APLICAÇÃO DA METROLOGIA NA AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DE PEÇAS USINADAS

Resumo: *O presente artigo apresenta a implementação da interdisciplinaridade envolvendo metrologia e processos de fabricação mecânica da Universidade de Fortaleza (UNIFOR) por meio da avaliação dimensional através de medições de peças confeccionadas por um processo de usinagem convencional. Como resultado, calculou-se a incerteza de medição expandida ($U_{95,45\%}$) dos parâmetros diâmetro, circularidade e rugosidade média Ra de peças usinadas através do processo de torneamento (cilíndrico). As medições foram realizadas através de um micrômetro externo, relógio comparador e um rugosímetro portátil.*

Palavras-chave: *Interdisciplinaridade, Metrologia, Processos de fabricação, Avaliação dimensional.*

1. INTRODUÇÃO

Um dos processos mais antigos usados na fabricação de peças mecânicas é a usinagem. Com o aumento da competitividade e a busca incessante da redução de custos e tempos de produção cresce, cada vez mais, a necessidade de ter pleno conhecimento sobre todas as etapas do processo de usinagem, visando torná-lo viável do ponto de vista econômico e operacional.

A medição é a ferramenta através da qual esse conhecimento pode ser alcançado, pois através dela é possível qualificar e quantificar as grandezas físicas envolvidas no processo. Assim, a metrologia, que por definição é a ciência da medição e suas aplicações (INMETRO, 2012), se torna extremamente importante para o desenvolvimento tecnológico da usinagem, uma vez que ela está na essência de qualquer atividade técnica que sustenta ações de melhoria e garantia da qualidade de produtos e serviços. Segundo Donatelli (2006), garantia da qualidade é o conjunto de atividades, suportadas por métodos de processamento de

informação, que têm por objetivo maximizar a qualidade do produto e mantê-la no tempo.

Entretanto, segundo Lima (2006), formar uma cultura metrológica e disseminá-la, tanto numa empresa quanto numa Instituição de Ensino Superior (IES), tem sido, até os dias atuais, um grande desafio no Brasil. Isso porque a metrologia é geralmente formalizada apenas para atender os requisitos de normas de sistemas de gestão da qualidade (ISO 9001 e ISO/TS 16949), sendo focada na calibração periódica dos meios de medição dentro de um contexto puramente operacional. Esse restrito cenário tem assegurado à metrologia o estigma de ser uma atividade dispendiosa, sendo a ela atribuídos aspectos negativos como o aumento dos tempos de produção e geração de gargalos entre processos.

Felizmente, tem-se verificado algumas iniciativas de sucesso buscando reverter esse paradigma, seja através do uso efetivo das informações geradas pelas medições (a metrologia deixa de ser simplesmente uma ferramenta de avaliação passiva, passando a ser um meio para a melhoria contínua), seja através do posicionamento estratégico da função metrologia no organograma da empresa de forma tal que ela tenha maior visibilidade, participe das etapas anteriores à produção propriamente dita e flanqueie a garantia da qualidade com dados confiáveis sobre a qualidade dos produtos e processos (BALDO *et al*., 2004).

Ainda neste contexto, Frota & Finkelstein (2006), afirmam que a metrologia deixa de ser vista simplesmente relacionada com padrões, calibração e controle, passando a atualmente ter seu conceito ampliado tornando-se de vital importância para que as indústrias mantenham um padrão de trabalho garantido por um controle de qualidade e uma racionalização e controle de produção.

Dentre as várias ações que fazem parte das iniciativas supramencionadas, destacam-se aquelas relacionadas à definição e avaliação de processos de medição utilizados no controle da qualidade de peças, como é o caso das usinadas por meio do processo de torneamento cilíndrico.

Portanto, esse artigo tem como objetivo apresentar a implementação da integração entre as disciplinas metrologia e processos de fabricação mecânica (usinagem) da Universidade de Fortaleza (UNIFOR) por meio da avaliação dimensional através de medições de peças confeccionadas por um processo de usinagem convencional.

Ainda nessa linha de raciocínio, Severino (2002) afirma que a interdisciplinaridade é um pressuposto básico de toda a formação teórica do discente onde as disciplinas não se isolam no contexto teórico já que a durante a sua formação será exigido abertura de complementação para áreas afins visando ampliar esse referencial teórico. Assim é de fundamental importância familiarizar-se com o material relativo a essas disciplinas afins e desta forma, não só textos básicos, mas também revistas de áreas complementares à especialização devem ser adquiridas sempre que possível.

De posse da fabricação das peças, desenvolveu-se o cálculo da incerteza de medição expandida ($U_{95,45\%}$) dos parâmetros analisados (diâmetro, circularidade e rugosidade média Ra) de peças usinadas através do processo de torneamento (cilíndrico). As medições destes parâmetros foram realizadas respectivamente por meio de um micrômetro externo (centesimal), relógio comparador (centesimal) e um rugosímetro portátil.

2. DEFINIÇÕES E ASPECTOS TÉCNICOS

Um resultado de medição somente é apresentado de forma completa quando contém tanto o valor atribuído ao mensurando (grandeza que se pretende medir) quanto à incerteza de medição associada a este valor bem como sua respectiva unidade.

2.1. Incerteza de medição

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia – VIM (INMETRO, 2012), a incerteza de medição é um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.

O VIM destaca ainda que:

- o parâmetro pode ser, por exemplo, uma estimativa do desvio-padrão denominando-a de incerteza-padrão;
- a incerteza de medição geralmente engloba muitas componentes. Algumas delas podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo A da incerteza de medição, a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de séries de medições e podem ser caracterizadas por desvios-padrão. As outras componentes, as quais podem ser estimadas por uma avaliação do Tipo B da incerteza de medição, podem também ser caracterizadas por desvios-padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações não estatísticas.

2.2. Erro Aleatório

Componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível. De acordo com Albertazzi e Sousa (2008), é o agente que faz com que medições repetidas levem a distintas indicações (diferentes resultados).

2.3. Desvio-padrão e Incerteza-padrão

O desvio-padrão de uma distribuição normal associada ao erro de medição é usado para caracterizar quantitativamente a intensidade da componente aleatória do mesmo.

Em estatística "população" é o termo utilizado para descrever o número total de elementos que compõem o universo sobre o qual há interesse em analisar. Porém, como na prática não se tem como efetuar infinitas medições repetidas, uma estimativa do desvio-padrão (σ) é obtida através do desvio-padrão da amostra - "s", calculado a partir de um número finito de medições repetidas do mesmo mensurando.

Quando calculada a partir de um conjunto de medições repetidas, a incerteza-padrão corresponde ao desvio-padrão da amostra - "s". Deve ser associado à incerteza-padrão o número de graus de liberdade com que foi estimada. Comumente representado pela letra grega "v", o número de grau de liberdade reflete o nível de segurança com que a estimativa do desvio-padrão é conhecida. Quando a incerteza-padrão é estimada a partir do "s", o número de grau de liberdade corresponde ao número de medições efetuadas menos um (n – 1). No caso especial em que o desvio-padrão é conhecido exatamente, o número de graus de liberdade é considerado infinito (ALBERTAZZI & SOUSA, 2008).

Ainda de acordo com os autores, a incerteza-padrão e o respectivo número de graus de liberdade podem ser calculados, pelas Equações (1) e (2) listadas a seguir:

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(I_i - \bar{I})^2}{n-1}} \tag{1}$$

$$v = n - 1 \tag{2}$$

Onde: u é a incerteza-padrão obtida a partir da amostra e corresponde à estimativa do desvio padrão da amostra - "s"; I_i é a i-ésima indicação (leitura individual); $\bar{I}$ é a média de "n" indicações; n é o número de medições repetidas realizadas e v é o número de graus de liberdade da estimativa da incerteza-padrão.

Quando o mensurando é invariável e determinado pela média de "n" medições repetidas, a incerteza-padrão da média é estimada pela Equação (3). (ALBERTAZZI & SOUSA, 2008).

$$u(\bar{I}) = \frac{u(I)}{\sqrt{n}} \tag{3}$$

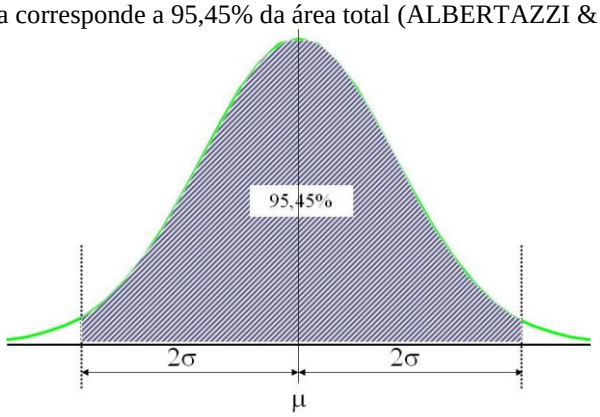
Onde: $u(\bar{I})$ é a incerteza-padrão da média de "n" medições repetidas e $u(I)$ é a incerteza-padrão obtida a partir da amostra.

2.4. Repetibilidade

A repetibilidade corresponde à faixa dentro da qual as indicações do processo de medição são esperadas quando é envolvido um mesmo operador, medindo uma mesma característica do produto e em condições operacionais idênticas (INMETRO, 2012).

De acordo com Albertazzi e Sousa (2008), corresponde à faixa de valores simétrica em torno do valor médio, dentro da qual o erro aleatório de um sistema de medição é esperado com certa probabilidade. Assim, se a probabilidade de 95,45% for adotada, a repetibilidade corresponderá a 2σ, conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1: Estimativa da repetibilidade a partir do desvio-padrão (σ):
a área hachurada corresponde a 95,45% da área total (ALBERTAZZI & SOUSA, 2008).



A confiabilidade da estimativa realizada do desvio-padrão será melhor quanto mais dados forem utilizados para estimá-lo. Como poucos dados (medições / leituras) levam a uma estimativa pobre ou incerta, para compensar a incerteza dessa estimativa, a repetibilidade deve ser calculada multiplicando-se a estimativa do desvio-padrão por um número maior que 2, incorporando assim uma espécie de coeficiente de segurança. Esse número é o fator *t de Student* e a Equação (4) é utilizada para calcular a repetibilidade. (ALBERTAZZI & SOUSA, 2008).

$$Re = \pm\, t \cdot u \tag{4}$$

Onde: o coeficiente *t de Student*, algumas vezes denominado "fator de abrangência" é obtido pela tabela de Distribuição *t de Student* e *u* é a incerteza-padrão.

Embora seja possível delimitar a faixa onde é esperado o erro aleatório, não é possível eliminá-lo por ele ser imprevisível, entretanto é possível reduzir as influências deste quando várias medições repetidas são efetuadas e é calculada a média das indicações obtidas. O erro aleatório da média é menor do que o erro aleatório das indicações individuais (ALBERTAZZI & SOUSA, 2008).

A repetibilidade da média é calculada de acordo com a Equação (5), que em outras palavras, é o produto entre o *t de Student* e a incerteza-padrão da média.

$$Re_{\bar{I}} = \frac{Re}{\sqrt{n}} = \frac{t \cdot u}{\sqrt{n}} \tag{5}$$

Onde: $Re_{\bar{I}}$ é a repetibilidade da média de "*n*" indicações de medições repetidas; *t* é o coeficiente de *Student*; *u* é a incerteza-padrão e *n* é o número de medições repetidas usadas para calcular a média.

2.5. Instrumentos utilizados

Para a avaliação dimensional, utilizou-se um micrômetro externo, relógio comparador e um rugosímetro portátil.

Micrômetro

O micrômetro consiste de um instrumento de dimensão variável que permite leituras com valores de divisão de escala de 0,01 mm ou 0,001 mm. O seu funcionamento assemelha-se ao sistema parafuso e porca. Assim, há uma porca fixa e um parafuso móvel que, ao dar uma volta completa provocará um deslocamento igual ao seu passo, ou seja, a menor divisão de escala principal. O micrômetro utilizado nesta avaliação dimensional foi um centesimal (valor de divisão de escala de 0,01 mm).

Relógio comparador

O relógio comparador é um instrumento de medição que transforma deslocamentos lineares de um fuso móvel por meios mecânicos, em deslocamentos circulares de um ponteiro (cremalheira e pinhão) que se move sobre um mostrador com graduação uniforme circular em 360°. É um instrumento de múltiplas aplicações, porém, sempre acoplado a algum meio de fixação e posicionamento, como mesas de medição, suporte de contra-pontas, dispositivos especiais bem como outros dispositivos.

A medição é realizada por comparação, dotado de uma escala e um ponteiro, ligados por mecanismos diversos a uma ponta de contato. Os mais utilizados possuem valor de divisão de escala de 0,01 mm, como o que foi utilizado neste trabalho.

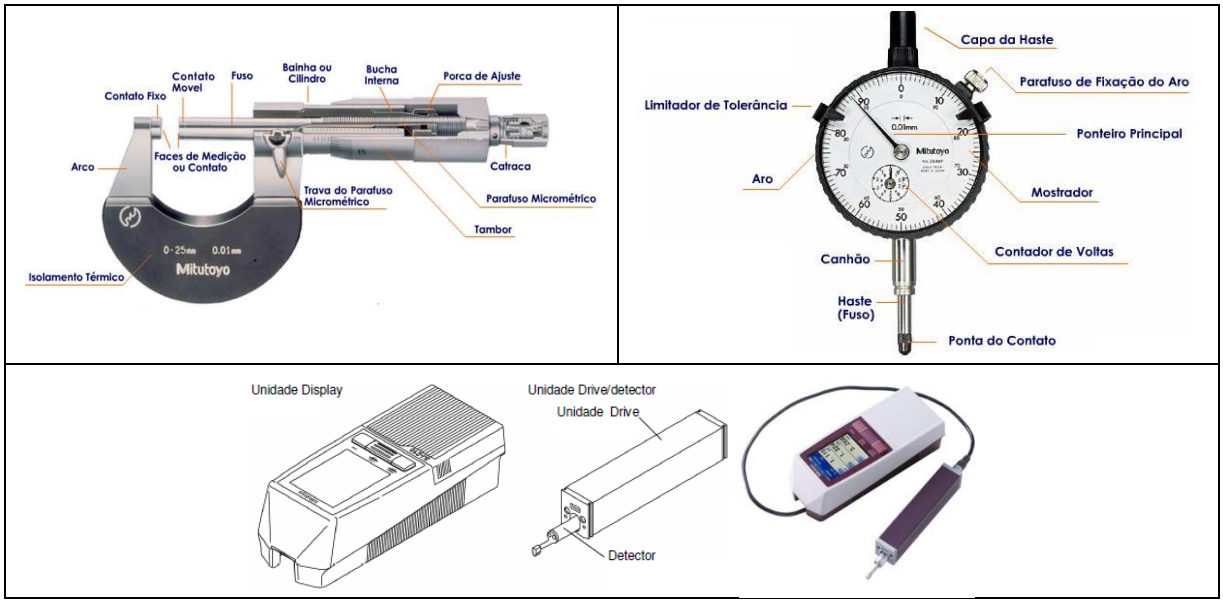
Rugosímetro

O rugosímetro é um aparelho eletrônico amplamente empregado na indústria para fins de verificação de superfície de peças e ferramentas, assegurando um alto padrão de qualidade nas medições. Destina-se à análise dos problemas relacionados à rugosidade, ou seja, ao conjunto de irregularidades (pequenas saliências e reentrâncias) que caracterizam uma superfície. O rugosímetro utilizado nesta avaliação dimensional foi um portátil com um valor de divisão de

escala de 0,001 µm (incremento digital).

Na Figura 2, podem ser observadas as partes que compõe o micrômetro, o relógio comparador e o rugosímetro semelhantes aos utilizados no presente trabalho.

Figura 2: Instrumentos utilizados. Parte superior à esquerda: micrômetro e à direita relógio comparador (MITUTOYO, 2003). Parte inferior: rugosímetro portátil modelo SJ-210 (Adaptado de MITUTOYO, 2017).



Segundo Silva Neto (2012), a análise da rugosidade é importante, uma vez que contribui para verificar se a peça usinada pode apresentar falha durante sua utilização e fornece um parâmetro qualitativo do desempenho da ferramenta.

Ainda de acordo com o autor, em função da importância do estudo e da pesquisa das irregularidades das superfícies usinadas que constituem a rugosidade, ao relatar um resultado dessa grandeza é necessário fornecer uma indicação quantitativa da qualidade desse resultado. Sem essa indicação, os resultados das medições não podem ser comparados, seja entre eles mesmos, seja com valores de referências dados em uma especificação ou em uma norma técnica. A avaliação da rugosidade é feita principalmente com rugosímetros.

Neste trabalho analisaremos a rugosidade média Ra que de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.

2.6. Processo de usinagem utilizado: torneamento cilíndrico

Durante a fabricação de peças com o emprego dos processos de usinagem convencionais, tem-se, por conta da ação da ferramenta de corte, a remoção de material da peça. Tais processos apresentam rugosidade dependente dos parâmetros de usinagem, da geometria da ferramenta de corte dentre outros. Entre estas variáveis que interferem na qualidade de uma peça usinada, destacam-se: o parâmetro avanço e o raio de ponta da ferramenta de corte.

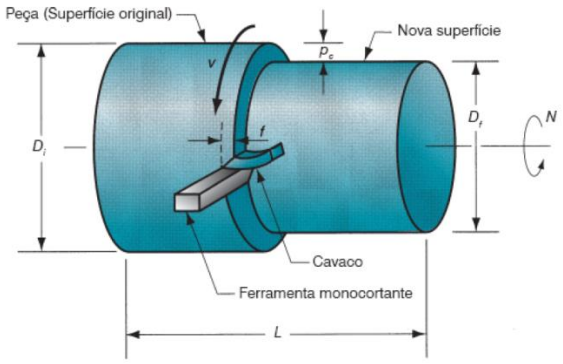
No presente trabalho, as peças a serem medidas foram confeccionadas através do processo de usinagem denominado de torneamento cilíndrico.

O torneamento é um processo de usinagem em que uma ferramenta monocortante remove material da superfície de uma peça que gira. A ferramenta avança linearmente em uma

direção paralela ao eixo de rotação para gerar a geometria cilíndrica. Esse processo é realizado em uma máquina-ferramenta denominada de torno, que fornece a potência necessária para tornear a peça a uma determinada velocidade de rotação e avançar a ferramenta na velocidade e profundidade de corte especificadas.

Na Figura 3, pode ser observada uma ilustração que representa o processo de usinagem utilizado.

Figura 3: Processo de usinagem utilizado: torneamento cilíndrico (GROOVER, 2014).



3. METODOLOGIA

A interdisciplinaridade aconteceu da seguinte forma. Os discentes monitores da disciplina de metrologia juntamente com os docentes da mesma, propuseram que os discentes da disciplina de processos de usinagem (alinhados com os seus docentes) confeccionassem as peças e eles, monitores, realizassem as medições dos parâmetros.

Foram confeccionadas 9 (nove) peças pelo processo de usinagem descrito utilizando 3 (três) tornos. A seguir são listadas as especificações do processo a ser analisado.

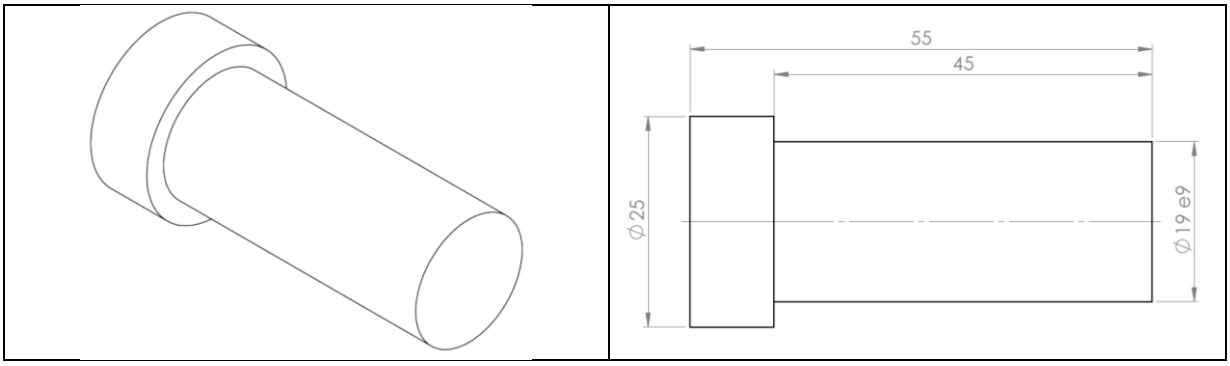
- ✓ Parâmetros de usinagem:
  - velocidade de corte (para o Alumínio) = 60 m/min;
  - rotação = 954,930 rpm (utilizada no torno = 1000 rpm);
  - avanço = 0,04712 mm/rotação (utilizada no torno = 0,074 mm/rotação).
- ✓ Características do equipamento/ferramenta:

* Torno 1 e 2:	* Torno 3:
Raio da ferramenta = 0,8 mm;	Raio da ferramenta = 0,5 mm;
Rugosidade média ideal = 0,086 µm;	Rugosidade média ideal = 0,138 µm;
Rugosidade média real (teórica) = 0,129 µm.	Rugosidade média real (teórica) = 0,207 µm.

- ✓ Dimensões das peças a serem confeccionadas:
  - ∅ 19 e9 mm (dimensão nominal);
  - comprimento = 45 mm.
- ✓ Parâmetros do rugosímetro:
  - comprimento de amostragem (*cut-off*) = 0,8 mm;
  - comprimento de avaliação = 4,0 mm (0,8 mm x 5);
  - parâmetro medido = rugosidade média Ra.

Na Figura 4, podem ser observadas ilustrações que representam às peças confeccionadas e avaliadas.

Figura 3: Peça usinada e avaliada. À esquerda: vista isométrica e à direita: vista frontal.



3.1. Avaliação dimensional

De posse dos parâmetros supracitados, foram realizadas as seguintes medições:

- diâmetro através de um micrômetro externo (valor de divisão de escala 0,01 mm) onde foram realizadas 3 (três) medições em cada peça;
- circularidade através de um relógio comparador (valor de divisão de escala 0,01 mm) onde foram realizadas 9 (nove) medições em cada peça, distribuídas em 3 (três) secções espaçadas em 10 mm cada;
- rugosidade média Ra através de um rugosímetro portátil (incremento digital de 0,001 µm) onde foram realizadas 3 (três) medições em cada peça.

4. RESULTADOS, DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

A partir dos parâmetros estatísticos analisados calculou-se incerteza-padrão da média através da Equação 3, proveniente da repetibilidade natural das medições (Tipo A) considerando-se a média das indicações (medições realizadas). Com esta estimativa, multiplicou-se o valor encontrado pelo respectivo *t de Student*, a partir do número de graus de liberdade encontrado (n – 1 medições), obtendo-se assim, a incerteza de medição expandida (U) com 95,45% de confiabilidade ($U_{95,45\%}$). Ressalta-se que nestes cálculos, não foram levadas em consideração fontes de incertezas provenientes de análises não estatísticas (Tipo B). Os resultados encontram-se apresentados nas Tabelas 1 e 2, listadas a seguir.

Tabela 1: Resultado das medições realizadas do parâmetro diâmetro.

Dimensão nominal (mm)	Média das dimensões medida (mm)	Dimensão máxima (mm)	Dimensão mínima (mm)	Desvio-padrão (mm)	$U_{95,45\%}$ (mm)
Ø 19 e9	Ø 18,943	Ø 18,960	Ø 18,908	0,003	0,008
	Ø 18,928			0,003	0,008
	Ø 18,927			0,003	0,008
	Ø 18,938			0,010	0,027
	Ø 18,945			0,0050	0,013
	Ø 18,937			0,017	0,033
	Ø 18,930			0,000	0,000
	Ø 18,903			0,003	0,008
	Ø 18,917			0,003	0,008

A realização das medições da peça durante o processo de fabricação foi realizada com a

peça numa temperatura considerada elevada, em consequência disso 1 (uma) das peças ao ser medida em ambiente de laboratório, ficou fora das tolerâncias (dimensão máxima e mínima).

Tabela 2: Resultado das medições realizadas do parâmetro circularidade e rugosidade média Ra.

Média das dimensões medidas (mm)	Média da circularidade (mm)	Desvio-padrão da circularidade (mm)	$U_{95,45\%}$ da circularidade (mm)	Média da rugosidade (µm)	Desvio-padrão da rugosidade (µm)	$U_{95,45\%}$ (µm)
Ø 18,943	0,056	0,023	0,0181	0,331	0,002	0,006
Ø 18,928	0,012	0,011	0,0084	0,416	0,030	0,077
Ø 18,927	0,016	0,017	0,0131	0,401	0,055	0,145
Ø 18,938	0,016	0,009	0,0067	0,671	0,024	0,062
Ø 18,945	0,018	0,016	0,0123	0,627	0,075	0,197
Ø 18,937	0,032	0,026	0,0208	0,603	0,029	0,076
Ø 18,930	0,015	0,012	0,0096	0,590	0,081	0,211
Ø 18,903	0,027	0,020	0,0158	0,422	0,019	0,050
Ø 18,917	0,025	0,020	0,0161	0,582	0,024	0,063

Os valores obtidos não estão conforme de acordo com os parâmetros de projeto referenciados acima (valores teóricos), pois existem outros fatores não dimensionados como a vibração do conjunto máquina-ferramenta, ferramenta de corte e bem como da própria peça (deflexão da fixação), especialmente em máquinas-ferramenta antigas como as utilizadas.

Conclui-se que a integração entre as disciplinas agregou muito na formação dos discentes, uma vez que os mesmos vivenciaram na prática uma situação com grande possibilidade de ser aplicada na indústria.

A avaliação dimensional envolvendo tanto tolerâncias dimensionais como geométricas (macrogemétrica: circularidade e microgeométrica: rugosidade) e suas respectivas estimativas de incerteza de medição expandida, desempenham um importante papel no controle da qualidade de peças produzidas garantindo a confiabilidade metrológica de qualquer processo de fabricação.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Diretoria do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade de Fortaleza pela oportunidade de participar do COBENGE 2017.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTAZZI, Armando; SOUSA, André R. de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. 1ª ed. Barueri: Manole, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4287 - Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Setembro de 2002.

BALDO, C. R., DONATELLI, G. D., et al. **Metrology and Manufacturing Process Improvements in a Medium-sized Brazilian Company**, VIII International Symposium on Measurement and Quality Control, Erlangen, Germany, October 2004.

DONATELLI, G. D. **Curso Avançado de Metrologia para Gestores Industriais – A**

Metrologia na Cadeia de Valor da Empresa. Seminário, Fundação CERTI, Florianópolis, 2006.

FROTA, M. N.; FINKELSTEIN L. **Educação em metrologia e instrumentação: demanda qualificada no ensino das engenharias**. Revista de Ensino de Engenharia, v.25, n1, p. 49-65, 2006 – ISSN 0101-5001.

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. Tradução de Anna Carla Araújo. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA - Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM)**. Duque de Caxias – RJ, 2012.

LIMA, C. R. G. **UM ESTUDO COMPARATIVO DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO APLICÁVEIS AO CONTROLE DIMENSIONAL DE SUPERFÍCIES LIVRES EM PEÇAS DE MÉDIO E GRANDE PORTE**. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, FLORIANÓPOLIS, 2006.

MITUTOYO, S. A. **Instrumentos para metrologia dimensional.** 2003. CD-ROM.

MITUTOYO SUL AMERICANA LTDA. Site disponível em:<http://www.mitutoyo.com.br>. Acesso em: 15 jun. 2017.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trablaho científico**. São Paulo – SP: Cortez, 2002.

SILVA NETO, J. C. **Metrologia e controle dimensional, conceitos, normas e aplicações**. Rio de Janeiro – RJ: Elsevier, 2012.

APPLICATION OF METROLOGY IN THE DIMENSIONAL EVALUATION OF USINATED PARTS

Abstract: *The present article shows the implementation of interdisciplinarity involving metrology and mechanical manufacturing processes at University of Fortaleza (UNIFOR) by means of dimensional evaluation through measurements of parts made by a conventional machining process. As a result, it is evaluated the expanded measurement uncertainty ($U_{95,45\%}$) of the parameters diameter, the circularity and the average roughness Ra of machined parts through the (cylindrical) turning process. The measurements were performed using an external micrometer, dial comparator and a portable rugosimeter.*

Key-words: *Interdisciplinarity, Metrology, Manufacturing processes, Dimensional evaluation.*