

INTERDISCIPLINARIDADE ENTRE METROLOGIA E USINAGEM: UMA ABORDAGEM PRÁTICA

Clídio R. G. de Lima - clidio.lima@unifor.br
Universidade de Fortaleza - UNIFOR
Av. Washington Soares, 1321 - Edson Queiroz
CEP 60811-905 - Fortaleza - CE

Filipe B. Veras - filipeb.veras@unifor.br
Universidade de Fortaleza - UNIFOR
Av. Washington Soares, 1321 - Edson Queiroz
CEP 60811-905 - Fortaleza - CE

Kamila P. Lins - kamilalins@unifor.br
Universidade de Fortaleza - UNIFOR
Av. Washington Soares, 1321 - Edson Queiroz
CEP 60811-905 - Fortaleza - CE

Mauro da J. Cabral - mauroj.cabral@unifor.br
Universidade de Fortaleza - UNIFOR
Av. Washington Soares, 1321 - Edson Queiroz
CEP 60811-905 - Fortaleza - CE

Nelson B. Ferreira Júnior - nelson.ferreira@unifor.br
Universidade de Fortaleza - UNIFOR
Av. Washington Soares, 1321 - Edson Queiroz
CEP 60811-905 - Fortaleza - CE

Resumo: Este artigo aborda a interdisciplinaridade envolvendo alunos dos cursos de Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção da Universidade de Fortaleza (UNIFOR) das disciplinas metrologia e processos de fabricação mecânica por meio da avaliação dimensional e geométrica através de medições de peças confeccionadas por um processo de usinagem convencional. Como resultado, calculou-se a incerteza de medição expandida ($U_{95,45\%}$) de todos os parâmetros dimensionais e geométricos de peças usinadas através do processo de torneamento cilíndrico. As medições foram realizadas através de um paquímetro quadrimensional, micrômetro externo, relógio comparador e um rugosímetro portátil.

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

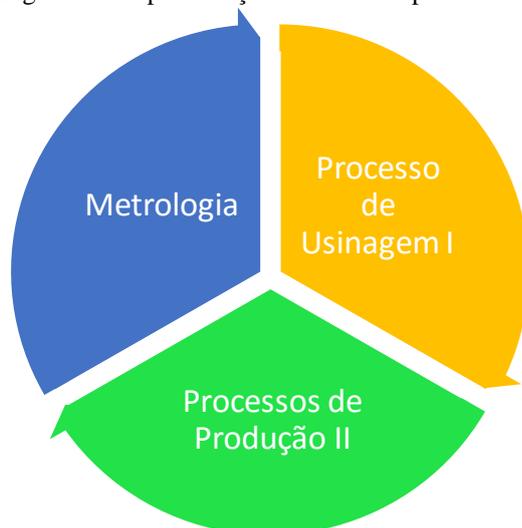
1 INTRODUÇÃO

O envolvimento de alunos de cursos e disciplinas distintos evidencia cada vez mais a relevância em se ter ambientes acadêmicos que promovam a integração de equipes multidisciplinares.

Na Universidade de Fortaleza (UNIFOR) uma dessas integrações envolve alunos dos cursos de Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção das disciplinas de processo de usinagem I e processos de produção II, respectivamente e de metrologia, comum aos dois cursos.

Cada equipe pode ser formada por até quatro alunos sendo dois alunos matriculados em metrologia em turmas distintas, um em processo de usinagem I e um processos de produção II, evidenciando um aluno em cada turma promovendo a integração entre os cursos e as disciplinas. Vide Figura 1.

Figura 1 – Representação da interdisciplinaridade.



Fonte: Elaborado pelos autores.

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 envolvidas num 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, uma vez que, por meio 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.

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 supracitadas por meio da avaliação dimensional e geométrica 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.

2 ASPECTOS TÉCNICOS E DEFINIÇÕES

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

O resultado da medição não é um número, mas sim uma faixa de valores atribuídas ao mensurando sendo composto de duas parcelas: o resultado-base (RB) e a incerteza de medição (U). O resultado-base (RB) é o valor central da faixa e que acredita mais se aproxima do valor verdadeiro do mensurando sendo calculado a partir da indicação ou da média de várias indicações. Por sua vez, a incerteza de medição (U) está relacionada à dúvida presente no resultado da medição e corresponde o tamanho da faixa simétrica e centrada em torno do resultado-base, no qual, para uma dada probabilidade de abrangência se espera encontrar o valor verdadeiro do mensurando e é calculada a partir de vários componentes da incerteza, normalmente por métodos estatísticos.

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.

Erro Aleatório: componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível. De acordo com Albertazzi e Sousa (2018), é o agente que faz com que medições repetidas levem a distintas indicações (diferentes resultados).

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.

População: em estatística 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).

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:

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

$$v = n - 1 \quad (2)$$

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.

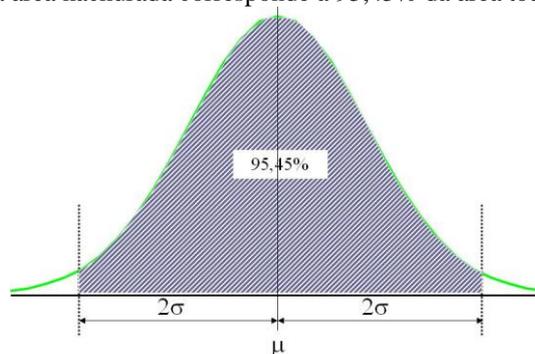
Quando o mensurando é invariável e determinado pela média de "n" medições repetidas, a incerteza-padrão da média é estimada pela Equação (3). (ALBERTAZZI & SOUSA, 2018).

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

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.

Precisão (de medição): de acordo com Albertazzi e Sousa (2018), corresponde à faixa de valores simétrica em torno do valor médio, dentro da qual o erro aleatório de um sistema de medição é esperado para certa probabilidade. Assim, se a probabilidade de 95,45% for adotada, a precisão de medição corresponderá a 2σ , conforme pode ser observado na Figura 2.

Figura 2: Estimativa da precisão de medição a partir do desvio-padrão (σ): a área hachurada corresponde a 95,45% da área total.



Fonte: ALBERTAZZI & SOUSA, 2018.

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 precisão de medição 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 precisão de medição. (ALBERTAZZI & SOUSA, 2018).

$$P = \pm t \cdot u \quad (4)$$

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, 2018).

A precisão (de medição) 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.

$$P_{\bar{I}} = \frac{P}{\sqrt{n}} = \frac{t \cdot u}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

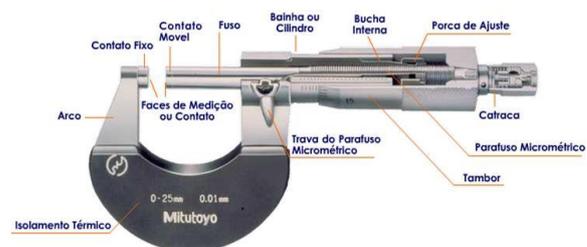
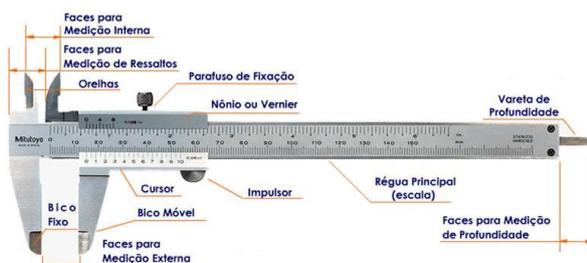
Onde: $P_{\bar{I}}$ é a precisão (de medição) da média de “*n*” indicações de medições repetidas; *t* é o coeficiente de *Student*; *u* é a incerteza-padrão e *n* é o número de medições repetidas usadas para calcular a média.

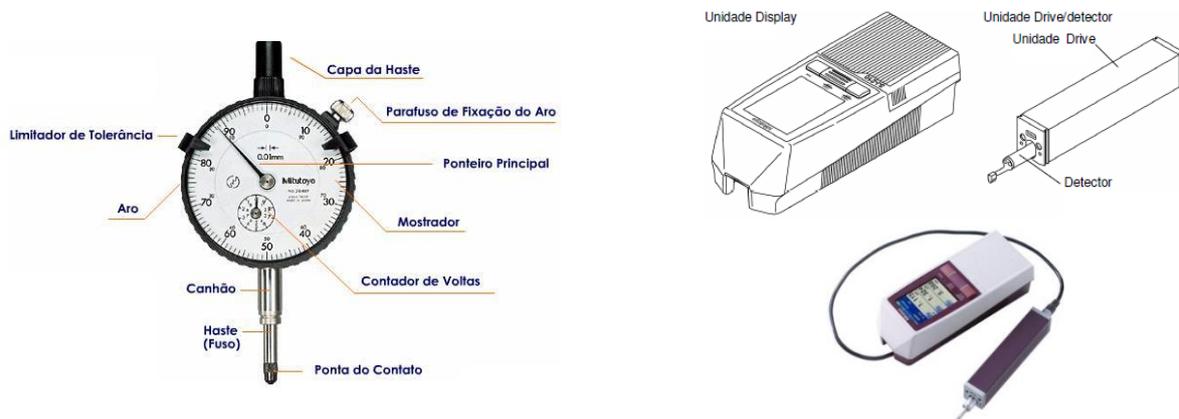
2.1 Instrumentos utilizados

Para a avaliação dimensional, utilizou-se um paquímetro quadrimensional, micrômetro externo centesimal, relógio comparador e um rugosímetro portátil. Vide Figura 3.

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. A avaliação da rugosidade é feita principalmente com rugosímetros.

Figura 3: Instrumentos utilizados: paquímetro, micrômetro, relógio comparador e rugosímetro portátil modelo SJ-210.





Fonte: MITUTOYO, 2003 e adaptado de MITUTOYO, 2018.

Processo de usinagem utilizado: torneamento cilíndrico

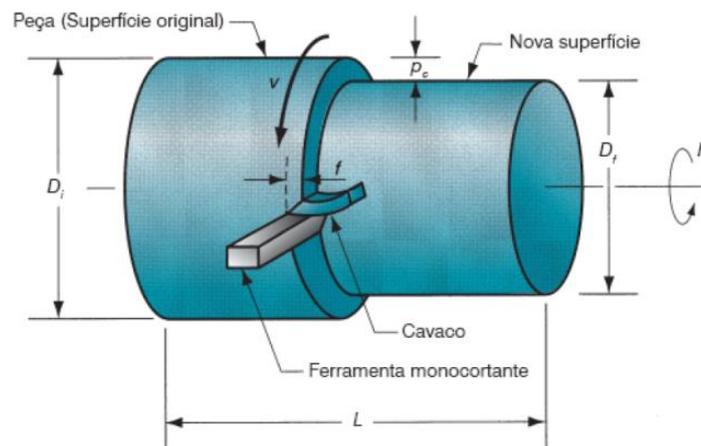
Durante a fabricação de peças com o emprego dos processos de usinagem convencionais, tem-se, por conta da ação da ferramenta de corte, a remoção de material da peça. Tais processos apresentam rugosidade dependente dos parâmetros de usinagem, da geometria da ferramenta de corte dentre outros. Entre estas 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 torno, que fornece a potência necessária para torner a peça a uma determinada velocidade angular (rpm) e avançar a ferramenta na velocidade linear (mm/min) com profundidade de corte especificadas.

Na Figura 4, pode ser observada uma ilustração que representa o processo de usinagem utilizado.

Figura 4: Processo de usinagem utilizado: torneamento cilíndrico.



Fonte: GROOVER, 2014.

3 METODOLOGIA

Fundamentado na menor divisão do anel graduado dos tornos disponíveis, que é de 0,05 mm no diâmetro, foram escolhidas as tolerâncias a seguir (Tabela 1), baseado na necessidade de desenvolver a habilidade dos alunos de utilizar a resolução do processo de fabricação do corpo de prova.

Tabela 1: Parâmetros qualidade de trabalho e diâmetro (unidades em milímetros).

Qualidade/Diâmetro	10	15	20	35
IT 8	0,022	0,027	0,033	0,039
IT 9	0,036	0,043	0,052	0,062
IT 10	0,058	0,070	0,084	0,100
IT 11	0,090	0,110	0,130	0,160

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em seguida, foram realizadas 68 combinações (vide exemplos de algumas destas, no Tabela 2), além de definidas a rugosidade, o furo-base, a folga máxima, a interferência máxima e o diâmetro das peças.

Tabela 2: Exemplos de combinações de ajustes utilizados.

10H10m10	10H10n10	10H10p10	10H10r10	10H10s10
15H10m10	15H10s10	15H10p10	15H10r10	15H10s10
20H10m10	20H10s10	20H10p10	20H10r10	20H10s10
35H10m10	35H10s10	35H10p10	35H10r10	35H10s10

Fonte: Elaborado pelos autores.

De posse destas definições, os docentes reúnem-se com os discentes e explicam a metodologia do projeto. Nesta reunião são apresentados que os alunos deverão:

- ✓ encontrar a designação do eixo (conforme especificado no projeto);
- ✓ encontrar as dimensões mínimas e máximas do ajuste ou acoplamento (eixo e furo);
- ✓ calcular a rotação da árvore para usinagem de desbaste e acabamento do produto a ser fabricado, considerando que o material da peça é latão e sua velocidade de corte é de 40 m/min e 50 m/min, respectivamente;
- ✓ definir as melhores rotações (rpm) para as operações de desbaste e acabamento;
- ✓ calcular e definir o melhor avanço (mm/rot) para acabamento em função da ferramenta utilizada;
- ✓ calcular rugosidade ideal e real (baseada no avanço definido);
- ✓ avaliar e escolher o instrumento de medição mais apropriado para realização da inspeção do processo;
- ✓ medir os parâmetros dimensionais (diâmetro maior e menor, comprimento maior e menor) e geométricos (perpendicularidade, circularidade, rugosidade média Ra e rugosidade máxima Rt) e calcular a média e a precisão (de medição) da média dos mesmos;
- ✓ expressar corretamente o resultado de medição do diâmetro menor (eixo);
- ✓ identificar os limites de controle de qualidade do diâmetro menor (eixo);
- ✓ esboçar num diagrama de *Ishikawa* o processo de fabricação e o processo de medição.

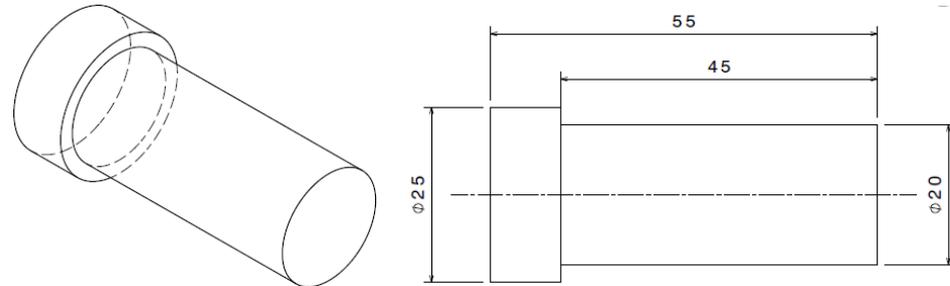
Em seguida os alunos formam suas equipes onde cada uma delas (aproximadamente 50) recebe um relatório personalizado com uma das possibilidades (combinações) apresentadas.

A princípio os alunos de metrologia tomam à frente realizando os cálculos para encontrar os valores dimensionais do eixo e em seguida os alunos de usinagem realizam os cálculos dos parâmetros de usinagem. Posteriormente, todos os integrantes da equipe se reúnem e fabricam a peça. Ao término da fabricação, em ambiente de laboratório, são efetuadas as medições de

todos os parâmetros solicitados.

Na Figura 5, pode ser observada um desenho de uma das possíveis combinações das peças confeccionadas e avaliadas.

Figura 5: Exemplo de uma combinação de uma peça usinada e avaliada.
À esquerda: vista isométrica e à direita: vista frontal.



Fonte: Elaborado pelos autores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos parâmetros estatísticos analisados, calculou-se a incerteza-padrão da média através da Equação 3, proveniente da precisão 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 Tabela 3, listadas a seguir.

Tabela 3: Resultado das medições realizadas do parâmetro diâmetro menor.

Dimensão nominal (mm)	Média do diâmetro menor (mm)	Dimensão máxima (mm)	Dimensão mínima (mm)	Desvio-padrão (mm)	P/\sqrt{n} (mm)	Instrumento utilizado
Ø 20 p9	20,053	Ø 20,074	Ø 20,022	0,020	0,051	Micrômetro

Fonte: Elaborado pelos autores.

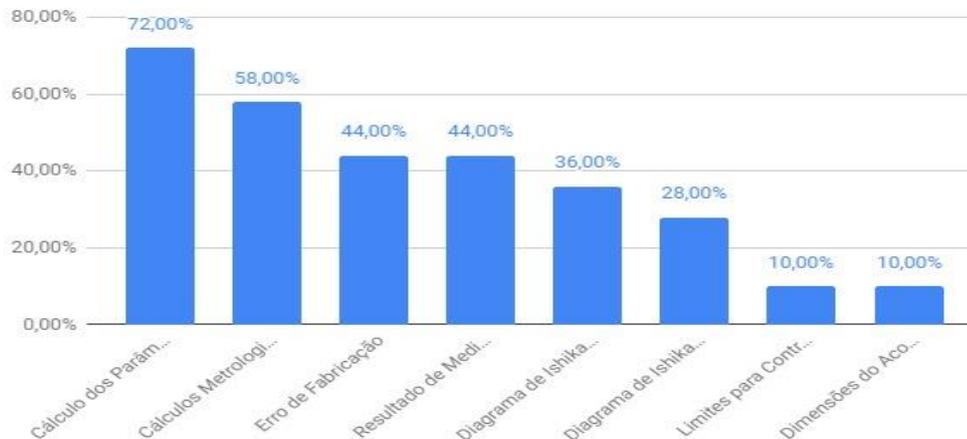
Em seguida, replicou-se esse raciocínio para os parâmetros dimensionais (diâmetro maior, comprimento maior e menor) e geométricos (perpendicularidade, circularidade, rugosidade média R_a e rugosidade máxima R_t).

Das 50 equipes participantes observou-se que:

- ✓ 72% destas cometeram erros relacionados aos parâmetros cinemáticos de usinagem (rotação e avanço);
- ✓ 58% erraram cálculos metrológicos (média, desvio-padrão e conseqüentemente a precisão das medições);
- ✓ 44% erraram a fabricação da peça, ou seja, a peça não atendeu às especificações de projeto;
- ✓ 44% erraram a medição do diâmetro do eixo fabricado; acredita-se que este percentual se deva a erros de leitura com o micrômetro;
- ✓ nas construções dos diagramas de *Ishikawa*, 36% das equipes cometeram erros relacionados ao processo de medição e 28% relacionados ao processo de fabricação;

- ✓ 10% erraram os limites para o controle da qualidade, e
- ✓ 10% erraram os cálculos para dimensionar o ajuste ou acoplamento.

Gráfico 1: Principais erros encontrados no projeto integrador.



Fonte: Elaborado pelos autores.

5 CONCLUSÕES

Os conceitos abordados no projeto desempenham um importante papel no controle da qualidade de peças produzidas garantindo a confiabilidade metrologia de qualquer processo de fabricação.

Através dos erros encontrados, pode-se evidenciar que conceitos básicos utilizados nas disciplinas envolvidas neste projeto (processo de usinagem I e processos de produção II e metrologia) foram empregados de forma incorreta.

De posse dos erros encontrados por equipe, os docentes puderam evidenciar os aspectos que poderiam ser melhor trabalhados em semestres posteriores adotando estratégias preliminares como apresentação dos cálculos antes da fabricação.

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: junção de processos de fabricação com atividades relacionadas ao controle de qualidade dos processos de produção por meio da metrologia.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Edson Queiroz e ao Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade de Fortaleza (UNIFOR) pelo apoio na realização deste projeto.

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. 2ª ed. Barueri: Manole, 2018.

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: 02 abr. 2018.

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

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

INTERDISCIPLINARITY BETWEEN METROLOGY AND MACHINING: A PRACTICAL APPROACH

Abstract: *This article deals with the interdisciplinarity involving students of Mechanical Engineering and Production Engineering courses of the University of Fortaleza (UNIFOR) the disciplines metrology and mechanical manufacturing processes through dimensional and geometric evaluation measurements pieces made by a conventional machining process . As a result, it was calculated measurement uncertainty expanded ($U_{95,45\%}$) all dimensional and geometric parameters of the pieces through the cylindrical machined process was calculated. The measurements were made through a vernier calliper, outside micrometer, dial indicator and portable surface roughness.*

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