio Comparador	Se atendidas as recomendações geral e específica, pode ser utilizado para melhoria do processo (ex: CEP)	
 5. ressalto	NA	NA	Não é indicado para ser utilizado para melhoria do processo (ex: CEP)	NA

4.4. Característica \emptyset interno versus ogiva

- PN 1386-2201;
- Característica crítica: 12,32 H8 mm;
- Tolerância: +0,027 / -0,0;
- N° do desenho: 1386-2201;
- Revisão do desenho: 08;
- Localização: seção F12 / folha 2;
- Instrumento de medição: ogiva e anel padrão.

A Figura 57 ilustra a peça a ser medida e o instrumento de medição manual utilizado.

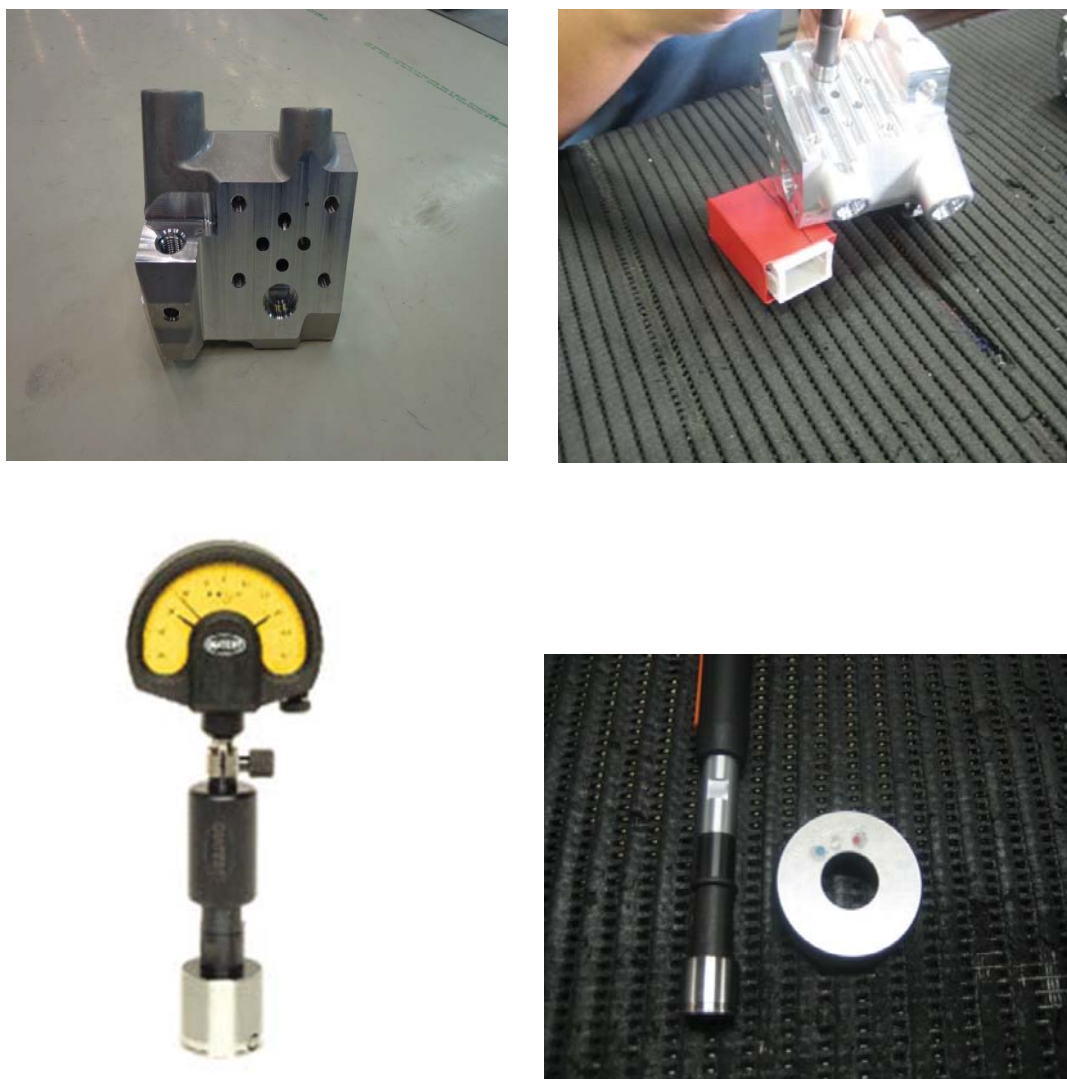


Figura 57 – Peça 1386-2201, ogiva e anel padrão (propriedade de LAB).

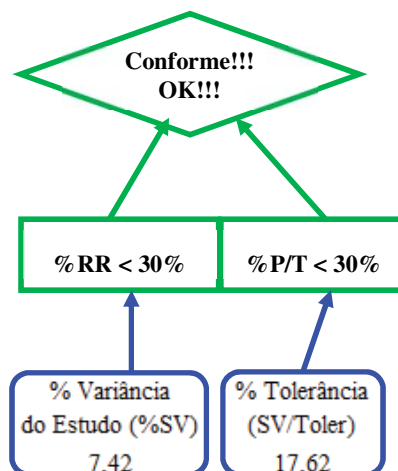
- Resultados numéricos para a ogiva (Figura 58):

Gage R&R

Informações	Componente de Variância	% Contribuição (da Comp.Var.)
Varição Total da Medição	0,0000006	0,55
Repetibilidade	0,0000005	0,42
Reprodutibilidade	0,0000002	0,13
Avaliadores	0,0000000	0,00
Avaliadores*Peças	0,0000002	0,13
Peça à Peça	0,0001135	99,45
Varição Total	0,0001142	100,00

Tolerância de Processo 0,027

Informações	Desvio-padrão	Variância do Estudo (6 * SD)	% Variância do Estudo (%SV)	% Tolerância (SV/Toler)
Varição Total da Medição	0,0007927	0,0047563	7,42	17,62
Repetibilidade	0,0006912	0,0041473	6,47	15,36
Reprodutibilidade	0,0003881	0,0023286	3,63	8,62
Avaliadores	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00
Avaliadores*Peças	0,0003881	0,0023286	3,63	8,62
Peça à Peça	0,0106554	0,0639325	99,72	236,79
Varição Total	0,0106849	0,0641092	100,00	237,44



Número de Categorias Distintas 18 **ndc ≥ 4, aceitável**

Figura 58 – Resultados numéricos do método cruzado para a ogiva.

- Resultados gráficos para a ogiva (Figura 59):

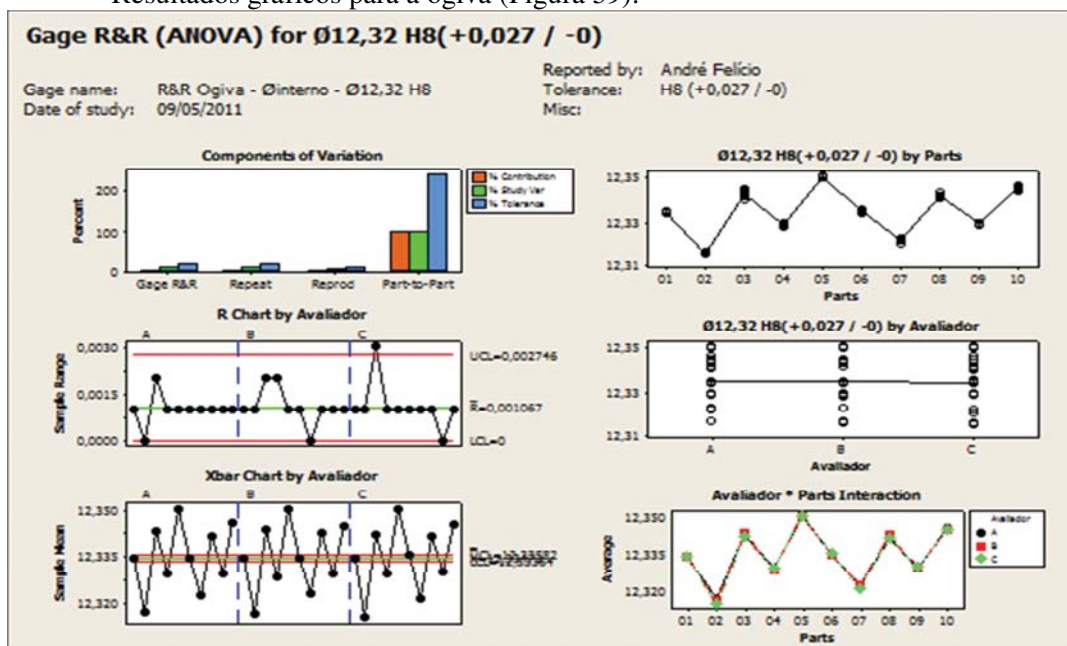


Figura 59 – Resultados gráficos do método cruzado para a ogiva.



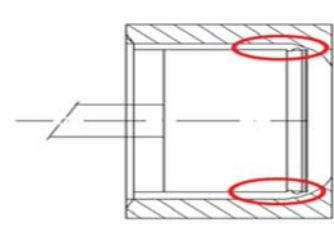
A conclusão do Estudo de RR para o instrumento de medição ogiva foi:

- %P/T (variação da análise comparada à tolerância do processo) foi de **17,62%**;
- %RR (variação da análise comparada à variação do processo) foi de **7,42%**;
- ndc (número de categorias distintas) foi igual a **18**.

Ou seja, o Estudo de R&R está aprovado, sendo considerado aceitável.

Assim, a Tabela 11 representa as recomendações para o uso da ogiva.

Tabela 11 – Recomendações para o uso da ogiva.

CARACTERÍSTICA	RECOMENDAÇÃO ESPECÍFICA										SUGESTÃO	RECOMENDAÇÃO ESTATÍSTICA	OBSERVAÇÕES
	Ø mm	TOLERÂNCIA											
		H9	H8	H7	H6								
	1-3	0,025	0,014	0,010	0,006								
	3-6	0,030	0,018	0,012	0,008								
	6-10	0,036	0,022	0,015	0,009								
	10-18	0,043	0,027	0,018	0,011								
	18-30	0,052	0,033	0,021	0,013								
	30-50	0,062	0,039	0,025	0,016								
	50-80	0,074	0,046	0,030	0,019								
	80-120	0,087	0,054	0,035	0,022								
	120-180	0,100	0,063	0,040	0,025								
180-200	0,115	0,072	0,046	0,029									
<p>LEGENDA:</p>  <p>Ótimo Aceitável (exceto característica-chave) Não recomendável</p>											<p>1) Para os casos onde o sistema de medição é aceitável porém trata-se de uma característica-chave ou o sistema de medição é não recomendado, a sugestão é utilizar outro tipo de instrumento de medição, tais como: 3D, calibrador PNP.</p> <p>2) Principalmente para as faixas de transição (ótimo <-> aceitável <-> não recomendável) uma opção seria trabalhar com limites de processo mais restritos que os limites de especificação.</p>	<p>Apresenta uma ótima discriminação, podendo ser utilizado em gráficos de controle, CEP, etc.</p>	<p>Furo cego</p> <p>1) Não efetuar medição sobre o raio de canto no final do furo.</p> 

4.5. Característica Øinterno versus súbito convencional

- PN 1386-2201;
- Característica crítica: 12,32 H8 mm;
- Tolerância: +0,027 / -0,0;
- N° do desenho: 1386-2201;
- Revisão do desenho: 08;
- Localização: seção F12 / folha 2;
- Instrumento de medição: súbito convencional e anel padrão.

A Figura 60 ilustra a peça a ser medida e o instrumento de medição manual utilizado.

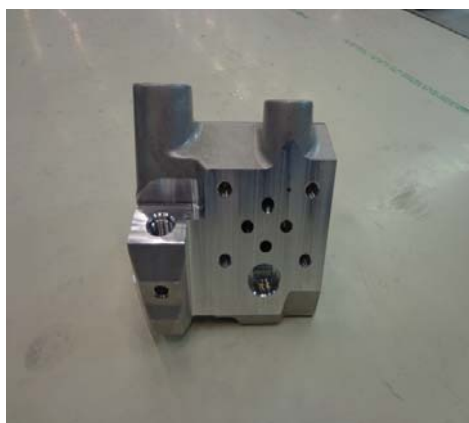


Figura 60 – Peça 1386-2201, súbito convencional e anel padrão (propriedade de LAB)

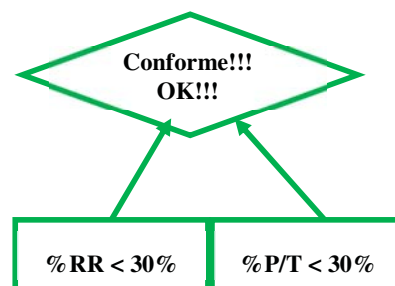
- Resultados numéricos para o súbito convencional (Figura 61):

Gage R&R

Informações	Componente de Variância	% Contribuição (da Comp.Var.)
Varição Total da Medição	0,0000009	0,81
Repetibilidade	0,0000007	0,63
Reprodutibilidade	0,0000002	0,18
Avaliadores	0,0000001	0,08
Avaliadores*Peças	0,0000001	0,10
Peça à Peça	0,0001118	99,19
Varição Total	0,0001127	100,00

Tolerância de Processo 0,027

Informações	Desvio-padrão	Variância do Estudo (6 * SD)	% Variância do Estudo (%SV)	% Tolerância (SV/Toler)
Varição Total da Medição	0,0009545	0,0057271	8,99	21,21
Repetibilidade	0,0008433	0,0050596	7,94	18,74
Reprodutibilidade	0,0004472	0,0026833	4,21	9,94
Avaliadores	0,0003043	0,0018257	2,87	6,76
Avaliadores*Peças	0,0003277	0,0019664	3,09	7,28
Peça à Peça	0,0105739	0,0634435	99,60	234,98
Varição Total	0,0106169	0,0637015	100,00	235,93



Número de Categorias Distintas 15 → **ndc ≥ 4, aceitável**

Figura 61 - Resultados numéricos do método cruzado para o súbito convencional.

- Resultados gráficos para o súbito convencional (Figura 62):

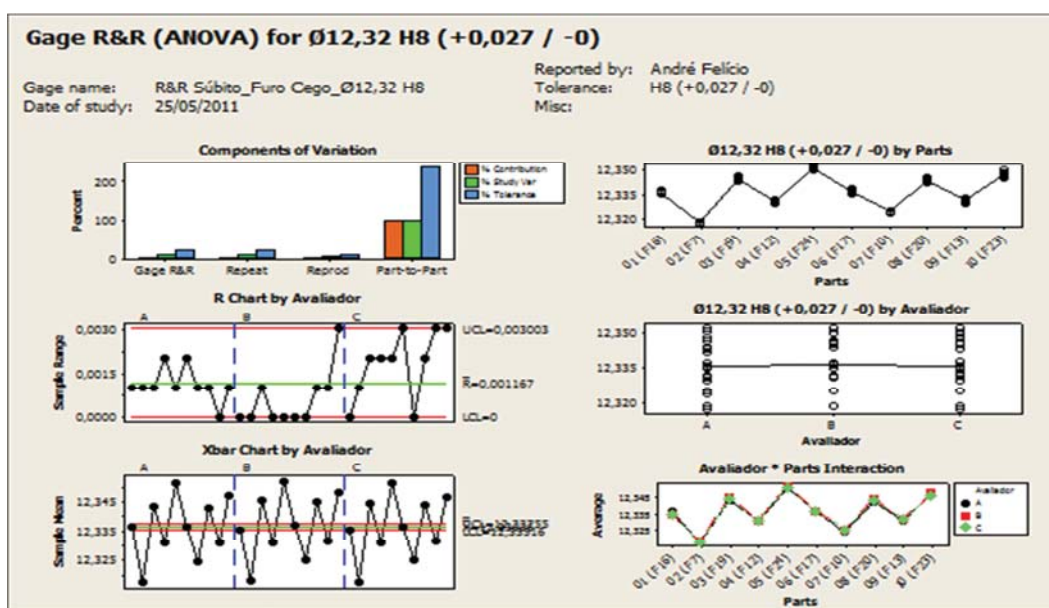



Figura 62 - Resultados gráficos do método cruzado para o súbito convencional.

O estudo foi considerado aceitável, pois através da análise numérica notamos que a %P/T (variação da análise comparada à tolerância do processo) foi de 21,21% e a %RR (variação da análise comparada à variação do processo) foi de 8,99%, ambos menores do que 30%. Notamos também que o ndc (número de categorias distintas) foi igual a 15, um valor superior a 4. Isso é justificado pelo fato da faixa dos limites de controle ser pequena comparada à variação usual do processo.

A tabela 12 exemplifica as recomendações para o uso do súbido convencional.

Tabela 12 – Recomendações para o uso do súbido convencional.

CARACTERÍSTICA	RECOMENDAÇÃO ESPECÍFICA										SUGESTÃO	RECOMENDAÇÃO ESTATÍSTICA	OBSERVAÇÕES
	TOLERÂNCIA												
	0 mm	H9	H8	H7	H6	H9	H8	H7	H6	H5			
	1-3	0,025	0,014	0,010	0,006	0,025	0,014	0,010	0,006	0,004	<p>1) Para os casos onde o sistema de medição é aceitável porém trata-se de uma característica-chave ou o sistema de medição é não recomendado, a sugestão é utilizar outro tipo de instrumento de medição, tais como: 3D, calibrador P/NP.</p> <p>2) Principalmente para as faixas de transição (ótimo <> aceitável <> não recomendável) uma opção seria trabalhar com limites de processo mais restritos que os limites de especificação.</p> <p>LEGENDA:</p> <ul style="list-style-type: none"> Ótimo Aceitável (exceto característica-chave) Não recomendável 	<p>Apresenta uma ótima discriminação, podendo ser utilizado em gráficos de controle, CEP, etc.</p>	<p>Furo cego</p> <p>1) "Zerar" o instrumento em um <u>mel padrão de medição</u> bem semelhante/proxima ao valor da característica a ser medida, evitando assim, <u>erro de linearidade</u>.</p> <p>2) Profundidade do furo. Para facilitar a centralização do furo, <u>h</u> (suporte do êmbolo) tem que ser < <u>H</u> do furo.</p> <p>3) Não efetuar medição sobre o <u>raio de canto</u> no final do furo;</p> <p>4) Não encostar o instrumento no <u>fundo</u> do furo.</p>
	3-6	0,030	0,018	0,012	0,008	0,030	0,018	0,012	0,008	0,006			
	6-10	0,036	0,022	0,015	0,009	0,036	0,022	0,015	0,009	0,007			
	10-18	0,043	0,027	0,018	0,011	0,043	0,027	0,018	0,011	0,008			
	18-30	0,052	0,033	0,021	0,013	0,052	0,033	0,021	0,013	0,010			
	30-50	0,062	0,039	0,025	0,016	0,062	0,039	0,025	0,016	0,012			
	50-80	0,074	0,046	0,030	0,019	0,074	0,046	0,030	0,019	0,014			
	80-120	0,087	0,054	0,035	0,022	0,087	0,054	0,035	0,022	0,016			
	120-180	0,100	0,063	0,040	0,025	0,100	0,063	0,040	0,025	0,018			
	180-200	0,115	0,072	0,046	0,029	0,115	0,072	0,046	0,029	0,020			

4.6. Característica \varnothing interno versus diatest

- PN 1386-2201;
- Característica crítica: 12,32 H8 mm;
- Tolerância: +0,027 / -0,0;
- N° do desenho: 1386-2201;
- Revisão do desenho: 08;
- Localização: seção F12 / folha 2;
- Instrumento de medição: diatest e anel padrão.

A Figura 63 ilustra a peça a ser medida e o instrumento de medição manual utilizado.



Figura 63 - Peça 1386-2201, diatest e anel padrão.

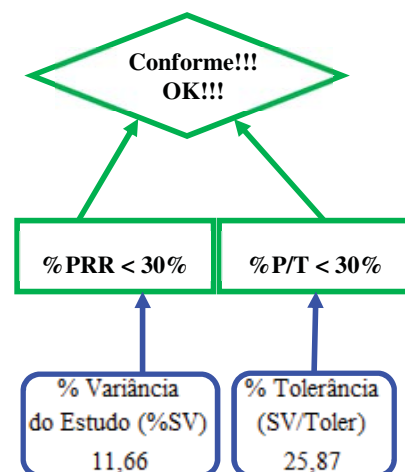
- Resultados numéricos para o diatest (Figura 64):

Gage R&R

Informações	Componente de Variância	% Contribuição (da Comp.Var.)
Varição Total da Medição	0,000014	1,36
Repetibilidade	0,0000006	0,59
Reprodutibilidade	0,0000008	0,77
Avaliadores	0,0000007	0,71
Avaliadores*Peças	0,0000001	0,06
Peça à Peça	0,0000983	98,64
Varição Total	0,0000997	100,00

Tolerância de Processo 0,027

Informações	Desvio-padrão	Variância do Estudo (6 * SD)	% Variância do Estudo (%SV)	% Tolerância (SV/Toler)
Varição Total da Medição	0,0011643	0,0069857	11,66	25,87
Repetibilidade	0,0007674	0,0046043	7,69	17,05
Reprodutibilidade	0,0008756	0,0052536	8,77	19,46
Avaliadores	0,0008421	0,0050523	8,43	18,71
Avaliadores*Peças	0,00024	0,0014402	2,40	5,33
Peça à Peça	0,009917	0,0595018	99,32	220,38
Varição Total	0,0099851	0,0599104	100,00	221,89



Número de Categorias Distintas 12 → **ndc ≥ 4, aceitável**

Figura 64 - Resultados numéricos do método cruzado para o diatest.

- Resultados gráficos para o diatest (Figura 65):

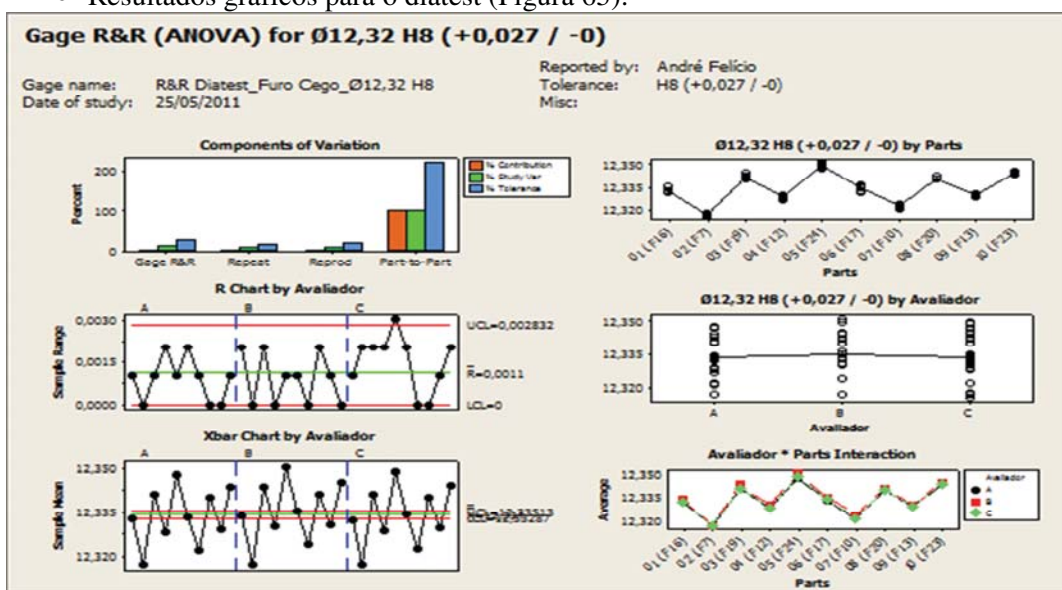


Figura 65 - Resultados gráficos do método cruzado para o diatest.


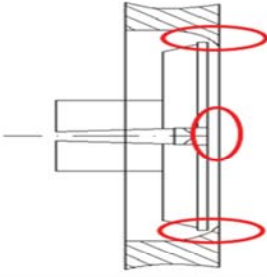
A conclusão do Estudo de RR para o instrumento de medição diatest foi:

- %P/T (variação da análise comparada à tolerância do processo) foi de **25,87%**;
- %RR (variação da análise comparada à variação do processo) foi de **11,66%**;
- ndc (número de categorias distintas) foi igual a **12**.

Ou seja, o Estudo de R&R está aprovado, sendo considerado aceitável.

Assim, sua tabela de recomendações é ilustrada conforme Tabela 13.

Tabela 13 – Recomendações para o uso do diatest.

RECOMENDAÇÕES									
CARACTERÍSTICA	RECOMENDAÇÃO ESPECÍFICA						SUGESTÃO	RECOMENDAÇÃO ESTATÍSTICA	OBSERVAÇÕES
	0 mm	TOLERÂNCIA							
		H9	H8	H7	H6				
	1-3	0,025	0,014	0,010	0,006	<p>1) Para os casos onde o sistema de medição é aceitável porém trata-se de uma característica-chave ou o sistema de medição é não recomendado, a sugestão é utilizar outro tipo de instrumento de medição, tais como: 3D, calibrador PNP.</p> <p>2) Principalmente para as faixas de transição (ótimo <> aceitável <> não recomendável) uma opção seria trabalhar com limites de processo mais restritos que os limites de especificação.</p> <p>LEGENDA:</p> <ul style="list-style-type: none"> Ótimo Aceitável (exceto característica-chave) Não recomendável 	<p>Apresenta uma ótima discriminação, podendo ser utilizado em gráficos de controle, CEP, etc.</p>	<p>Furo cego</p> <p>1) "Zerar" o instrumento em um anel padrão de medição bem semelhante próxima ao valor da característica a ser medida, evitando assim, erro de linearidade;</p> <p>2) Não efetuar medição sobre o <u>raio de canto no final</u> do furo;</p> <p>3) Não encostar o instrumento no <u>fundo do furo</u> (o anel existente "segura" a peça).</p> 	
	3-6	0,030	0,018	0,012	0,008				
	6-10	0,036	0,022	0,015	0,009				
	10-18	0,043	0,027	0,018	0,011				
	18-30	0,052	0,033	0,021	0,013				
	30-50	0,062	0,039	0,025	0,016				
	50-80	0,074	0,046	0,030	0,019				
	80-120	0,087	0,054	0,035	0,022				
	120-180	0,100	0,063	0,040	0,025				
	180-200	0,115	0,072	0,046	0,029				

4.7. Característica \varnothing interno versus micrômetro interno de três pontas

- corpo-de-prova;
- Característica crítica: 11 H8 mm;
- Tolerância: +0,027 / -0,0;
- N° do desenho: c.d.p.;
- Revisão do desenho: 00;
- Localização: seção C4 / folha 1;
- Instrumento de medição: micrômetro interno de três pontas e anel padrão.

A Figura 66 ilustra o c.d.p. a ser medido e o instrumento de medição manual utilizado.



Figura 66 – Corpo-de-prova, micrômetro interno de 3 pontas e anel padrão.

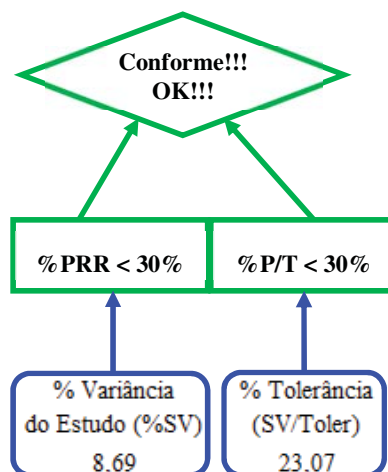
- Resultados numéricos para o micrômetro interno de 03 pontas (Figura 67):

Gage R&R

Informações	Componente de Variância	% Contribuição (da Comp.Var.)
Varição Total da Medição	0,0000011	0,76
Repetibilidade	0,0000006	0,43
Reprodutibilidade	0,0000005	0,33
Avaliadores	0,0000003	0,24
Avaliadores*Peças	0,0000001	0,09
Peça à Peça	0,0001416	99,24
Varição Total	0,0001427	100,00

Tolerância de Processo 0,027

Informações	Desvio-padrão	Variância do Estudo (6 * SD)
Varição Total da Medição	0,0010382	0,006229
Repetibilidade	0,0007817	0,0046904
Reprodutibilidade	0,0006831	0,0040988
Avaliadores	0,0005834	0,0035003
Avaliadores*Peças	0,0003554	0,0021326
Peça à Peça	0,0119009	0,0714056
Varição Total	0,0119461	0,0716767



Número de Categorias Distintas 16 → **ndc ≥ 4, aceitável**

Figura 67 - Resultados numéricos do método cruzado para o micrômetro interno de 3 pontas.

- Resultados gráficos para o micrômetro interno de 03 pontas (Figura 68) :

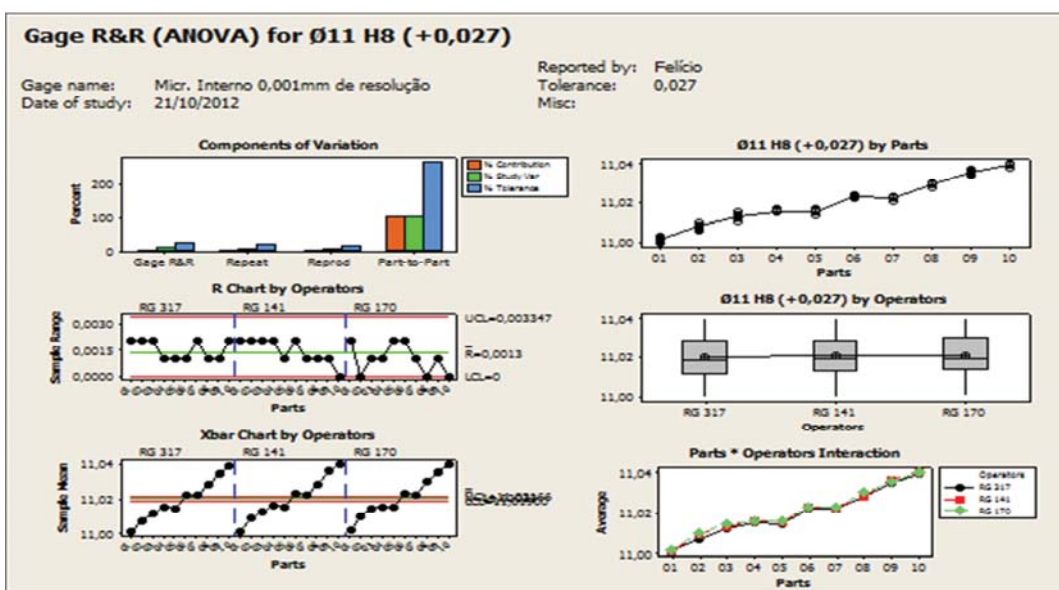

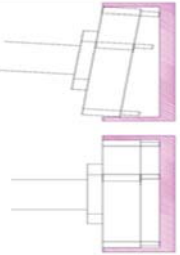
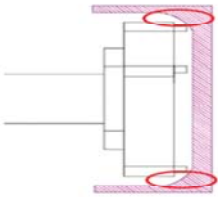



Figura 68 - Resultados gráficos do método cruzado para o micrômetro interno de 3 pontas.

Para o instrumento de medição manual micrômetro interno de 3 pontas, o Estudo de R&R foi considerado aceitável, pois através da análise numérica notamos que a %P/T (variação da análise comparada à tolerância do processo) foi de 23,07% e a %RR (variação da análise comparada à variação do processo) foi de 8,69%, ambos menores do que 30%. Observa-se também que o n.d.c. (número de categorias distintas) foi igual a 16, um valor superior a 4, que é justificado pelo fato da faixa dos limites de controle ser pequena comparada à variação usual do processo.

A seguir, segue a tabela de recomendações (Tabela 14) para o uso do micrômetro interno de 3 pontas.

Tabela 14 – Recomendações para o uso do micrômetro interno de 3 pontas com resolução de 0,001 mm.

RECOMENDAÇÃO ESPECÍFICA		SUGESTÃO	RECOMENDAÇÃO ESTATÍSTICA	OBSERVAÇÕES	
CARACTERÍSTICA 	TOLERÂNCIA H9 H8 H7 H6 0 mm 1-3 0,025 0,014 0,010 0,006 3-6 0,030 0,018 0,012 0,008 6-10 0,036 0,022 0,015 0,009 10-18 0,043 0,027 0,018 0,011 18-30 0,052 0,033 0,021 0,013 30-50 0,062 0,039 0,025 0,016 50-80 0,074 0,046 0,030 0,019 80-120 0,087 0,054 0,035 0,022 120-180 0,100 0,063 0,040 0,025 180-200 0,115 0,072 0,046 0,029		1) Para os casos onde o sistema de medição é acrível porém trata-se de uma característica-chave ou o sistema de medição é não recomendado, a sugestão é utilizar outro tipo de instrumento de medição, tais como: dialtest, ógiva, 3D e calibrador P/NP. 2) Principalmente para as faixas de transição (ótimo <> acrível <> não recomendável) uma opção seria trabalhar com limites de processo mais resitos que os limites de especificação.	Apresenta uma ótima discriminação, podendo ser utilizado em gráficos de controle, CEP, etc.	1) Atenção-se em deixar as pontas de contato bem paralelas às paredes do furo, mantendo assim, o micrometro centrado com a linha de centro do furo;  2) Não efetuar a medição sobre o raio de canto no final do furo;  3) Efetuar a medição em mais de um ponto na profundidade do diâmetro, executando pelo menos duas medições em cada altura do furo. 4) Atenção-se ao medir os vários pontos da profundidade do diâmetro, se o furo não está côncavo.
	LEGENDA:  Ótimo Acrível (exceto característica-chave) Não recomendável				

5. CONCLUSÕES

Através de todas as análises numéricas e gráficas, mais em especial, as numéricas, foi possível criar as listas de recomendações para definições de instrumentos de medição na elaboração de Planos de Controle das peças aeronáuticas usinadas, objetivo principal deste trabalho. É verificado, estudando o desenho como um todo, qual é a melhor opção de medição de cada cota, analisando as tolerâncias necessárias no desenho e a maneira de acesso a aquela dimensão para realização da medição. Assim, o processista deve decidir qual o instrumento mais adequado para a mesma, que será informado no documento.

O Plano de Controle informa a posição da cota no desenho, o valor, a tolerância e o instrumento que será utilizado para realização da medição. Este será utilizado pelos operadores de máquinas, que acompanharão este documento de instruções de medição para realizar a inspeção do produto em processo.

Os resultados do Estudo de R&R em grande parte dos instrumentos de medições manuais analisados neste trabalho foram considerados aceitáveis e/ou recomendáveis, fornecendo valores estatísticos que possibilitaram a elaboração de tabelas de recomendações que estão ilustradas no item 4, as quais correlacionam os campos de tolerâncias para diferentes ajustes e a aceitação do instrumento estudado, classificando-o em ótimo, recomendável e não recomendável.

Assim, estas listas e/ou tabelas de recomendações, a partir deste trabalho, serão considerados documentos de extrema importância e auxílio para a Engenharia de Processos, a qual passa a ter em suas mãos um estudo técnico capaz de identificar qual instrumento é o mais adequado para se obter um controle dimensional mais robusto de uma dada característica (cota) presente no desenho ou projeto de uma peça aeronáutica.

Também foi possível obter o conhecimento de algumas variáveis que influenciam um sistema de medição, as quais estão exemplificadas no campo “observações” de cada lista de recomendações, como alguns cuidados que devem ser tomados durante o uso destes instrumentos.

Outros instrumentos de medições manuais podem ser analisados futuramente, como sugestão para novos trabalhos acadêmicos, tais como micrômetro externo, micrômetro externo de lâmina (medidor de canal em diâmetros externos), altímetros, intertest (medidor de canais em diâmetros internos), ponte + relógio comparador (medidor de profundidade), a fim de se ter uma gama de tabelas de recomendações e também poder criar comparações entre todos estes instrumentos manuais. E como algo ainda mais inovador e atrativo, seria

interessantíssimo avaliar o Estudo de R&R em uma máquina tridimensional, que é instrumento eletrônico, mas que tem uma parcela considerável da interferência humana em seu funcionamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOTHE, DAVIS R. **Measuring Process Capability**. New York: McGraw Hill, ISBN: 0070066523, 1997.

COSTA, A.F.B.; EPPRECHT, E.K.; CARPINETTI, L.C.R. **Controle Estatístico de Qualidade**, São Paulo: Editora Atlas, ISBN: 8522436304, 2004. 334p.

DAIMLER CHRYSLER CORPORATION; FORD MOTOR COMPANY; GENERAL MOTORS CORPORATION. Measurement Systems Analysis. **Reference Manual**. 3. ed. U.S.A.: Automotive Industry Action Group (AIAG), March 2002.

ECKES, GEORGE; Making Six Sigma Last. **Managing the Balance between Cultural and Technical Change**. New York: Wiley. ISBN: 0417415480, 2001.

HARRY, MIKEL AND SCHROEDER, RICHARD; Six Sigma. **The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's top Corporations**. New York: Currency. ISBN: 0385494378, 2000.

MANDEL, JOHN; Repeatability and Reproducibility, **Journal of Quality Technology**, 4, 74-85.

NBR-14.597 – Precisão de Métodos Analíticos – **Determinação de Repetibilidade e Reprodutibilidade de métodos para ensaios de produtos químicos**, 2012.

ROTHER, M.; SHOOK, JOHN. **Learning to see: Value-stream mapping to create value and eliminate muda**. Massachusetts: The Lean Enterprise Institute, 1999.

WHEELER, DONALD J. **Advanced Topics in Statistical Process Control**. Tennessee: SPC Press, 1995.