

# ANÁLISE DAS FONTES DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Lisiane Trevisan, Vinicius de Freitas Paz, Daniel Antonio Kapper Fabricio\*

## Resumo

Os conceitos utilizados em metrologia fazem parte do processo produtivo de empresas metalúrgicas, considerando a globalização do mercado mundial. A interpretação dos conceitos metroológicos e sua aplicação nas tomadas de decisão ainda é um desafio para a indústria, principalmente para o cálculo da incerteza de medição. Indústrias da área de fundição requerem mão-de-obra qualificada tanto em relação ao processo produtivo e de engenharia, bem como em metrologia, destacando a interdisciplinaridade dos conceitos trabalhados nos cursos técnicos e de bacharelado. Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho é realizar uma breve revisão bibliográfica de publicações realizadas com o uso/aplicação da incerteza de medição dentro do processo produtivo de fundição, independentemente do material produzido. Os resultados mostram que há um vasto campo de potencial pesquisa na área, o qual relaciona os valores de incerteza de medição e componentes fundidos.

## Palavras-chave

Fundição; Metrologia; Incerteza de Medição.

# ANALYSIS OF MEASUREMENT UNCERTAINTY SOURCES IN THE CASTING PROCESS

## Abstract

The concepts used in metrology are increasingly part of the productive process of metallurgical companies, considering the globalization of the world market. The interpretation of metrological concepts and their application in decision-making is still a challenge for the industry, especially for the measurement uncertainty calculation. Industries in the casting area are in great need of skilled labor both in relation to the productive process and engineering, as well as in metrology, highlighting the interdisciplinary of the concepts studied in the technical or baccalaureate courses. Therefore, the main objective of this work is to perform a brief literature review of publications made using the value of uncertainty of measurement within the production process of foundries. The results show that there is a potential research in the field, to which it relates the values of measurement uncertainty and fused components.

## Keywords

Casting, Metrology, Measurement uncertainty.

## I. INTRODUÇÃO

O mercado internacional de componentes mecânicos atravessa a etapa de globalização tanto para o fornecimento de matéria-prima quanto de componentes finalizados. Assim, o comércio internacional exige a normalização de padrões de qualidade de aceitação global, aos quais são representados pelas normas de qualidade ISO 9000, BS 8800 e até normas laboratoriais como a ISO/IEC:17025 [1] para que as empresas sejam competitivas entre si [2].

Para participar deste mercado globalizado, as indústrias precisam adequar seu processo produtivo a exigências de mercado: preços competitivos a nível mundial, excelente qualidade de produtos, menor tempo de entrega, produção de

menos itens através de diferentes processos e, principalmente, inovação dos seus produtos [3].

Assim, com base nestas informações, a qualidade do produto final passa necessariamente pelo investimento em qualidade, mas também pela estruturação e conhecimento de uma base metroológica de todo o processo produtivo [4].

Pelo Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), a metrologia é descrita como a ciência das medições, sendo que a mesma engloba todos os aspectos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação [5].

A disciplina de Metrologia é trabalhada em grande maioria dos cursos técnicos e de bacharelado em engenharia mecânica dos cursos localizados no Brasil, no entanto, é um assunto de

grande complexidade quando questionado aos alunos e profissionais formados na área metal-mecânica.

Há também problemas diários no uso da metrologia no processo produtivo [3]:

- Conceitos metrológicos utilizados pelos colaboradores da indústria e profissionais formados na área são muitas vezes mal interpretados, assim como existem traduções equivocadas de termos utilizados em projetos internacionais;

- A mão-de-obra formada na área é de grande custo operacional, devido à falta de interesse dos discentes pela área, restringindo o número de técnicos especializados na área, restringindo a grandes indústrias laboratórios metrológicos internos ao processo produtivo;

- A dificuldade na interpretação dos resultados de processos metrológicos de calibração e verificação, certificados de calibração transforma a metrologia em um problema em grande parte das empresas.

Em relação à fundição, existem muitas variáveis durante o processo de um componente fundido, como por exemplo: a qualidade da matéria-prima metálica, as dimensões do modelo, sistema de alimentação, tipo de moldação adotada, resultados relacionados aos ensaios de areia, parâmetros do processo de fusão, além de parâmetros físico-químicos da liga metálica [6].

Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho é realizar uma revisão bibliográfica sobre as diferentes fontes de incerteza de medição que alteram a qualidade final do fundido.

Além da dificuldade da interpretação dos resultados obtidos em processos metrológicos internos e externos realizados, como calibração de instrumentos, auditorias, há troca e/ou equívoco por parte dos engenheiros que realizam os projetos dos fundidos com dois conceitos fundamentais em fundição: tolerância e incerteza de medição.

O termo tolerância é relacionado à variação permitida das dimensões da peça. Pode ser descrita pela tolerância geométrica e tolerâncias gerais, e pode estar relacionada ao paralelismo, planicidade e ou inclinação. Já a incerteza de medição, segundo VIM [5] é o parâmetro não-negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.

Teoricamente, os conceitos são distintos, mas na prática industrial há grande equívoco entre os mesmos. Resumidamente, a diferença está na aplicação dos mesmos: enquanto a tolerância da peça é descrita pelo intervalo de medidas em que o componente será aprovado, conforme a especificação do produto, a incerteza de medição está associada ao conjunto de resultados de medição obtidos a partir de um sistema de medição, e está relacionado a um nível de confiança.

Em processos de fundição, há grande número de variáveis no processo produtivo desde o Projeto até a produção da peça final, no qual são necessárias medições e estas medições influenciam de forma decisiva a qualidade do produto final. Cita-se algumas etapas:

- Uma das etapas mais importantes no processo de construção de um fundido é a etapa dimensional: construção do modelo com tolerâncias. Construir um modelo com dimensões adequadas ao projeto com tolerâncias e suas

medidas realizadas com parâmetro de incerteza de medição dentro do esperado [7].

- Descrição da variável temperatura: a medição de temperatura pode ser tanto do metal fundido, temperatura do molde (areia, casca cerâmica ou coquilha). Os termopares utilizados possuem diferentes incertezas de medição e resolução.

- Além da etapa relacionada ao dimensional do modelo, existem as fontes de erro relacionadas ao molde. Para os processos de areia verde e microfusão, o molde é construído com base nas dimensões do modelo, o que há uma cadeia de erros acarretados com base nas dimensões do modelo. Já para o processo de molde permanente, em que o molde é construído com base nas dimensões descritas no projeto, não há fonte de incerteza de medição relacionada ao modelo.

### 1.1 Erro e Incerteza de Medição

Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) [5], erro de medição representa a diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência. Todo o resultado de uma medição é apenas uma estimativa do valor verdadeiro, devido à influência de diversas fontes de incerteza. Nesse contexto, a incerteza de medição pode ser definida como um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas [5]. A incerteza de medição é um parâmetro estatístico que descreve as possíveis flutuações do resultado de uma medida.

Dessa forma, a incerteza é fundamental em diversas situações, tais como [5]:

- Na calibração de equipamentos, instrumentos e padrões, para verificar se os mesmos se encontram dentro das tolerâncias definidas;

- Na área de ensaios, para verificar se o resultado do ensaio pode ser aprovado ou não;

- No controle de riscos associados à tomada de decisão de aprovar ou rejeitar uma amostra;

- Como um diferencial competitivo, pois o cliente tende a buscar aquele laboratório que tenha melhor qualidade na sua medida e, portanto, a menor incerteza.

## II. MATERIAL E MÉTODOS

Para o levantamento das publicações indicadas foi realizada uma breve revisão bibliográfica com base em palavras-chave, tais como “*measurement uncertainty*”, “*casting*” e/ou “*foundry*”.

Foram consideradas publicações em idioma inglês e somente artigos publicados em revistas técnicas sobre o assunto em questão. Artigos publicados em eventos, assim como livros, normas técnicas e outros tipos de texto foram desconsiderados.

Na leitura das publicações, buscou-se informações referentes às fontes de incerteza consideradas e o tipo de aplicação.

### III. RESULTADOS

Os trabalhos publicados em diferentes bases de dados demonstram que os valores de incerteza de medição são determinados para diferentes fatores, o que possibilita compreender que os valores de incerteza de medição são fundamentais e compõem o processo produtivo como um todo.

Solonicki [8], ao estudar os moldes metálicos, determinou a incerteza de medição pelo método GUM para a condutividade térmica dos moldes estudados. Para isso, considerou duas fontes de incerteza para o cálculo: desvio-padrão associado as medidas e também o erro herdado relacionado aos instrumentos utilizados. Com esse trabalho, conseguiu determinar que o tipo e a granulometria da areia afetam no valor do coeficiente de transferência de calor.

Em relação à incerteza do dimensional do componente fundido, vários autores relatam o uso de instrumentos não utilizados comumente pela indústria metalúrgica. Por exemplo, Cuypers et al. [9] utilizaram um sistema óptico para a determinação das medidas e assim estimar a incerteza das medições. Chiffre et al. [10] usaram um equipamento que realiza tomografia computadorizada para estimar as medidas do componente fundido. Já Rejc et al. [11] utilizaram um sensor de deslocamento a laser para estimativa das dimensões do modelo.

O valor da incerteza de medição também foi utilizado como parâmetro para comparação entre dois distintos processos: *Replicast CS × Investment Casting*, onde diferentes moldes com materiais utilizados na sua fabricação têm dimensional dos seus produtos fundidos comparados através do uso de uma máquina tridimensional para minimização dos valores da incerteza de medição relacionados ao dimensional da peça [12].

Além da comparação entre diferentes processos, a incerteza de medição pode ser utilizada para o desenvolvimento de materiais fundidos, como por exemplo, a medição da incerteza de medição de uma porosidade de um fundido. Taylor [13] mostra em seu trabalho o cálculo da incerteza de medição de porosidade com uso do princípio de Arquimedes, para isso ele usa do método GUM com a demonstração dos valores dos coeficientes de sensibilidade utilizados no cálculo, o que exige o conhecimento prévio de matemática a nível superior.

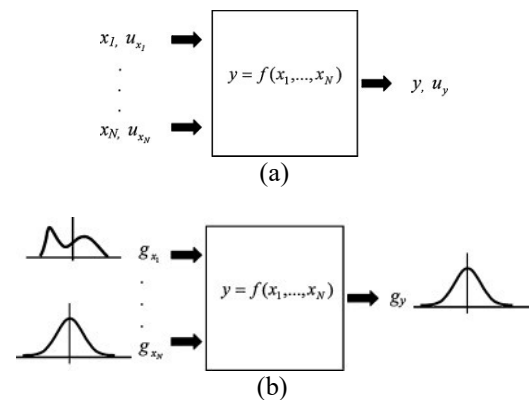
Além disso, já está disponível o cálculo da incerteza de medição através de um processo realizado por transistores onde são considerados dados de entrada e dados de saída, considerando a propagação de incerteza dentro do processo produtivo. Resumidamente, estes transistores quantificam diferenças observadas entre modelos através do processo de verificação durante o processo produtivo [14].

Outras formas de determinar a incerteza de medição considerando a medida tridimensional (3D) e bidimensional (2D) de partículas de liga fundida em Al-Si. Para isso foram utilizadas medições realizadas por microtomografia e assim estudar a sua influência destas partículas na microestrutura do fundido produzido para a indústria automobilística [15].

Para o cálculo da incerteza de medição é possível realizar com o uso de diferentes métodos matemáticos para a determinação do seu valor. O método GUM é um dos métodos

mais utilizados, este método considera a influência de cada fonte de incerteza através do cálculo dos coeficientes de sensibilidade. Já o método de Monte Carlo considera a distribuição de probabilidade de cada fonte de incerteza e sua função matemática representativa do mensurando. Além destes métodos matemáticos existem outros métodos, como o método heurístico, método de Kragten, variáveis difusas, entre outros.

A Figura 1 ilustra a diferença de abordagem de cálculo de incerteza entre o GUM (baseado na propagação de incertezas) e o método de Monte Carlo (baseado na propagação de distribuições).



**Fig. 1.** (a) Abordagem GUM; (b) Abordagem de Monte Carlo. Fonte: [16].

David et al. [17] dividiram seu trabalho em duas partes: primeira parte utilizou o Método Heurístico para identificar o tipo de defeito presente no fundido. A segunda parte usa Lógica Fuzzy contendo a relação entre os conceitos e defeitos gerados. O autor indica que as diferenças entre os métodos se dão pelo modo de aquisição, natureza dos dados e seu conhecimento/relação entre os parâmetros. Ressalta-se que estes métodos matemáticos são utilizados para o cálculo da incerteza de medição de processos/produtos e mesmo assim foram adaptados para determinar a relação entre parâmetros de processo e defeitos gerados no processo produtivo.

### IV. CONCLUSÕES

A incerteza de medição é um parâmetro fundamental no desenvolvimento de projetos e na adequação/produção de fundidos produzidos por qualquer processo de fundição mundial. Mesmo assim, observou-se que a sua aplicação é muitas vezes simplificada, ou sua aplicação é realizada através do Método GUM, o que representa a dificuldade na aplicação de conceitos relacionados à incerteza de medição. O método GUM é o método matemático mais utilizado no cálculo da incerteza de medição.

Este trabalho mostrou que há uma grande possibilidade de projetos e/ou publicações relacionado a aplicação da incerteza de medição em diferentes variáveis do processo de fundição. A incerteza de medição pode estar relacionada a vários parâmetros, desde o dimensional do modelo, molde, até parâmetros relacionados ao material metálico, conforme mostrado neste trabalho.

Além da aplicação dos conceitos relacionados ao conceito de incerteza de medição, ainda é possível realizar estudos de caso com os mesmos fatores, mas com métodos matemáticos distintos para o cálculo de incerteza de medição, o que não foi observado na revisão bibliográfica apresentada neste trabalho. Com isso, identifica-se também um grande campo de pesquisa na área a ser realizada em trabalhos futuros.

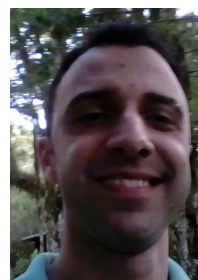
A pesquisa realizada não exclui trabalhos publicados em outras bases de dados e ou publicados em outras línguas. Além disso, a escolha das palavras-chaves foi realizada a partir do objetivo do trabalho, sendo que o uso de outras palavras-chave ou outras bases de dados poderia eventualmente ampliar a relação de trabalhos publicados na área.

## V. BIBLIOGRAFIA

- [1] ABNT NBR ISO/IEC 17025. Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- [2] Silva, E. A.; Campos, R. A Importância da metrologia na gestão empresarial e na competitividade do país. Universidade do Norte Fluminense, 2014.
- [3] Porter, M. Competição. Rio de Janeiro: Campus, 2009.
- [4] Campos, V. C. TQC - Controle de Qualidade Total no estilo japonês. 9ª Edição. Falconi, 2014.
- [5] INMETRO. Vocabulário Internacional de Metrologia. Rio de Janeiro: INMETRO, 3 ed., 2012.
- [6] Baldam, R. L.; Vieira, E. A. Fundição - Tecnologias e técnicas correlatas. Editora Érica. 1ª edição. 2013.
- [7] Lima, J. A. Gestão em empresa familiar de fundição: Obstáculos e estímulos a profissionalização. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Fundação Dom Cabral, Belo Horizonte, 2004.
- [8] Solonicki, G.; Budi, I.; Ciglar, D. Determination of thermal conductivity in foundry mould mixtures. Metalurgija, v. 49, n.1, p.3-7. 2010.
- [9] Cuypers, W.; VanGestel, N.; Voet, A.; Kruth, J.; Mingneau, J.; Bleys, P. Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology. Optics and Lasers in Engineering, v. 47, p.292-300. 2009.
- [10] Chiffre, L.; Carmignato, S.; Kruth, J.-P.; Schmitt, R.; Weckenmann, A. Industrial applications of computed tomography. Manufacturing Technology, v.63, p.655-677. 2014.
- [11] Rejc, J.; Cinkelj, J.; Munič, M. Dimensional measurements of a gray-iron object using a robot and a laser displacement sensor. Robotics and computer-integrated manufacturing, v. 25, p. 155-167. 2009.
- [12] Karwiński, A.; Haratym, R.; Biernacki, R.; Soroczyński, A. Investment casting vs replicast CS considered in terms of the ceramic mould making and dimensional accuracy of castings. Archives of Foundry Engineering, v.14, p. 45 - 48. 2014.
- [13] Taylor, R. P.; McClain, S. T.; Berry, J. T. Uncertainty analysis of metal-casting porosity measurements using Archimedes' principle. International Journal of Cast Metals Research, v. 11:4, p. 247-257. 2016.
- [14] Williams, D.; Zhao, W.; Chamberlin, R.; Cheron, J.; Urteaga, M. Verification of a foundry-developed transistor model including measurement uncertainty. Microwave Measurement Conference, v. 87, 2016.
- [15] Limodin, N. et al. Application of X-ray microtomography to study the influence of the casting microstructure upon the tensile of na Al-Si alloy. Nuclear Instruments and Methods in physics research section B: Beam interactions with materials and atoms, v. 324, p. 57-62, 2014.
- [16] Mathioulakis, E.; Panaras, G.; Belessiotis, V. Estimation of uncertainties in indirect humidity measurements. Energy and Buildings, v. 43, n. 10, p. 2806-2812, 2011.
- [17] David, J. et al. Heuristic modeling of casting processes under the conditions uncertainty. Archives of civil and mechanical Engineering, v. 16, p. 179-185. 2016.



**Lisiane Trevisan** Graduada em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS (2005), Mestrado e Doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Trabalha no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - IFRS - Campus Farroupilha nos cursos Técnicos, Graduação em Engenharia Mecânica e no Mestrado Profissional PPG-TEM. Atua em distintas áreas de pesquisa: metrologia, sistema da qualidade e processos de fabricação.



**Vinicius de Freitas Paz** Graduado em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS (2011), com Mestrado (2016) em Ciência dos Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Trabalha como Professor Substituto no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), Campus Farroupilha, nos cursos técnicos de Polímeros e Graduação em Engenharia Mecânica. Professor de Graduação no Grupo UNIFTEC de Engenharia Mecânica e Produção. Suas áreas de pesquisa são Ciência dos Materiais, Tratamentos Térmicos e Processos de Fundição de ligas metálicas.



**Daniel Antonio Kapper Fabricio** Graduado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS (2013), com Mestrado (2015) e Doutorado (2018) pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Trabalha desde 2016 no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), Campus Chapecó, nos cursos técnicos e no curso de graduação em Engenharia de Controle e Automação. Suas áreas de pesquisa são em metrologia, gestão da produção e gestão da qualidade.