



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOSÉ AUGUSTO MUNIZ BARBOSA

**ANÁLISE DA CONFORMIDADE DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES
ADQUIRIDAS EM UMA MÁQUINA DE ENSAIO DE TRAÇÃO**

Recife
2019

JOSÉ AUGUSTO MUNIZ BARBOSA

**ANÁLISE DA CONFORMIDADE DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES
ADQUIRIDAS EM UMA MÁQUINA DE ENSAIO DE TRAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Pernambuco como requisito para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto do
Nascimento Oliveira.

Recife
2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel da Luz, CRB-4 / 2222

B283a Barbosa, José Augusto Muniz.

Análise da conformidade dos resultados das medições adquiridas em uma máquina de ensaio de tração / José Augusto Muniz Barbosa – Recife, 2019.
63f., figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Augusto do Nascimento Oliveira.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.

Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Ensaio de tração. 3. Incerteza de medição. 4. ISO GUM.
I. Oliveira, Carlos Augusto do Nascimento (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2019 - 246



**Universidade Federal de Pernambuco Departamento de
Engenharia Mecânica
Centro de Tecnologia e Geociências- CTG/EEP**



**ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC2**

Ao 1 dia do mês de julho do ano de dois mil e dezenove, às 9:00, no bloco de salas de aula do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado: **ANÁLISE DA CONFORMIDADE DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES ADQUIRIDAS EM UMA MÁQUINA DE ENSAIO DE TRAÇÃO**, elaborado pelo aluno **José Augusto Muniz Barbosa**, matrícula 101.653.064-16, composta pelos professores **Carlos Augusto do Nascimento Oliveira** (Orientador), **Adson Beserra da Silva** (membro titular) e **Rogério Pontes de Araújo** (membro titular). Após a exposição oral, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se reservadamente e deliberaram pela _____ (aprovação/reprovação) do candidato, atribuindo-lhe a média _____ (_____), julgando-o apto à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada por mim e pelos demais membros da banca.

Prof.(a) Orientador(a): Prof. Dr. **Carlos Augusto do Nascimento Oliveira** Nota:

Assinatura _____

Prof.(a)Membro: Prof. Msc. **Adson Beserra da Silva** Nota:

Assinatura _____

Prof.(a)/Membro: Prof. Msc. **Rogério Pontes de Araújo** Nota:

Assinatura _____

Recife, 01 de julho de 2019

José Maria A. Barbosa
Coordenador de Trabalho de Conclusão de Curso - TCC2
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

Gostaria de agradecer a minha mãe Maria Daurineide, meu pai José de Jesus e meu irmão José Diego por todo apoio e carinho no desenvolvimento do trabalho.

Merece também agradecimentos minha namorada Mayara Santos pelo carinho, conversas e confiança no meu trabalho.

Meu amigo Allisson Mendes, por todo companheirismo.

Um agradecimento ao meu orientador Carlos Augusto do Nascimento Oliveira pelos ensinamentos, amizade e atenção.

Por fim, gostaria de agradecer toda assistência da Universidade Federal de Pernambuco para realização do presente trabalho.

RESUMO

A eficiência das medições tem um impacto direto em áreas da indústria, mercado e campo científico. Para garantir maior precisão no resultado de uma medição, é comum que tal medida venha acompanhado de uma incerteza de medição (indicação quantitativa que opera como um grau de confiabilidade do processo. A incerteza de medição, aponta as possíveis variações de um resultado, assim como o intervalo de confiança do mesmo, permitindo parâmetros de comparação entre medições e com os valores padrões alinhados às normas técnicas. Este trabalho traça uma análise da conformidade de uma máquina de ensaio de tração sobre comportamento dos resultados das medições obtidas. Assim, foi utilizado como material de estudo o ferro fundido nodular. A análise se vale de quatro etapas básicas: o desenvolvimento do ensaio de tração; a verificação de possíveis outliers (outlier é uma medição distinta das demais da amostra); a avaliação da incerteza de medição de acordo com o ISO GUM (Guia para a Expressão da Incerteza de Medição), pautada no diagrama de causa-efeito de Domeneghetti (2011) e a conformidade em comparação com a norma técnica do ensaio de tração.

Palavra-chave: Ensaio de tração. Incerteza de medição. ISO GUM.

ABSTRACT

Measurement efficiency has a direct impact on areas of industry, market and scientific field. In order to guarantee greater accuracy in the measurement result, it is common for such measurement to be accompanied by a measurement uncertainty (quantitative indication that operates as a degree of process reliability. Measurement uncertainty points out the possible variations of a result, as well as the reliability interval of the test, allowing parameters of comparison between measurements and with the standard values in line with the technical norms. This work traces an analysis of the conformity of a tensile test machine on the behavior of the results of the measurements obtained. The analysis uses four basic steps: the development of the tensile test, the verification of possible outliers (outlier is a different measurement from the others in the sample), the evaluation of the measurement uncertainty according to the ISO GUM (Guide to the Expression of Measurement Uncertainty), based on the cause-and-effect diagram ito de Domeneghetti (2011) and the conformity in comparison with the technical standard of the traction test.

Keywords: Traction test. Measurement uncertainty. ISO GUM.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama Fe-C, linhas tracejadas na reação eutética representa a fase estável ($\gamma+G$), linha cheia na reação eutética representa a fase metaestável ($\gamma+Fe_3C$).....	16
Figura 2 - Secção próxima ao ponto eutético, no diagrama de equilíbrio do sistema Fe-C	17
Figura 3 - Secção vertical do sistema Fe-C-Si a um teor constante de 2% desilício.	17
Figura 4 - Elementos que alteram o intervalo de solidificação: a) Influência do silício ampliando o intervalo de solidificação. b) Influência do cromo reduzindo o intervalo de solidificação.....	18
Figura 5 - Representação da tensão mecânica aplicada sobre barras com diferentes áreas de seção transversal.....	22
Figura 6 - Principais corpos de prova.....	23
Figura 7 - Esquema do Ensaio de Tração	23
Figura 8 - Comportamento típico da curva tensão x deformação até fratura do material	24
Figura 9 - Parâmetros encontrados em uma curva tensão x deformação	25
Figura 10 - Curva do ensaio de tração de ferro nodular ferrítico	26
Figura 11 - Gráfico do Erro de Medição	29
Figura 12 - Representação de uma medida com e sem a presença de uma incerteza.....	30
Figura 13 - As etapas provenientes do desenvolvimento do ISO GUM	32
Figura 14 - Diagrama Causa – Efeito para determinar a incerteza de medição da força F	33
Figura 15 - Fluxograma resumido das etapas do trabalho	43
Figura 16 - Corpo de Prova.....	44
Figura 17 - Software Analysis.....	45
Figura 18 - Diagrama Causa – Efeito do ensaio de tração.....	46
Figura 19 - Histograma do Limite de Escoamento	50
Figura 20 - Histograma do Limite de Resistência.....	50
Figura 21 - Histograma da Deformação	51

Figura 22 - Gráfico de Dispersão para Limite de Escoamento.....	53
Figura 23 - Gráfico de Dispersão para Limite de Resistência	55
Figura 24 - Gráfico de Dispersão para Deformação.....	57
Figura 25 - Microscopia de dois corpos de prova.....	58

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Composições e Propriedades Mecânicas dos tipos comuns de Ferro Nodular.....	20
Tabela 2 - Aplicações gerais e empregos típicos de ferro nodular	21
Tabela 3 - Principais distribuições e componentes de incerteza com seus respectivos valores.....	35
Tabela 4 - Valor do fator de abrangência com base no grau de liberdade (v_{eff})	38
Tabela 5 - Equação para calcula Q	40
Tabela 6 - Valores de $Q_{crítico}$ de Dixon	40
Tabela 7 - Valores para Constante de Chauvenet	41
Tabela 8 - Valores de $G_{crítico}$ de Grubbs	42
Tabela 9 - Valores encontrados na norma técnica	48
Tabela 10 - Resultados obtidos pela máquina de ensaio	49
Tabela 11 - Fontes de Incerteza do mensurando	52
Tabela 12 - Resultado das fontes de incerteza do limite de escoamento	52
Tabela 13 - Resultado para o Limite de Escoamento	53
Tabela 14 - Resultado das fontes de incerteza do limite de resistência.....	54
Tabela 15 - Resultado para o Limite de Resistência	54
Tabela 16 - Resultado das fontes de incerteza da deformação	56
Tabela 17 - Resultado para a deformação	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo Geral.....	13
1.2.2	Objetivo Específico	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	FERRO FUNDIDO.....	15
2.1.1	Diagrama de Fase do Ferro Carbono (Fe-C)	15
2.1.2	Tipos de Ferros Fundidos.....	19
2.1.3	Ferro Fundido Nodular.....	20
2.2	ENSAIO DE TRAÇÃO	21
2.2.1	Parâmetros encontrados no Ensaio de Tração.....	24
2.2.2	Ensaio de Tração em Ferros Fundidos.....	26
2.3	INCERTEZA DE MEDIÇÃO	27
2.3.1	Erro de Medição.....	27
2.3.1.1	Erros Grosseiros.....	28
2.3.1.2	Erros Sistemáticos.....	28
2.3.1.3	Erro Aleatório	29
2.3.2	Incerteza de Medição	29
2.3.2.1	Incerteza Padrão (u).....	30
2.3.2.2	Incerteza Combinada (uc)	31
2.3.2.3	Incerteza Expandida (U).....	31
2.4	ESTIMATIVA DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO PELO MÉTODO ISO GUM .	31
2.4.1	Modelamento da Medição	32
2.4.2	Estimativa das Incerteza-padrão.....	34
2.4.2.1	Avaliação Tipo A da Incerteza-padrão	34
2.4.2.2	Avaliação Tipo B da Incerteza-padrão	34
2.4.3	Propagação das Incertezas	35
2.4.4	Estimativa da Incerteza Expandida.....	37
2.5	IDENTIFICAÇÃO DE OUTLIERS	39
2.5.1	Critério de Dixon.....	39
2.5.2	Critério de Chauvenet	40

2.5.3	Critério de Grubbs	41
3	METODOLOGIA	43
3.1	FLUXOGRAMA RESUMIDO DA METODOLOGIA	43
3.2	DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO DE TRAÇÃO	44
3.3	VERIFICAÇÃO DE OUTLIERS	44
3.4	AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO	45
3.4.1	Equação do Coeficiente de Sensibilidade	47
3.5	AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE DOS RESULTADOS	48
4	RESULTADOS	49
4.1	RESULTADOS DAS MEDIÇÕES E VERIFICAÇÃO DOS OUTLIERS	49
4.2	AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO	51
4.2.1	Limite de Escoamento	52
4.2.2	Limite de Resistência	54
4.2.3	Deformação	55
5	CONCLUSÃO	59
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Para um melhor esclarecimento sobre a descrição de fenômenos ou processos, é essencial que suas propriedades possam ser quantificadas através de meios de medições (JUNIOR e SOUZA, 2008). Realizadas de forma adequada, as medições podem trazer resultados determinantes para a indústria e para o mercado, como a liberação ou não de algum produto. Para o campo científico, ajuda a mensurar as características dos materiais, indicando potencialidades de utilização. A evolução da indústria, comércio, agricultura, serviços e da própria área científica se deve muito aos meios adequados responsáveis pelas medições.

No sentido de garantir eficiência ao resultado de uma medição, tal procedimento costuma trazer alguma indicação quantitativa apresentando a eficiência do resultado da medição, sendo uma espécie de grau de confiabilidade do processo. Tal indicativo é denominado “incerteza de medição” e somente com sua aplicação é possível estabelecer parâmetros de comparação entre medições e com os valores padrões estabelecidos através das normas técnicas (JCGM, 2008).

A incerteza de medição é um parâmetro estático que aponta as possíveis variações de um resultado e manifesta o intervalo de confiança do mesmo. Como o resultado de uma medição é uma estimativa do valor verdadeiro, a incerteza é responsável por apresentar o grau de dúvida envolvido. Assim, torna-se fundamental para a calibração de equipamentos e para a área de ensaios, a verificação dos resultados, no sentido de verificar a conformidade com os limites de tolerância legal; e para o controle de riscos que envolvem a tomada de decisão sobre aprovação ou rejeição de uma amostra.

O percurso necessário para a análise é composto das seguintes etapas: desenvolvimento do ensaio de tração, onde ocorre a escolha do material, bem como a máquina e das condições ideais para o ensaio; verificação de possíveis outliers, e avaliação da incerteza de medição com base no diagrama causa – efeito desenvolvido por Domeneghetti (2011).

O presente trabalho propõe uma análise da máquina de ensaio de tração, com base no comportamento dos resultados das medições. Para tanto, foi utilizado o ferro fundido nodular como material para compor o corpo de prova, através de suas características de ductilidade, tenacidade e resistência mecânica.

Levando em conta a importância da estimativa correta dos resultados de ensaios mecânicos, assim como as dificuldades para sua implementação, este trabalho analisa a conformidade dos resultados das medições. Neste caso, estudando a metodologia de incerteza de medição de acordo com o *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM).

1.1 JUSTIFICATIVA

O ensaio de tração é um dos principais ensaios desenvolvidos na área de engenharia, é nele onde podem ser investigados os parâmetros mecânicos do material, é de grande importância que os resultados das medições desses parâmetros sejam coerentes para satisfazer o processo. Com isso a máquina de ensaio é parte importante, é nela que se obtém esses parâmetros como os valores da carga admissível de um material, o alongamento elástico e plástico. Então se faz necessário ter a máquina calibrada e com manutenção regular, para se obter medições com maior grau de confiabilidade.

Para saber se os resultados das medições obtidos estão coerentes para o processo, se faz uma análise da conformidade desses resultados seguindo a norma técnica do ensaio e uma avaliação da incerteza de medição.

Neste trabalho a metodologia de avaliação do cálculo de incerteza é estabelecida pelo GUM, pois abrange atividades do chão de fábrica e até pesquisas científicas (JCGM, 2008).

1.2 OBJETIVOS

Nesta seção serão abordados os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a conformidade dos resultados das medições obtidos em uma máquina de ensaio de tração, utilizando a norma técnica do ensaio e uma avaliação da incerteza de medição.

1.2.2 Objetivo Específico

- Estudar a avaliação da incerteza de medição em ensaio de tração usando o ISO GUM;
- Definir as fontes de incerteza envolvidas com o ensaio de tração e encontradas nas bibliografias atuais;
- Estudar o comportamento a tração de um ferro fundido;
- Realizar ensaios de tração, em ferro fundido, com o corpo de prova baseado na norma técnica ASTM A 536 – 84;
- Estimar a incerteza de medição do ensaio;
- Avaliar a conformidade dos resultados dos ensaios realizados com as normas vigentes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A partir desse capítulo serão abordados conceitos sobre o ferro fundido nodular, ensaio de tração, incerteza de medição e sua obtenção com a metodologia ISO GUM.

2.1 FERRO FUNDIDO

Os ferros fundidos são ligas de ferro, carbono e silício e tem como principal característica a apresentação de reação eutética ao longo da solidificação (GUESSER, 2009).

O ferro fundido pode ser definido como uma liga Fe-C-Si, de teores de carbono geralmente acima de 2%, em quantidade superior à que é retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita (CHIAVERINI, 2012).

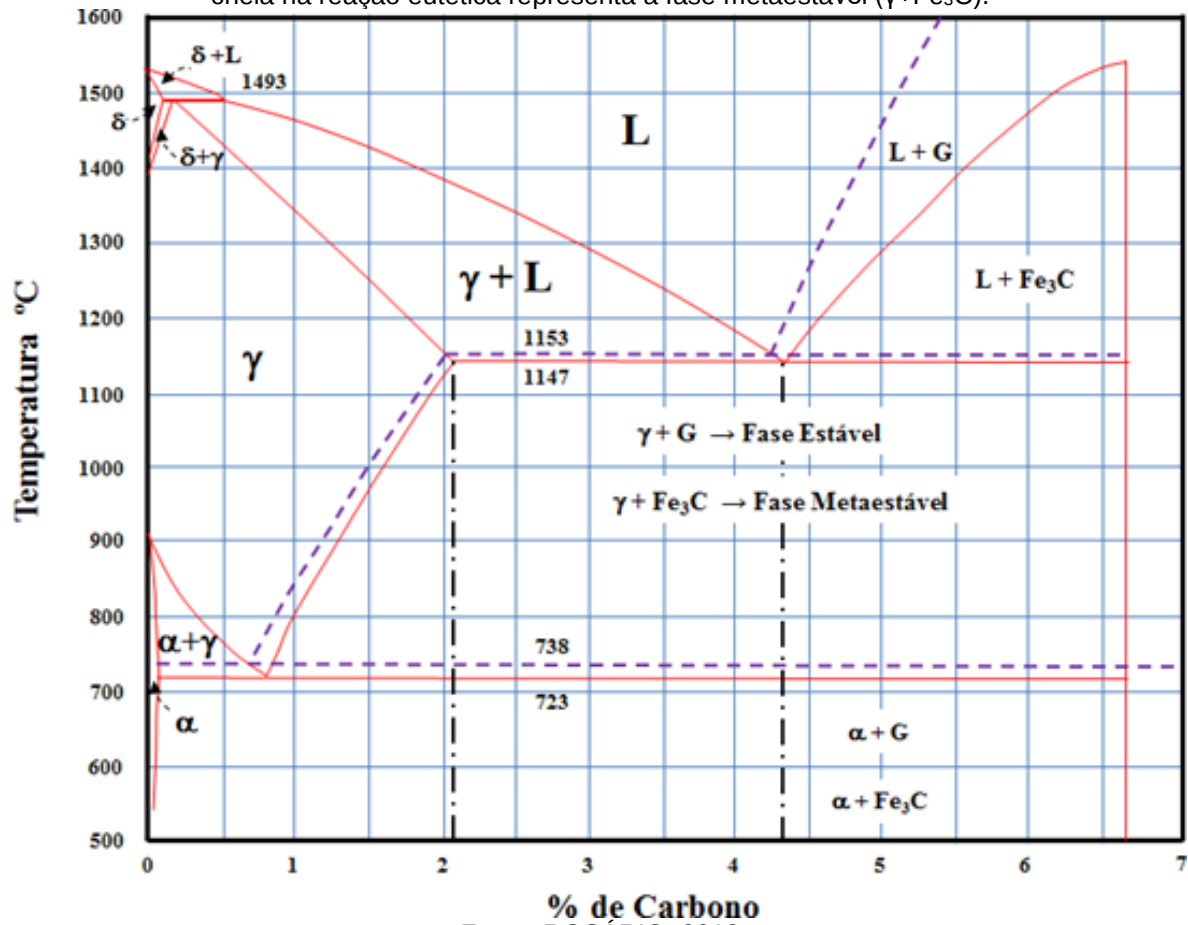
2.1.1 Diagrama de Fase do Ferro Carbono (Fe-C)

Ao se analisar um diagrama Fe-C, verifica-se que os ferros fundidos se encontram para valores de carbono acima de 2%. Para falar do diagrama de Fe-C é importante observar que. Com 4,3%C na temperatura 1148°C, encontra-se o ponto eutético, correspondendo à temperatura de solidificação, mais baixa da liga. Entre 2 e 4,3, os ferros são chamados de hipoeutéticos, corresponde à maioria dos ferros fundidos e acima de 4,3%C são chamados de hipereutéticos (PARIS, 2013).

O estudo do diagrama Fe-C é muito importante para entender a solidificação em condições de equilíbrio. Os ferros fundidos são ligas do sistema ferro-carbono que se caracterizam por apresentar dois eutéticos provenientes da existência de dois equilíbrios: eutético estável (TEE) e eutético metaestável (TEM) (ROSÁRIO, 2012).

A Figura 1 mostra uma linha tracejada onde temos o sistema estável e uma linha cheia o sistema metaestável.

Figura 1 - Diagrama Fe-C, linhas tracejadas na reação eutética representa a fase estável ($\gamma + G$), linha cheia na reação eutética representa a fase metaestável ($\gamma + Fe_3C$).



Guesser (2009) relata, em seus estudos, que nos sistemas citados ocorrem reações estáveis e metaestáveis. É possível definir essas duas reações conforme a formação dos produtos citados abaixo.

- Sistema Estável

Reação eutética: $L \rightarrow \text{Austenita} + \text{Grafita}$

Reação eutetóide: $\text{Austenita} \rightarrow \text{Ferrita} + \text{Grafita}$

- Sistema Metaestável

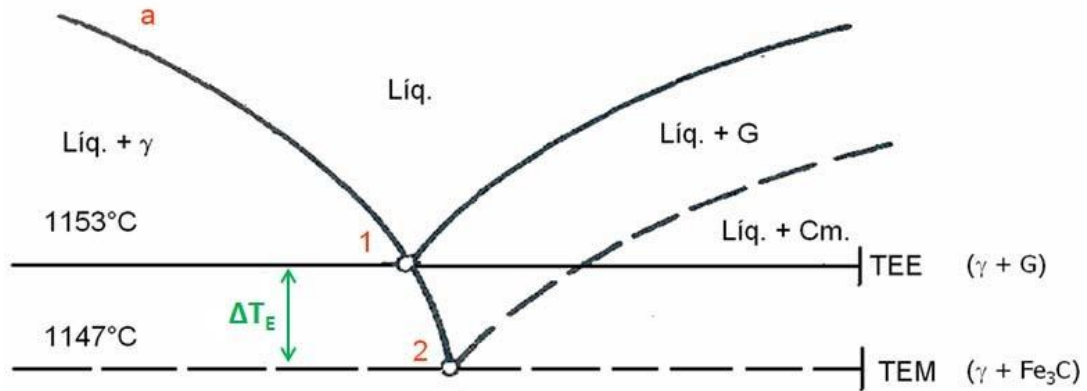
Reação eutética: $L \rightarrow \text{Austenita} + \text{Cementita}$

Reação eutetóide: $\text{Austenita} \rightarrow \text{Ferrita} + \text{Cementita}$

O diagrama para o sistema Fe-C apresentado na Figura 2, mostra uma diferença de aproximadamente 7°C entre as temperaturas de equilíbrio do eutético estável e do eutético metaestável. A solidificação do eutético inicia no ponto 1 e termina entre ponto 1 e 2, haverá austenita mais grafita ($\gamma + G$). No entanto, se a solidificação do eutético inicia abaixo do ponto 1 e termina abaixo do ponto 2, haverá

formação de austenita mais cementita ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$) (ROSÁRIO, 2012).

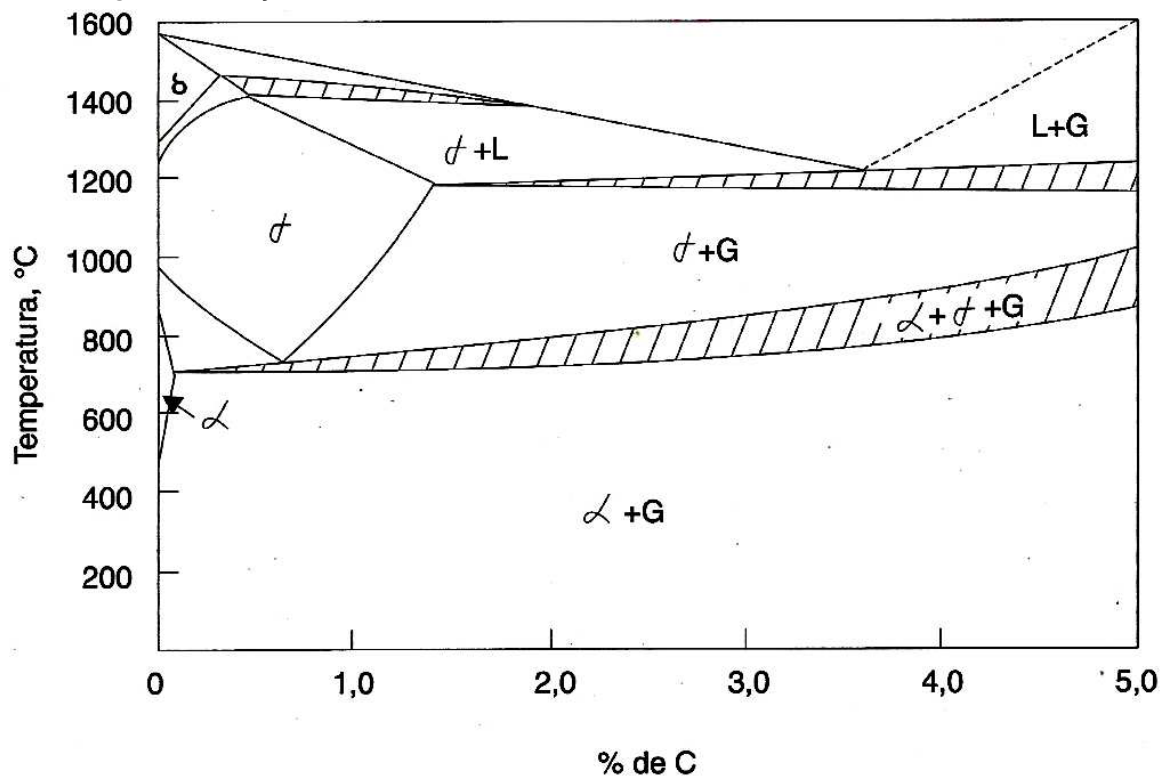
Figura 2 - Secção próxima ao ponto eutético, no diagrama de equilíbrio do sistema Fe-C



Fonte: ROSÁRIO, 2012

A solidificação está ligada diretamente ao diagrama ternário Fe-C-Si (ROSÁRIO, 2012). O silício tem característica grafitante, como mostra a Figura 3, que é um diagrama com 2% de silício.

Figura 3 - Secção vertical do sistema Fe-C-Si a um teor constante de 2% de silício



Fonte: CHIAVERINI, 2012

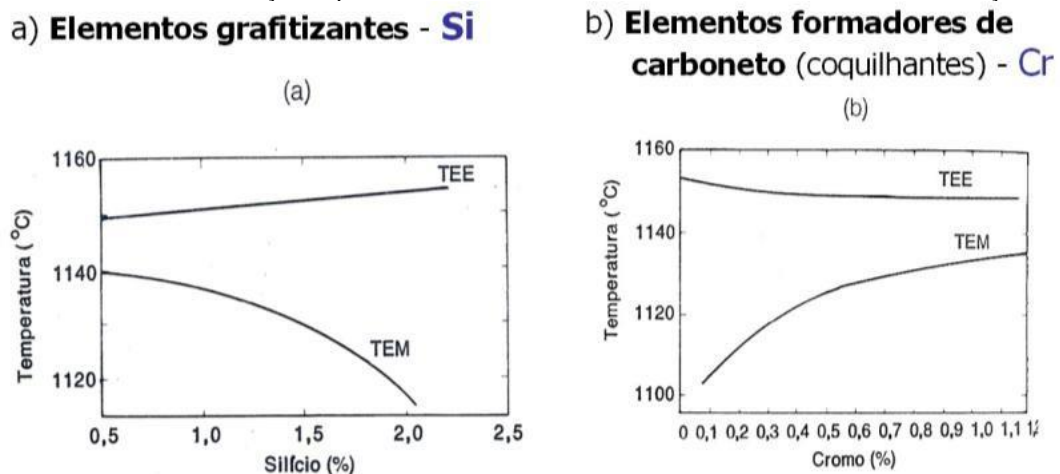
Elementos como silício, cobre e níquel ampliam o intervalo ΔT_E (Figura 2), ou seja, tem maior facilidade de ocorrer uma solidificação por um sistema estável, apresenta uma formação de grafita. Já elementos como cromo, manganês e molibdênio, diminuem esse intervalo e formam carbonetos (ROSÁRIO, 2012).

A adição de cobre causa o aumento da temperatura do eutético estável e diminuição da correspondente ao metaestável, ocasionando uma influência similar como a do silício, alumínio, níquel e cobalto. O fósforo, que também tem característica gráfica, tem um efeito diferente, uma vez que reduz essas duas temperaturas (SANTO, 2007).

Um exemplo de sistema estável é o ferro fundido cinzento e de sistema metaestável é ferro fundido branco.

A Figura 4 mostra como os elementos silício e cromo influenciam as temperaturas de transição dos ferros fundidos.

Figura 4 - Elementos que alteram o intervalo de solidificação: a) Influência do silício ampliando o intervalo de solidificação. b) Influência do cromo reduzindo o intervalo de solidificação.



Fonte: ROSÁRIO, 2012

Como consequência da análise dos gráficos da Figura 4 e da equação 2.1, pode-se estimar o carbono equivalente (C_e). Com base nisso Paris (2013), considerou essa equação, como uma maneira simplificada para avaliação do efeito da composição química em ferros não- ligados, que relaciona o conteúdo total de carbono mais fósforo e silício.

$$C_e = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (2.1)$$

A comparação C_e com a composição eutética sistema Fe-C (4,3%C) indicará se o ferro fundido se comportará como hipo ou hipereutético durante a solidificação. (PARIS, 2013).

2.1.2 Tipos de Ferros Fundidos

Os ferros fundidos podem ser classificados em famílias, que na maioria das vezes tem relação com a forma da grafita. O nome de cada família reflete a forma da grafita, por exemplo ferros fundidos nodular e ferro fundido vermicular. Em outras situações o nome das famílias tem relação com o aspecto da fratura, como o ferro fundido cinzento, e ferro fundido branco (GUESSER, 2009).

Com base na classificação Chiaverini (2012) temos os seguintes ferros fundidos:

- a) Ferro fundido Branco: praticamente todo o carbono se apresenta na forma de combinada de carboneto de ferro Fe_3C , mostrando uma superfície de fratura clara. Suas propriedades fundamentais, devido justamente a alta quantidade de cementita, são elevadas dureza e resistência ao desgaste. Em consequência, sua usinabilidade é prejudicada;
- b) Ferro fundido cinzento: é ferro fundido mais usado devido a boa resistência mecânica e a ao desgaste, boa capacidade amortecimento e excelente usinabilidade. Caracterizasse por apresentar como elementos de liga fundamentais o carbono e o silício e estrutura em que uma parcela relativamente grande de carbono está no estado livre (grafita lamelar);
- c) Ferro fundido maleável: é um material que apresenta pouca ou nenhuma ductilidade. Caracterizasse por ser obtido a partir do ferro fundido branco, mediante um tratamento térmico especial (maleabilização), resultando na transformação de praticamente todo o ferro combinado em grafita na forma de nódulos;
- d) Ferro fundido de grafita compactada: conhecido também como ferro fundido vermicular, é um produto intermediário entre ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular (devido a grafita que se apresenta de forma mais arredondada e mais grosseira). Desse modo apresenta melhor resistência mecânica que o ferro fundido cinzento e uma maior capacidade de amortecimento em relação ferro fundido nodular;

e) Ferro fundido nodular: caracteriza-se pela ductilidade, tenacidade e resistência mecânica. O mais importante é em relação com a resistência mecânica, é o limite de escoamento que é mais elevado que ferros fundidos cinzento e maleável e até mesmo aço-carbono comuns. Essa sua característica de ductilidade e tenacidade é uma consequência de sua grafita apresentar uma forma esferoidal.

Neste trabalho, os estudos se concentram no comportamento a tração do ferro fundido nodular, com suas características de ductilidade, tenacidade e resistência mecânica.

2.1.3 Ferro Fundido Nodular

A Tabela 1 apresenta algumas especificações e propriedades mecânicas do ferro fundido nodular. Analisando a mesma é possível identificar as especificações de algumas normas em relação ao percentual de elementos de liga e propriedades mecânicas do ferro fundido nodular.

Tabela 1 - Composições e Propriedades Mecânicas dos tipos comuns de Ferro Nodular

Especificação nº	Classe	Composição					Natureza	Propriedades Mecânicas			
		C _t	Si	Mn	P	S		Dureza Brinell	Resistência à tração kgf/mm ² (MPa)	Limite de Escoamento kgf/mm ² (MPa)	Alongamento em 50 mm (%)
ASTM A 395	60-40-18	3,0	2,5	-	0,08	-	Ferrítica:	143 a	42,0	28,0	18
ASME SA 395		min.	max.		max.		recozida	187	(410)	(270)	
ASTM A 476	80-60-03	3,0	3,0	-	0,08	0,05	Fundida	201 min.	56,0	42,0	3
SAE AMS 5316		min.	max.		max.	max.			(550)	(410)	
ASTM A 536	60-40-18						Ferrítica; pode ser recozida	-	42,0	28,0	18
	65-45-12						Principalmente ferrítica	-	45,5	31,5	12
	80-55-06	Composição química especificada mediante acordo mútuo entre produtor e consumidor.					Ferrítica-perlítica	-	56,0	38,5	6
	100-70-03						Principalmente perlítica	-	70,0	49,0	3
							Martensítica	-	84,0	63,0	2
	120-90-02						temperada em óleo e revenida	-	(820)	(620)	
SAE J 434	D 4018	1,80 a	0,10 a	0,015 a			Ferrítica	170 máx	42,0	28,0	18
	D 4512		3,00	1,00	0,10				(410)	(270)	
	D 5506	3,20 a	Valores devem ser compatíveis com a dureza mínima especificada para as peças fundidas			0,005 a	Ferrítica-perlítica	156 a	45,5	31,5	12
	D 7003	4,10				0,035	Ferrítica-perlítica	217	(445)	(305)	
							Perlítica	187 a	56,0	38,5	6
	DQ & T						Martensítica	255	(550)	(375)	

NOTA- Os números indicativos das classes conforme especificação ASTM refere-se aos valores de resistência à tração, limite de escoamento (em milhares de libras quadrada) e alongamento (em %).

Fonte: CHIAVERINI, 2012

A Tabela 2 relaciona as principais aplicações do ferro fundido nodular na indústria mecânica.

Tabela 2 - Aplicações gerais e empregos típicos de ferro nodular

Especificação nº	Classe	Uso Gerais	Aplicações típicas
ASTM A 395 ASME SA 395	60-40-18	Componentes para pressão para emprego a altas temperaturas	Válvulas e aplicações para equipamentos de vapor e da indústria
ASTM A 476 SAE AMS 5316	80-60-03	Equipamento de fábricas de papel, até temperatura de 230°C	Cilindros de secagem de fabricas de papel
	60-40-18	Partes para resistência ao choque; serviços para baixas temperaturas	Válvulas e corpos de bombas de pressão
	65-45-12	Serviços Gerais	Componentes de máquinas sujeitos a cargas de choque e fadiga
ASTM A 536	80-55-06	Serviços Gerais	Virabrequins, engrenagens e rolamentos
	100-70-03	Melhor combinação de resistência mecânica e ao desgaste e à têmpera superficial	Engrenagens e componentes de máquinas para suportar elevados esforços
	120-90-02	Mais elevadas resistência mecânica e ao desgaste	Pinhões, engrenagens, rolamentos
	D 4018	Componentes mecânicos sob cargas moderadas, exigindo boas ductilidade e usinabilidade.	Articulações de direção
	D 4512	Componentes mecânicos sob cargas moderadas, exigindo boas ductilidade e usinabilidade.	Calibres de freios a disco
SAE J 434	D 5506	Componentes sujeitos a tensões elevadas, exigindo boa tenacidade	Virabrequins
	D 7003	Componentes sujeitos a tensões elevadas, exigindo muito boa resistência ao desgaste e a reação ao endurecimento parcial	Engrenagens
	DQ & T	Componentes sujeitos a tensões elevadas, exigindo uniformidade de microestrutura e controle rigoroso de propriedades	Braços de balancim

Fonte: CHIAVERINI, 2012

2.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Em um ensaio de tração, é uma técnica utilizada para se verificar o comportamento do material a esforços mecânicos. Neste ensaio é aplicado uma tensão axial no material, que tende a deformar, alongando o corpo de prova. Esses esforços que podem também ser chamado cargas são medidos na própria máquina de ensaio. Os ensaios de tração permitem conhecer como os materiais reagem aos esforços de tração, quais os seus limites de tração e a partir de que solicitação atingem

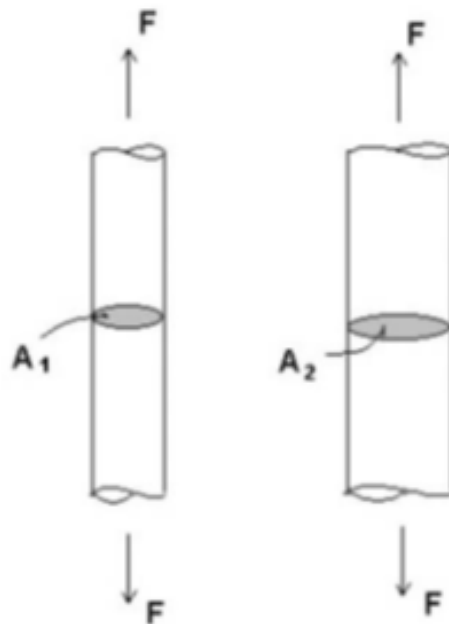
o rompimento (SOBRAL e OLIVEIRA, 2009).

De acordo com Bayer (2013), esse tipo de ensaio é melhor realizado usando um corpo de prova com dimensões específicas, conforme normas científicas, para poder comparar os resultados encontrados com os padrões da norma.

O desenvolvimento desse ensaio é dado pela aplicação de uma carga de tração (F) no corpo de prova com seccão transversal (A), essa carga deve ter um valor suficiente para alongar o corpo de prova até a ruptura, como mostra a Figura 5. A relação entre a carga de tração e a seccão transversal é a tensão mecânica (σ), e é dado a equação:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

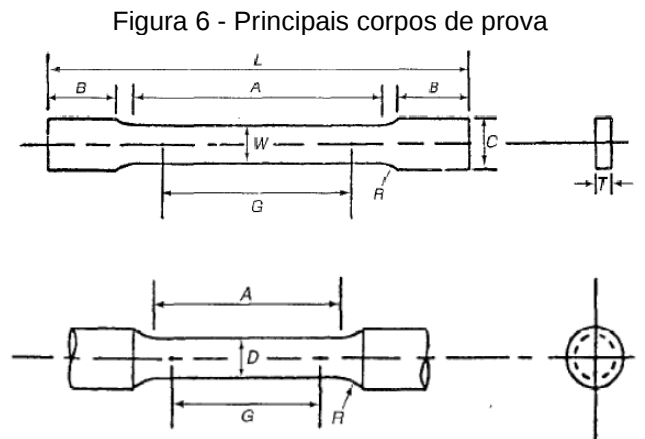
Figura 5 - Representação da tensão mecânica aplicada sobre barras com diferentes áreas de seccão transversal



Fonte: BAYER, 2013

Para o início do ensaio de tração, o corpo de prova deve ser desenvolvido com base em normas técnicas (a norma usada para o trabalho é ASTM A 536-84). Para analisar as propriedades mecânicas Fredel, Ortega e Bastos (2011) afirmaram que é necessário ter uma precisão na usinagem e na preparação do corpo de prova. Com base nisso uma das partes mais importantes do ensaio de tração é a preparação corpo de prova.

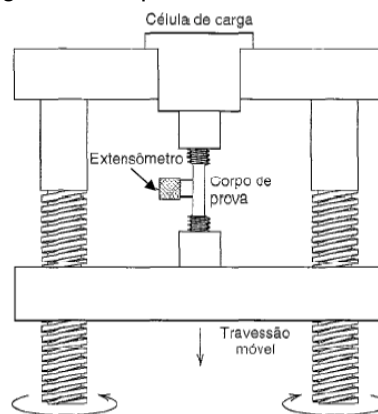
Segundo Holt (2000) os corpos de prova mais utilizados são de secção retangular e secção circular, conforme esquema da Figura 6.



Fonte: HOLT, 2000

Um esquema do ensaio está apresentado na Figura 7, o corpo de prova fica preso nas extremidades da máquina. As medições da carga aplicada e do alongamento são feitas simultaneamente ao ensaio, com um auxílio de uma célula de carga e de um extensômetro.

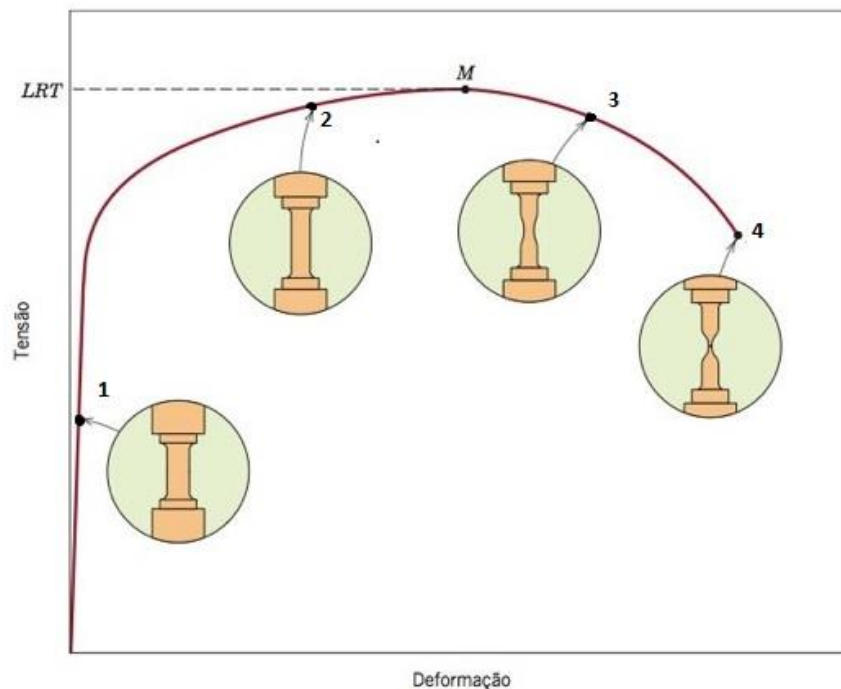
Figura 7 - Esquema do Ensaio de Tração



Fonte: CALLISTER, 2002

A Figura 8 ilustra, um gráfico, que descreve o comportamento do material em relação aos esforços de tração. Esse tipo de gráfico é conhecido como gráfico de tensão em função da deformação e é o principal resultado disponibilizado após o ensaio. Nessa Figura 8 verifica-se que a deformação fica delimitada na parte central do corpo de prova que é mais estreita e contém uma secção uniforme no seu comprimento.

Figura 8 - Comportamento típico da curva tensão x deformação até fratura do material



Fonte: Adaptado CALLISTER, 2002

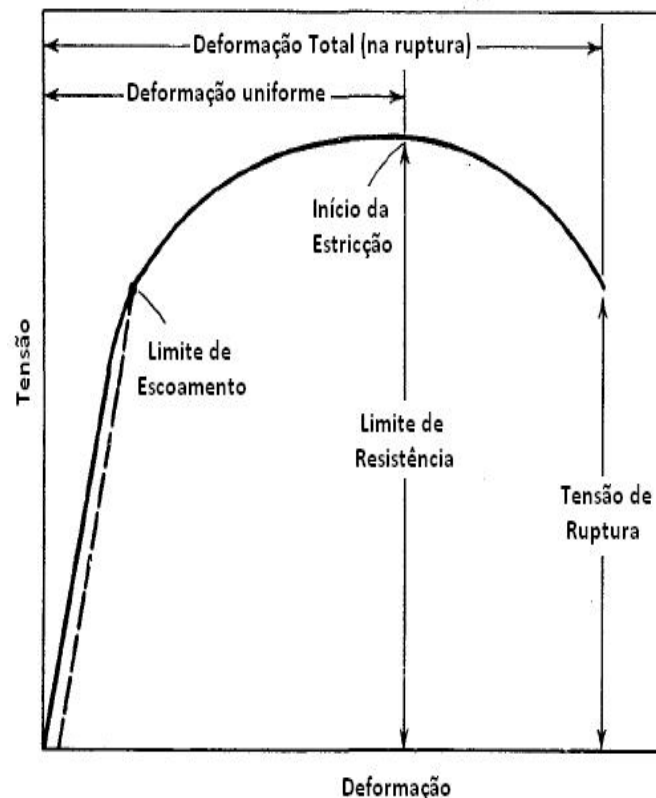
A Figura 8 também mostra, em linha tracejada o limite de resistência a tração (LRT), ou seja o ponto (ponto M) com maior valor obtido pela carga, o ponto 1 representa a deformação elástica, onde o corpo de prova ainda pode voltar ao seu estado original; ponto 2 representa a deformação plástica, é a partir desse ponto que corpo não pode voltar ao seu estado original; ponto 3 representa a estricção, esse ponto vem logo após atingir o LRT, é nesse ponto que pode-se visualizar a região do corpo de prova que ocorrerá a ruptura, ponto 4 representa a fratura (ruptura do corpo).

Os resultados encontrados no ensaio são registrados por um computador através do gráfico tensão x deformação. Os gráficos e os valores envolvidos variam conforme as propriedades do material. São essas propriedades que devem permitir ao engenheiro determinar as tensões suportadas pelo material.

2.2.1 Parâmetros encontrados no Ensaio de Tração

Alguns parâmetros importantes relacionado ao ensaio de tração foram identificados por Dieter (2000). O esquema da Figura 9 ilustra cada um desses parâmetros.

Figura 9 - Parâmetros encontrados em uma curva tensão x deformação



Fonte: DIETER, 2000

Abordando os parâmetros podemos definir:

- a) Limite de escoamento: é a máxima tensão atingida na região de escoamento, que separa o comportamento elástico do plástico;
- b) Limite de resistência: é a máxima tensão que o corpo de prova resiste, ou seja, o ponto onde aparece a máxima carga do ensaio;
- c) Tensão de ruptura: a tensão suportada pelo material antes da fratura, ou seja, é a tensão na qual ocorre o rompimento do corpo de prova;
- d) Deformação uniforme: diferença entre o comprimento inicial e o comprimento do corpo de prova antes do início da estricção dividido pelo comprimento inicial, ou seja, corresponde à deformação plástica do corpo de prova;
- e) Deformação total: diferença entre o comprimento inicial e final do corpo de prova dividido pelo comprimento inicial, ou seja, deformação até a ruptura do corpo de prova.

No escopo do trabalho estão sendo analisados os parâmetros limite de escoamento (σ_e), limite de resistência (σ_r), deformação até a ruptura (ϵ).

2.2.2 Ensaio de Tração em Ferros Fundidos

Nos ensaios de ligas fundidas Guesser (2009) afirma que normalmente são usados corpo de prova na forma cilíndrica.

Segundo Guesser (2009), a curva tem duas regiões, elástica e a plástica. Na região elástica é aplicado a lei de Hooke, que obedece a equação:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (2.3)$$

Sendo:

E - Módulo de Elasticidade;

ε - deformação específica.

Abaixo na Figura 10, é ilustrada a curva de um ensaio de tração de um ferro fundido ferrítico. Nessa Figura 10, o limite de resistência coincide com o valor do limite de ruptura. Com base nisso Vidal (2013) afirma que o limite de resistência é influenciado pela aglomeração de nódulos de carbono e grafita tipo V e grafita VI.

Bayer (2013) enfatiza a dificuldade de estimar com precisão o limite de ruptura, pois no momento exato que ocorre a ruptura não existem meios para parar o ponteiro da força. Além disso, o limite de ruptura não é adequado para caracterizar o material, dado que para material mais dúctil, ocorre uma maior deformação antes do rompimento.

Figura 10 - Curva do ensaio de tração de ferro nodular ferrítico



Fonte: Adaptado GUESSER, 2009

2.3 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Para um melhor desenvolvimento do trabalho, o estudo detalhado de incerteza de medição e erro de medição e sua diferença deve ser abordados.

Jornada (2013) diferenciou incerteza de medição e o erro de medição.

A incerteza caracteriza uma faixa de dispersão ou intervalo, e não um valor pontual. Nesse sentido, a incerteza não deve ser confundida com “erro”, pois esse último é um valor pontual e não uma faixa e usualmente pode ser corrigido, quando aplicado um fator de correção adequado. Já a incerteza é a dúvida remanescente associada ao resultado da medição. Ela mede o grau de desconhecimento sobre aquilo que está sendo medido (JORNADA, 2013, p.3).

2.3.1 Erro de Medição

O erro de medição é definido como o resultado de uma medição menos o valor verdadeiro (convencional) do mensurado, podemos definir o mensurado como objeto da medição (LIRA, 2008).

Para Junior e Souza (2008) o erro está presente toda vez que o comportamento real de um sistema se afasta do ideal e matematicamente pode ser mostrado pela equação:

$$E = I - VV \quad (2.4)$$

Onde:

E - erro de medição;

I - indicação do sistema de medidas;

VV - valor verdadeiro do mensurado.

Existem vários fatores em um sistema de medição que produzem erro, ou seja, que contribuem para que o resultado da medição se desvie do seu alvo. Esses fatores são chamados fontes de erro (Lima JR, 2012). Calibração do instrumento, material de ensaio, temperatura, umidade e pessoa que realiza as medições são possíveis fontes de erro em um sistema de medição.

Os principais tipos de erros são grosseiros, sistemáticos e aleatórios.

2.3.1.1 Erros Grosseiros

Erros grosseiros acontecem quando se atribui falta de cuidado ou maus hábitos, como leitura imprópria no instrumento, ajustes incorretos do instrumento e os quais não se podem ser tratados matematicamente (LIRA, 2008).

Para Cabral (2004), esse tipo de erro é fácil de detectar e eliminar.

2.3.1.2 Erros Sistemáticos

O erro sistemático pode ser causado por um desgaste do sistema de medição, por fatores construtivos, pelo método de medição, por condições ambientais. Esse erro é considerado previsível, porém na maioria das vezes não é constante na faixa de operação do sistema de medição, tornando difícil a previsão. Nesses casos de difícil previsão, uma possível solução é a estimativa do erro com base na tendência (LIRA, 2008).

Para Junior e Souza (2008), para estimar o erro sistemático é necessário fazer infinitas medições de um mensurado cujo valor verdadeiro é bem conhecido. Como não á tempo para fazer infinitas medições e não se conhece exatamente o valor verdadeiro do mensurado, na prática realiza-se uma estimativa do erro sistemático, denominado de tendência. A tendência sob condições de repetibilidade tem por definição:

$$T_d = I - VVC \quad (2.5)$$

Onde:

T_d – tendência;

I - média de um número finito de medições;

VVC - valor verdadeiro convencional (estimativa do valor verdadeiro);

Segundo Silva (2012) quando o erro sistemático não é conhecido aplicasse uma correção para compensar. Essa correção é calculada:

$$C = -T_d \quad (2.6)$$

Onde:

C - Correção

2.3.1.3 Erro Aleatório

O erro aleatório pode aparecer devido a atritos, vibrações, folgas, flutuações de rede, instabilidade interna, condições ambientais (LIRA, 2008).

Segundo Junior e Souza (2008) esse tipo de erro não segue um padrão previsível e são associados com a variabilidade natural do processo e sob condições de repetibilidade pode ser estimado pela equação:

$$E_{ai} = I_i - I \quad (2.7)$$

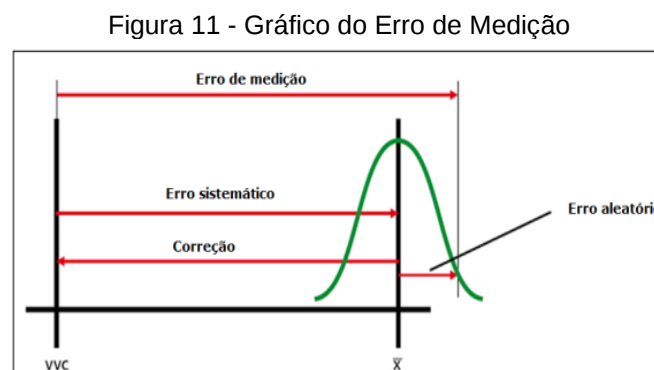
Onde:

E_{ai} - erro aleatório da i-ésima medição;
 I_i - i-ésima medição;
 I - média das medições.

Com bases nos tipos de erros citados, pode-se dizer que o erro de medição é a soma dos erros, como mostra a equação.

$$E = E_s + E_a \quad (2.8)$$

Na Figura 11, mostra um esquema do erro de medição.



Fonte: SILVA, 2012

2.3.2 Incerteza de Medição

A incerteza de medição é um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando (VIM, 2012).

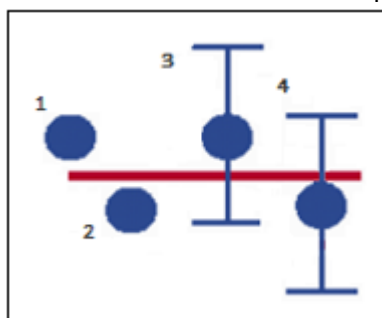
A incerteza representa uma faixa de valores possíveis para o resultado estimado de uma medida. Essa faixa de valores ou de dúvida indica que não há medida isenta de erros (SOUSA e JR, 2016).

Conclui-se, portanto, que não se deve avaliar a conformidade de produtos ou processos sem levar em conta a incerteza de medição (SOUSA e JR, 2016).

Com base na estimativa de uma medida, Cabral (2004) afirmou ser mais útil os resultados obtidos e representou graficamente um resultado de medição com estudo de incerteza e sem o estudo da incerteza, como mostra Figura 12.

A listra vermelha da Figura 12 representa um valor verdadeiro mínimo de um mensurando, ou seja, valores acima dessa linha são considerados conformes, a medição 1 e 2 estão sem o estudo da incerteza, estariam respectivamente conforme e não conforme e as medições 3 e 4 com o presente estudo da incerteza são consideradas duvidosas.

Figura 12 - Representação de uma medida com e sem a presença de uma incerteza



Fonte: CABRAL, 2004

Um resultado de uma medida com o estudo de incerteza, pode ser escrito matematicamente pela equação:

$$VM = VVC \pm IM \quad (2.9)$$

Onde:

VM - valor de medição;

VVC - valor mensurado convencional;

IM - incerteza de medição.

Existem 3 incertezas importantes para o desenvolvimento do trabalho, são elas: incerteza padrão (u), incerteza combinada (u_c) e incerteza expandida (U).

2.3.2.1 Incerteza Padrão (u)

Incerteza quando expressado como um desvio padrão é conhecido como incerteza padronizada (padrão) (EURACHEM/CITAC, 2002).

A incerteza padrão pode ser avaliada em tipo A e tipo B.

A incerteza padrão avaliada pelo método Tipo A é caracterizada quando se dispõe de uma distribuição de frequências, ou seja, de uma amostra estatística de resultados individuais de uma medição (LIMA,1999).

Já a incerteza padrão avaliada pelo método Tipo B é aplicada quando sua avaliação é baseada em algum outro conhecimento científico que não a análise estatística de uma série de observações (LIMA, 1999).

Essa incerteza tipo B é utilizado em situações práticas, pode ocorrer quando uma amostra tem todos os valores coincidentes ou quando se faz apenas uma medição do mensurado.

2.3.2.2 Incerteza Combinada (u_c)

Incerteza padrão do resultado de uma medição, quando este resultado é obtido por meio dos valores de várias outras grandezas (JCGM, 2008).

Essas grandezas segundo Lima (1999) podem ser estatisticamente independentes (não correlacionadas) ou estatisticamente dependentes (correlacionadas).

2.3.2.3 Incerteza Expandida (U)

Incerteza expandida é utilizada nas aplicações práticas reais, pois defini um intervalo com maior probabilidade de abrangência (DONATELLI e KONRATH, 2005).

Incerteza expandida é obtida pela multiplicação da incerteza padrão combinada por um fator de abrangência (k), esse fator de abrangência depende do nível de confiança requerido e da distribuição de probabilidade em questão, em inúmeros casos práticos o $k=2$ que corresponde a nível de confiança de 95,45% (LIMA,1999).

2.4 ESTIMATIVA DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO PELO MÉTODO ISO GUM

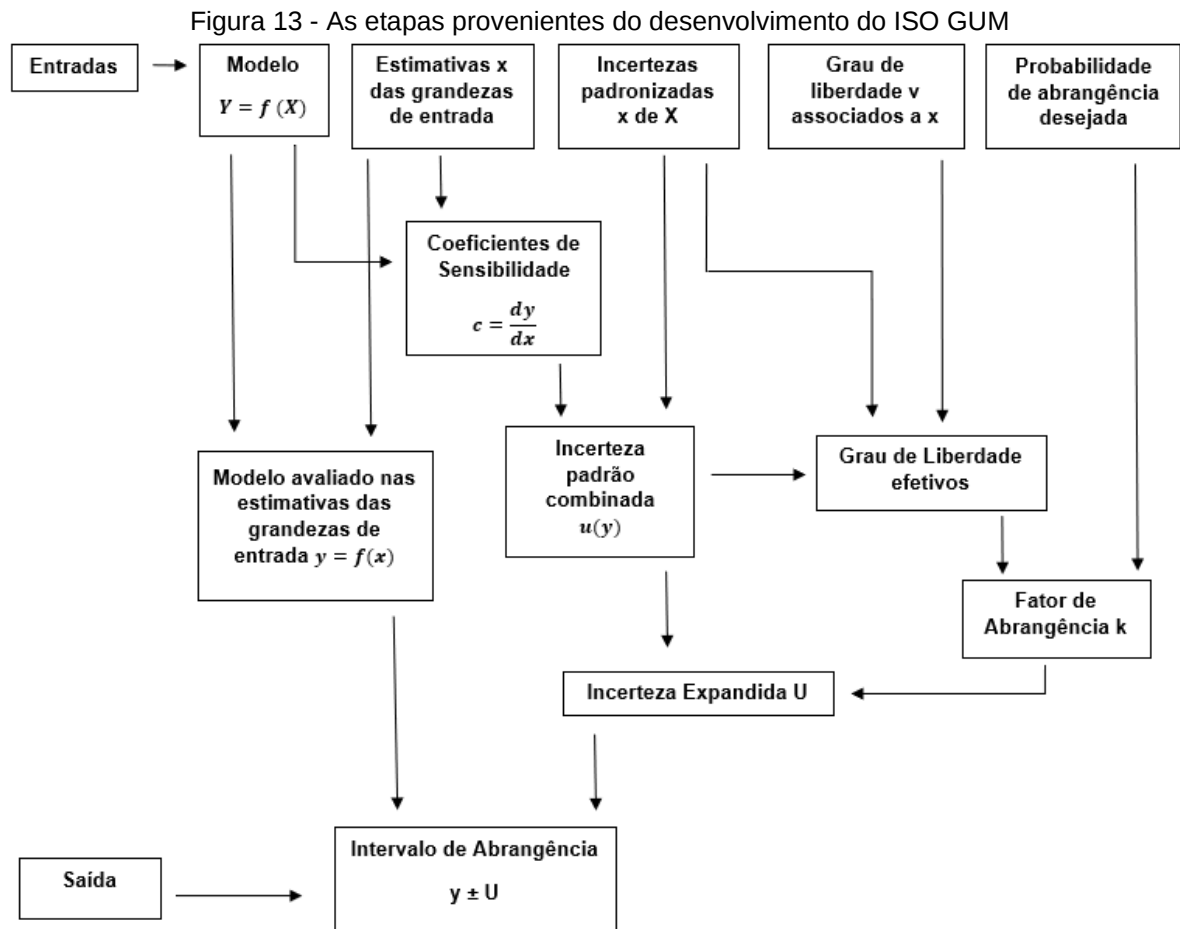
Jornada e Jornada (2007) conceitua o método ISO GUM

O Guia para Expressão da Incerteza de Medição da ISO, conhecido como GUM, é um método oficial publicado pela ISO, em conjunto com o BIPM e outras entidades internacionais da área científica, que estabelece uma forma de cálculo de incerteza de forma que possa ser universalmente aplicada (JORNADA e JORNADA, 2007, p.1).

Com base no GUM, a estimativa da incerteza segue as seguintes etapas:

- Modelamento da Medição;
- Estimativa das Incertezas-padrão;
- Propagação das Incertezas;
- Estimativa da Incerteza Expandida.

Na Figura 13, observa-se um resumo do método ISO GUM



Fonte: Adaptado SOUSA e JR, 2016

2.4.1 Modelamento da Medição

Medição é o conjunto de operações pelas quais o valor de um mensurando Y é obtido. Na maioria das vezes ele não é medido diretamente, mas é determinado a partir da combinação de valores de M outras grandezas $X = \{X_1, X_2, \dots, X_M\}$ através de uma relação funcional $f(X)$, segundo um modelo matemático (LIMA,1999).

Desta forma, o primeiro passo no modelamento é expressar matematicamente a relação entre o mensurando Y , e as grandezas de entrada X_M , utilizando um modelo matemático na forma: (LIMA,1999).

$$Y = f(X) \quad (2.10)$$

Onde:

$M \geq 1$ - é a quantidade de grandezas de entrada;

$X - \{X_1, X_2, \dots, X_M\}$ grandezas de entrada;

Y - é a grandeza de saída;

$f(X)$ - é a relação funcional.

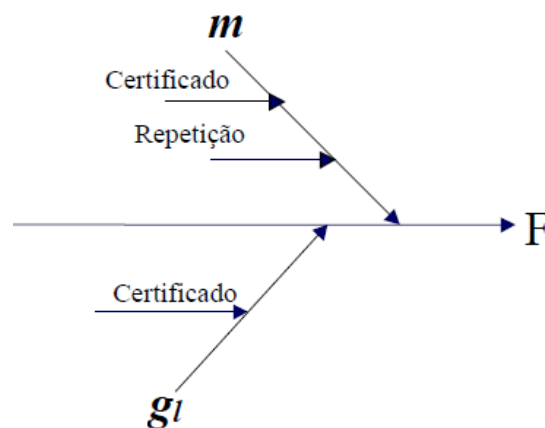
O valor estimado do mensurado Y , denotado como y , é obtido usando entradas estimadas $(x_1, x_2, \dots, x_M)$ das grandezas de entrada $(X_1, X_2, \dots, X_M)$ com isso pode-se escrever $y = f(x)$ (LIRA, 2008).

Essas grandezas de entrada podem ser facilmente identificadas a partir de um diagrama causa-efeito. Um exemplo segundo Couto (2008) foi a medição de uma força F (mensurado). Definindo como força F sendo o produto de uma massa (m) e a aceleração da gravidade local (g). Após a definição da equação do mensurando, se fez uso de um diagrama causa-efeito para a estimativa da incerteza de medição, como mostra Figura 14.

No exemplo feito por Couto (2008), o diagrama causa-efeito para a estimativa da incerteza de medição tinha as seguintes condições de contorno:

- i. o valor da grandeza massa foi obtido a partir de uma média de 10 leituras e cada repetição do valor de massa foi medido por uma balança contendo um certificado de calibração.
- ii. a aceleração da gravidade local proveniente de resultado de medição contido num certificado de calibração.

Figura 14 - Diagrama Causa – Efeito para determinar a incerteza de medição da força F



Fonte: COUTO, 2008

Com base na Figura 14, pode-se identificar as estimativas (fontes de incertezas) $(x_1, x_2, \dots, x_M)$ (certificado, repetição) das grandezas de entrada (X_1, X_2) (m, g).

2.4.2 Estimativa das Incerteza-padrão

As incertezas-padrão de cada fonte de incerteza $u(x_i)$, são estimadas em função da maneira como a fonte de entrada aparece para definir o mensurando (COUTO, 2008).

2.4.2.1 Avaliação Tipo A da Incerteza-padrão

A avaliação tipo A da incerteza-padrão é intrínseca ao processo de medição e é realizada através de um tratamento estatístico das variáveis de entrada (COUTO, 2008).

Quando as medições da grandeza de entrada x_i , apresentam condições de repetibilidade, uma das avaliações tipo A da incerteza padrão é:

$$u(x_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (2.11)$$

Onde:

$s(x_i)$ - desvio padrão de uma amostra;

n - número de medições repetidas da amostra;

Caso a amostra não apresente medições repetidas, considera-se $n = 1$.

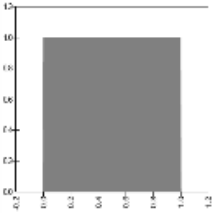
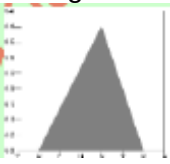
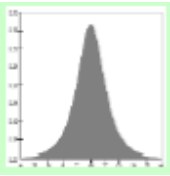
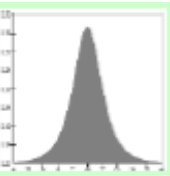
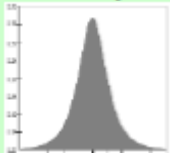
2.4.2.2 Avaliação Tipo B da Incerteza-padrão

A avaliação da incerteza tipo B pela incerteza- padrão tipo B de uma fonte de entrada é realizada quando a incerteza não se dá por meio estatísticos.

Uma das estimativas da incerteza-padrão Tipo B, $u(x_i)$, é realizada quando os valores de $u(x_i)$ têm uma determinada distribuição assumida e um intervalo de dispersão (COUTO, 2008).

Segundo Costa (2010), os casos mais comuns de distribuições estão listados na Tabela 3, sendo “a” um valor estimado/parâmetro das distribuições.

Tabela 3 - Principais distribuições e componentes de incerteza com seus respectivos valores

Tipos de Componentes de Incerteza	Distribuição de Probabilidade	Divisor	Valor da incerteza
Quando se conhecem apenas os valores máximos e mínimos de variação ($\pm a$): por exemplo, o erro máximo admissível para um determinado equipamento ou o efeito causado pela resolução finita do equipamento utilizado	Retangular 	$\sqrt{3}$	$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$
Quando se conhecem os valores máximos e mínimos de variação ($\pm a$) e o valor mais provável: por exemplo, o erro de posicionamento de um instrumento em uma marca de escala	Triangular 	$\sqrt{6}$	$u = \frac{a}{\sqrt{6}}$
Desvio padrão da média de um conjunto de N medições repetidas	t-Student 	$\sqrt{N}$	$u = \frac{s(x_i)}{\sqrt{N}}$
Desvio padrão de dados históricos de repetitividade e/ou reprodutibilidade, na situação em que o resultado do ensaio/calibração é obtido por meio de uma única medição e não por uma média	t-Student 	1	$u = s(x_i)$
Incerteza herdada da calibração de equipamentos e padrões	Normal ou t- Student, conforme certificado de calibração 	Valor de k informado no certificado de calibração	$u = \frac{U}{K}$

Fonte: Adaptado JORNADA, 2013

2.4.3 Propagação das Incertezas

De acordo com o GUM, propagação das incertezas é expressa por uma série de Taylor de primeira ordem (JCGM, 2008).

Com isso um mensurado expresso como uma função de N variáveis é mostrado na equação, que é definida como a expressão geral para propagação das incertezas (JCGM, 2008).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (2.12)$$

Onde:

$u_c(y)$ - incerteza padrão combinada do mensurando y ;

$u(x_i)$ - incerteza padrão associada com a variável de entrada x_i ;

$u(x_i, x_j)$ - covariância estimada, associada com x_i e x_j ;

$\frac{\partial f}{\partial x}$ - coeficiente de sensibilidade c_i .

O coeficiente de sensibilidade c_i , descrevem a variação das estimativas de saída y de acordo com mudanças nas estimativas de entrada $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ (JCGM, 2008).

Segundo JCGM (2008) segundo termo da equação expressa a correlação entre as fontes de incerteza. O grau de correlação é caracterizado pelo coeficiente de correlação, conforme a equação:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (2.13)$$

Onde:

$u(x_i)$ - incerteza tipo A das observações x_i ;

$u(x_j)$ - incerteza tipo A das observações x_j .

Com as grandezas estatisticamente correlacionadas ou dependentes a equação é dada:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \quad (2.14)$$

Com as grandezas estatisticamente não correlacionadas ou independentes a equação é dada:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) \quad (2.15)$$

2.4.4 Estimativa da Incerteza Expandida

Para estimar a incerteza expandida, é preciso determinar o fator de abrangência (k), esse fator é escolhido com base no nível de confiança (LIMA,1999).

No entanto, para obter o fator de abrangência (k_p) que delimita um intervalo correspondente a um nível de confiança (p) requer um estudo mais detalhado da distribuição de probabilidade (JCGM, 2008).

Essas distribuições de probabilidade das grandezas de entrada em vários casos são estimativas e com isso o nível de confiança não é conhecido com exatidão. Então se faz necessário o uso de aproximações para obter o fator de abrangência (JCGM, 2008). Na maioria dos casos o nível de confiança p tem como valor 95,45%.

Com base no JCGM (2018) a aproximação utilizada no GUM é usando do cálculo do número de graus de liberdade efetivos, pela fórmula de Welch-Satterthwaite, conforme mostra a equação:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_{ci}^4(y)}{v_i}} \quad (2.16)$$

Onde:

$u_c(y)$ - incerteza combinada;

v_i - grau de liberdade associado a cada fonte de incerteza;

Lima (1999) enfatizou para cada tipo de avaliação A ou B o valor do grau de liberdade.

Para as contribuições obtidas de avaliação do tipo A, o grau de liberdade a ser usado é $n - 1$ onde n é o tamanho amostral. Para as contribuições do tipo B os graus de liberdade devem ser estimados das informações disponíveis ou sobre a confiabilidade da estimação da incerteza padrão. Frequentemente é possível usar o número de graus de liberdade de uma contribuição do tipo B como infinito (∞) (LIMA, 1999, p.40).

O valor fator de abrangência (k_p) com base no v_{eff} é obtido a partir da Tabela

4.

Tabela 4 - Valor do fator de abrangência com base no grau de liberdade (veff)

Grau de liberdade ν	Fração p em porcentagem					
	68,27 ^{a)}	90	95	95,45 ^{a)}	99	99,73 ^{a)}
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,78
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,69	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

Fonte: Adaptado JCGM, 2008

A incerteza expandida é dada pela equação:

$$U = k_p \cdot u_c(y) \quad (2.17)$$

Onde:

U - incerteza expandida;

k_p - fator de abrangência;

$u_c(y)$ - incerteza combinada.

Após o desenvolvimento do método, a saída do GUM é dada pelo intervalo de abrangência para Y como: $y \pm U$.

Algumas dificuldades com relação ao método GUM devem ser ressaltadas e ter a devida importância.

Um cuidado que se deve ter em mente quando da aplicação deste método é com relação à qualidade de geração dos números aleatórios e ao tamanho da semente aleatória. Tais fatores impactam diretamente na qualidade do resultado da simulação (JORNADA e JORNADA, 2007).

Uma ênfase sobre essas dificuldades foi apresentada por Donatelli e Konrath (2005), que citou algumas peculiaridades como:

- complexidade conceitual;
- necessidade de construir um modelo matemático da medição;
- utilização de conceitos de probabilidade e estatística nem sempre claros para os profissionais da metrologia.

2.5 IDENTIFICAÇÃO DE OUTLIERS

Um outliers tem por definição um valor observado que aparenta ser inconsistente com os demais de um conjunto de dados (LIMA; MAROLDI; SILVA, 2013).

Inicialmente a identificação dos outliers era feita por uma observação, caso um valor de um conjunto de dados se distanciasse dos demais era considerado um outlier. Com passar dos anos, apareceu técnicas estatísticas para essa identificação, conhecido também como testes ou critérios, os testes mais utilizados são: Dixon, Chauvenet e Grubbs.

Com o desenvolvimento desses critérios houve uma facilidade para identificar as medições afetadas por algum tipo de erro.

2.5.1 Critério de Dixon

O teste de Dixon é também conhecido como teste-Q, avalia dados considerados suspeitos de pertencerem a uma mesma população. O valor Q de Dixon é definido como a relação entre a diferença existente entre o valor suspeito e o valor mais próximo a este e a diferença entre o maior e o menor valor do conjunto de medidas (FERREIRA, 2017).

A estatística de teste se baseia na comparação do valor Q de Dixon calculado com o valor Q de Dixon crítico (tabelado), a partir do seguinte procedimento:

- Ordenar os dados amostrais em ordem crescente;
- Calcular o valor de $Q_{\text{calculado}}$;

- Comparar com o valor crítico (tabelado) de Dixon

O teste de Dixon analisa os valores extremos, ou seja, mínimo e máximo valor do conjunto, por isso se faz necessário colocar os dados do conjunto em ordem crescente. O valor de $Q_{\text{calculado}}$ é encontrado de acordo com a equação da Tabela 5, essa equação depende da quantidade de dados da amostra.

Dado um conjunto de n dados x_i ($i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$) em ordem crescente, o critério de Dixon analisará o x_1 e x_n (extremos).

Tabela 5 - Equação para calcula Q

Tamanho da amostra	$Q_{\min}$	$Q_{\max}$
3 a 7	$\frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1}$	$\frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}$
	$x_2 - x_1$	$x_n - x_{n-1}$
8 a 12	$\frac{x_2 - x_1}{x_{n-1} - x_1}$	$\frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2}$
	$x_3 - x_1$	$x_n - x_{n-2}$
13 a 40	$x_{n-2} - x_1$	$x_n - x_3$

Fonte: Adaptado de FERREIRA, 2017

Após calcular o valor de $Q_{\text{calculado}}$ ($Q_{\min}$, $Q_{\max}$) esse valor será comparado com o $Q_{\text{crítico}}$ de Dixon da Tabela 6, caso $Q_{\min}$ seja maior que o $Q_{\text{crítico}}$, o valor x_1 é considerado um outlier e seguindo a ideia $Q_{\max}$ maior que $Q_{\text{crítico}}$ o valor x_n é considerado um outlier.

A Tabela 6 mostra os valores de $Q_{\text{crítico}}$ de Dixon com níveis de confiança, 95% e 99%.

Tabela 6 - Valores de $Q_{\text{crítico}}$ de Dixon

Tamanho da Amostra	$Q_{\text{crítico}}$ (95%)	$Q_{\text{crítico}}$ (99%)
3	0,970	0,994
5	0,710	0,821
10	0,530	0,635
15	0,565	0,647
20	0,489	0,567

Fonte: Adaptado de FERREIRA, 2017

2.5.2 Critério de Chauvenet

O teste de Chauvenet é utilizado para verificar a existência de valores aberrantes presentes na amostra. Primeiro é preciso encontrar a média aritmética dos valores da amostra juntamente com seu desvio padrão. O desvio médio de cada valor

é comparado com desvio padrão multiplicado pela constante de Chauvenet da Tabela 7, como na equação 2.18.

Dado um conjunto de n dados x_i ($i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$).

$$|x_i - \bar{x}| > k \cdot s \quad (2.18)$$

Onde:

x_i - valor medido;

$\bar{x}$ - média do conjunto de dados;

k - constante de Chauvenet;

s - desvio padrão do conjunto de dados.

Se a equação for verdadeira, então o x_i é considerado um outlier. Cada aplicação do teste só encontra 1 outlier, então deve-se retirar esse outlier e refazer o teste, até que se encontre todos os outliers da amostra.

A Tabela 7 apresenta a constante de Chauvenet para uma confiabilidade de 95%.

Tabela 7- Valores para Constante de Chauvenet	
Tamanho da Amostra	Constante de Chauvenet
3	1,38
5	1,64
10	1,96
20	2,24
30	2,39

Fonte: Adaptado de FERREIRA, 2017

2.5.3 Critério de Grubbs

O teste de Grubbs como o de Dixon analisa o mínimo e máximo de um conjunto de dados. O teste é analisado encontrando o $G_{\text{calculado}}$ pela equação (2.19), esse $G_{\text{calculado}}$ é comparado com o $G_{\text{crítico}}$ da Tabela 8, caso o $G_{\text{calculado}}$ seja maior que o $G_{\text{crítico}}$ o valor máximo e/ou mínimo é considerado outlier. Quando teste de Grubbs identifica algum outlier, esse outlier é retirado e se faz novamente o teste até encontrar todos os outliers da amostra.

$$G_{\text{calculado}} = \frac{|x_{\text{mín/máx}} - \bar{x}|}{s} \quad (2.19)$$

Onde:

$x_{\text{mín/máx}}$ - valores máximos e mínimo do conjunto de dados

$\bar{x}$ - média do conjunto de dados;

s - desvio padrão do conjunto de dados.

Tabela 8 - Valores de $G_{\text{crítico}}$ de Grubbs

Tamanho da Amostra	$G_{\text{crítico}}$ (95%)	$G_{\text{crítico}}$ (99%)
3	1,155	1,155
5	1,715	1,764
10	2,290	2,482
20	2,709	3,001
30	2,908	3,236

Fonte: Adaptado de FERREIRA, 2017

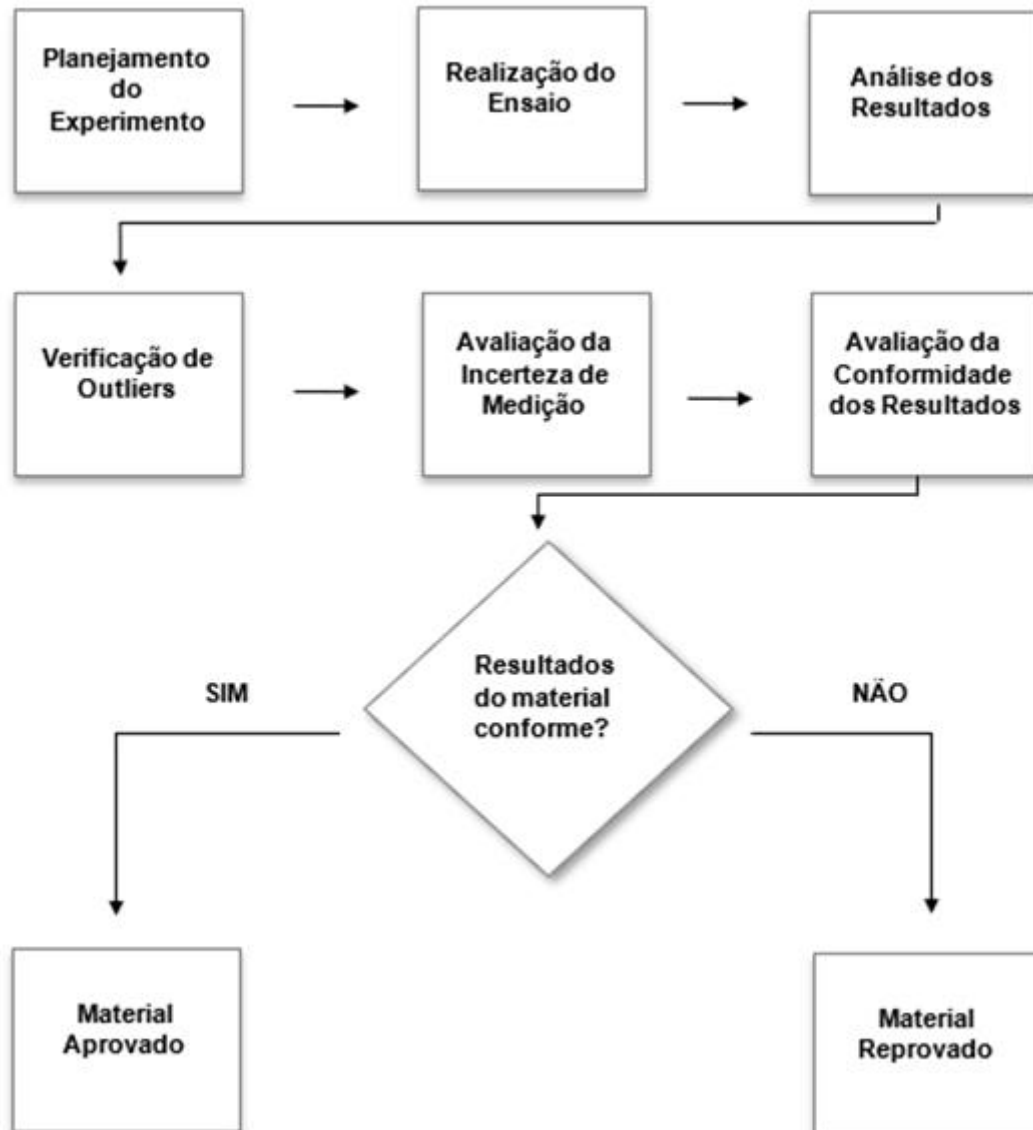
3 METODOLOGIA

Esse capítulo será abordado as etapas realizadas para o desenvolvimento do trabalho, partindo da realização do ensaio até a obtenção dos limites de incerteza expandida calculados pelo ISO GUM.

3.1 FLUXOGRAMA RESUMIDO DA METODOLOGIA

A Figura 15 apresenta um fluxograma resumido dos processos realizados no trabalho.

Figura 15 - Fluxograma resumido das etapas do trabalho



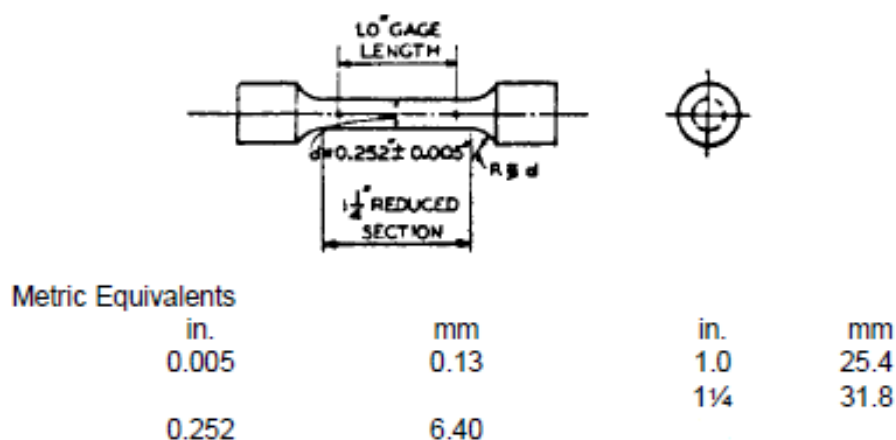
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO DE TRAÇÃO

O material escolhido como o objeto deste trabalho foi o ferro fundido nodular, vindo de uma única remessa, de uma indústria da região. Dessa remessa foram retiradas 20 amostras para o ensaio de tração e o desenvolvimento do presente trabalho.

Os corpos de prova foram desenvolvidos com base na norma ASTM A 536-84, como mostra a Figura 16.

Figura 16 - Corpo de Prova



Fonte: ASTM A 536 – 84, 2009

O ensaio de tração foi realizado numa máquina universal de ensaios de marca INSTRON e modelo 8801 que possui carga máxima de 100KN, resolução de 0,005 KN e incerteza herdada 0,25 KN e fator de abrangência $k=2$.

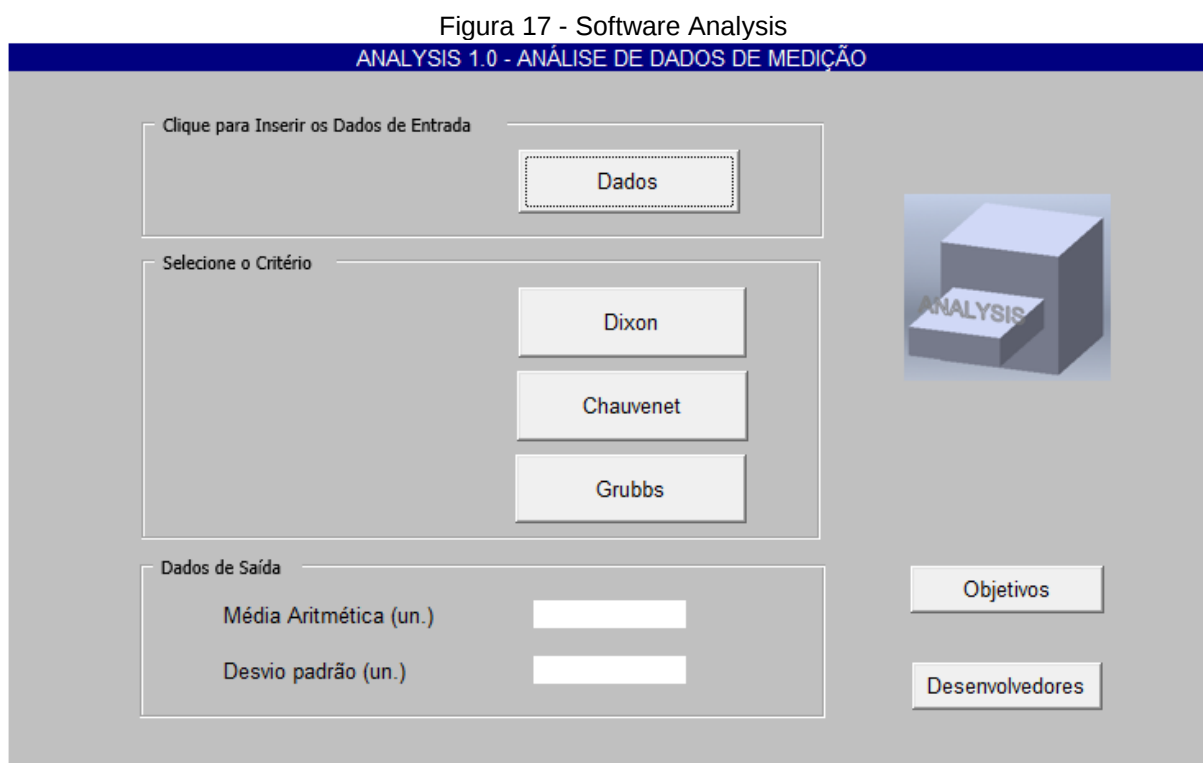
As dimensões do corpo de prova foram medidas utilizando um paquímetro analógico de marca Mitutoyo com resolução 0,02mm, incerteza herdada de valor 0,02 mm e fator de abrangência $k=2$.

O ensaio ocorreu a uma taxa 1mm/min, e temperatura de 23 ° C, monitorada por um termo higrômetro de marca Cotrinic Technology e resolução 0,1 °C.

3.3 VERIFICAÇÃO DE OUTLIERS

As medições dispersas, também chamados de outliers foram determinados com bases nos critérios estatísticos como Dixon, Chauvenet e Grubbs. Esses critérios foram avaliados com o auxílio do Analysis, um software criado por pesquisadores do Instituto Federal de Pernambuco, representado na imagem da Figura 17.

O software funciona da seguinte maneira, clicando em Dados, adiciona-se a quantidade de valores de entrada, após isso os valores são inseridos um por um. Finalizando a entrada dos valores, basta clicar no botão dos critérios e automaticamente aparecerá na tela os valores que devem ser excluídos.



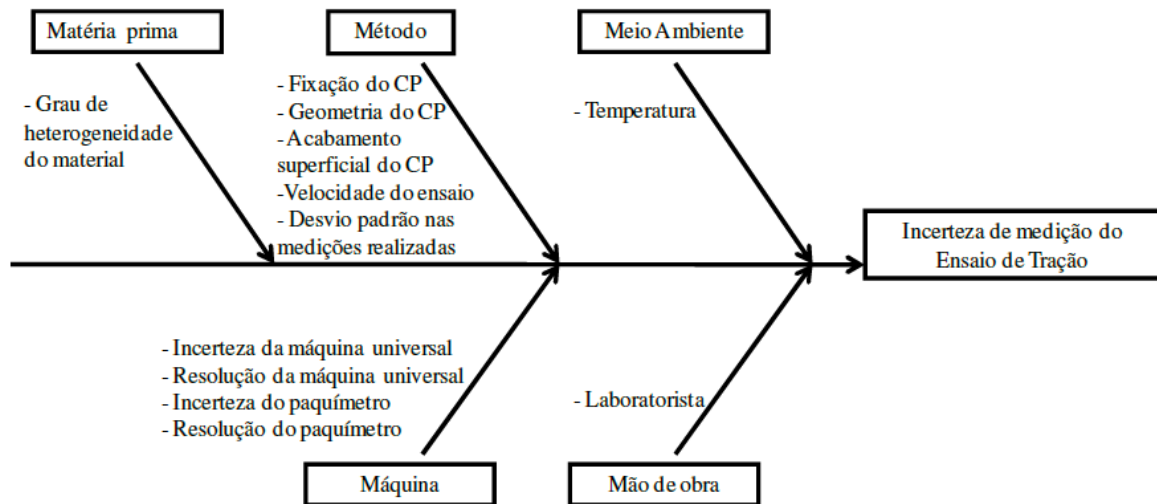
Fonte: Print screen da aplicação

3.4 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Após as medições e a verificação dos outliers, iniciou-se o processo de identificação das grandezas de entrada, bem como as fontes de incerteza que podem influenciar o resultado do ensaio de tração.

O diagrama de causa – efeito apresentado na Figura 18, mostra o levantamento das principais fontes de incerteza envolvidas com o ensaio de tração.

Figura 18 - Diagrama Causa – Efeito do ensaio de tração



Fonte: DOMENEGHETTI, 2011

Tendo em vista o diagrama da Figura 18, os cálculos de incerteza, foram desenvolvidos considerando as estimativas das grandezas de entrada: incerteza herdada da máquina, resolução da máquina, incerteza herdada do paquímetro, resolução do paquímetro, todas essas do tipo B e a repetibilidade (baseado no desvio padrão) do tipo A.

A equação 3.1 detalha essas estimativas de grandezas de entrada.

$$y = f(R, i_m, r_m, i_p, r_p) \quad (3.1)$$

Onde:

R - repetibilidade;

i_m - incerteza herdada da máquina;

r_m - resolução da máquina;

i_p - incerteza herdada do paquímetro;

r_p - resolução do paquímetro.

A equação para o desenvolvimento dos cálculos das incertezas para as tensões, é dada por:

$$\sigma = \frac{F - r_m - i_m}{\frac{\pi * (D - r_p - i_p)^2}{4}} \quad (3.2)$$

Onde:

F - média da carga relacionada a tensão;

D - diâmetro do corpo de prova.

A equação para desenvolvimento dos cálculos das incertezas para a deformação, será dada por:

$$\varepsilon = \left(\frac{\delta}{L_i - r_p - i_p} \right) * 100\% \quad (3.3)$$

Onde:

δ - média dos alongamentos;

L_i - comprimento inicial.

3.4.1 Equação do Coeficiente de Sensibilidade

A equação do coeficiente de sensibilidade para as incertezas, corresponde a derivada parcial das equações 3.2 e 3.3.

O coeficiente de sensibilidade para máquina será dado pela equação abaixo.

$$c_m = \frac{4}{\pi * (D - r_p - i_p)^2} \quad (3.4)$$

Como o paquímetro influencia no cálculo da incerteza das tensões e da deformação, então para cada parâmetro, existe o seu respectivo coeficiente de sensibilidade.

O coeficiente de sensibilidade do paquímetro para incerteza das tensões é dado pela equação abaixo.

$$c_p = \frac{8 * (F - r_m - i_m)}{\pi * (D - r_p - i_p)^3} \quad (3.5)$$

Já para a deformação é dado por:

$$c_p = \left(\frac{\delta}{(L_i - r_p - i_p)^2} \right) * 100\% \quad (3.6)$$

3.5 AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE DOS RESULTADOS

Essa etapa de avaliação da conformidade dos resultados foi conduzida a partir da comparação entre os resultados obtidos e o estabelecido em norma técnica (ASTM A 536-84).

A norma tem como característica apresentar os limites inferiores para as propriedades mecânicas. Neste sentido, o valor do limite de escoamento, que na norma é de 379 MPa, o limite de resistência de 552 MPa e deformação de 6%, representam o mínimo valor permitido, ou seja, valores acima dos que são apresentados nas normas são tidos como conformes.

Na Tabela 9 mostra os valores mínimos permitidos para as propriedades analisadas neste trabalho.

Tabela 9 - Valores encontrados na norma técnica	
Parâmetros do Ensaio de Tração	Mínimo
Limite de Escoamento	379MPa
Limite de Resistência	552MPa
Deformação	6%

Fonte: Elaborado pelo Autor

4 RESULTADOS

Nesse capítulo será discutido os resultados das medições obtidos no ensaio de tração juntamente com a avaliação da incerteza de medição e a avaliação da conformidade.

4.1 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES E VERIFICAÇÃO DOS OUTLIERS

Os resultados das medições encontrados no ensaio de tração estão apresentados na Tabela 10, junto com suas médias e desvios padrão.

Na verificação da existência de outliers, utilizando o software Analysis, constatou-se que dentro dos critérios apresentados, apenas o teste de Chauvenet exibiu um outlier nas medidas do limite e resistência, esse outlier foi identificado na amostra 20 (sublinhado) e removido dos cálculos da média, desvio-padrão e incerteza.

Tabela 10 - Resultados obtidos pela máquina de ensaio

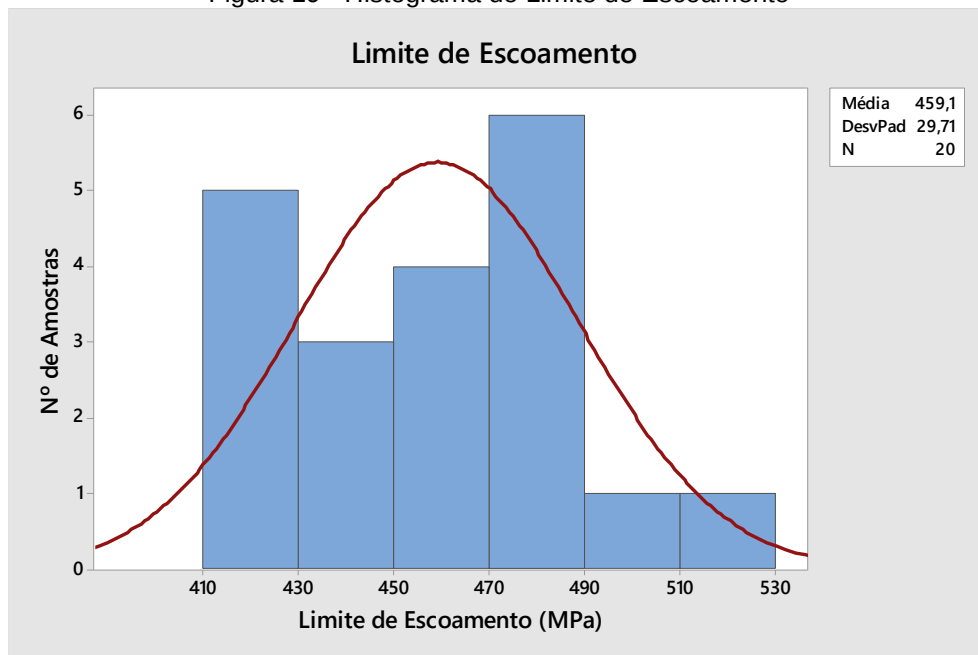
Amostra	Limite de Escoamento (MPa)	F _{esc} (KN)	Limite de Resistência (MPa)	F _{máx} (KN)	Deformação (%)	Alongamento (mm)
1	418,68	13,47	624,46	20,09	9,78	2,44
2	488,50	15,71	680,75	21,90	4,12	1,03
3	466,10	14,99	668,11	21,49	8,08	2,02
4	484,75	15,59	721,81	23,22	8,21	2,05
5	469,65	15,11	716,42	23,05	6,32	1,58
6	498,48	16,04	755,57	24,31	6,46	1,62
7	474,55	15,27	721,99	23,23	8,03	2,01
8	423,19	13,61	601,75	19,36	11,49	2,87
9	455,77	14,66	699,86	22,51	4,70	1,18
10	456,43	14,68	705,28	22,69	8,06	2,02
11	438,93	14,12	669,34	21,53	7,67	1,92
12	426,39	13,72	632,78	20,36	9,54	2,38
13	419,27	13,49	586,78	18,88	9,65	2,41
14	483,19	15,54	702,28	22,59	4,83	1,21
15	446,28	14,36	656,90	21,13	9,42	2,36
16	489,17	15,74	723,97	23,29	4,79	1,20
17	430,87	13,86	652,53	20,99	7,90	1,97
18	480,76	15,47	708,41	22,79	5,35	1,34
19	419,16	13,48	596,52	19,19	9,33	2,33
20	511,85	16,47	<u>820,47</u>	<u>26,39</u>	6,22	1,56
Média	459,09	14,77	675,02	21,72	7,49	1,87
Désvio Padrão	29,70	0,96	48,87	1,57	2,06	0,51

Fonte: Elaborado pelo autor

As Figuras 19, 20 e 21 apresentam a distribuição dos resultados de limite de escoamento, limite de resistência e deformação, respectivamente. Os gráficos dessas

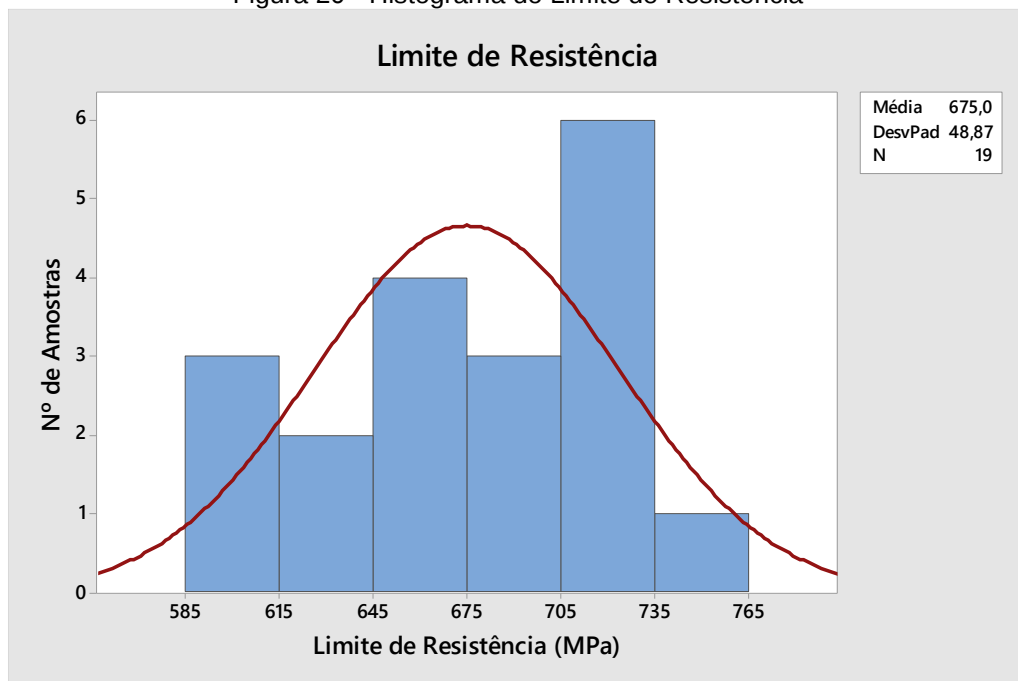
figuras permitem a análise da distribuição dos resultados do ensaio.

Figura 19 - Histograma do Limite de Escoamento



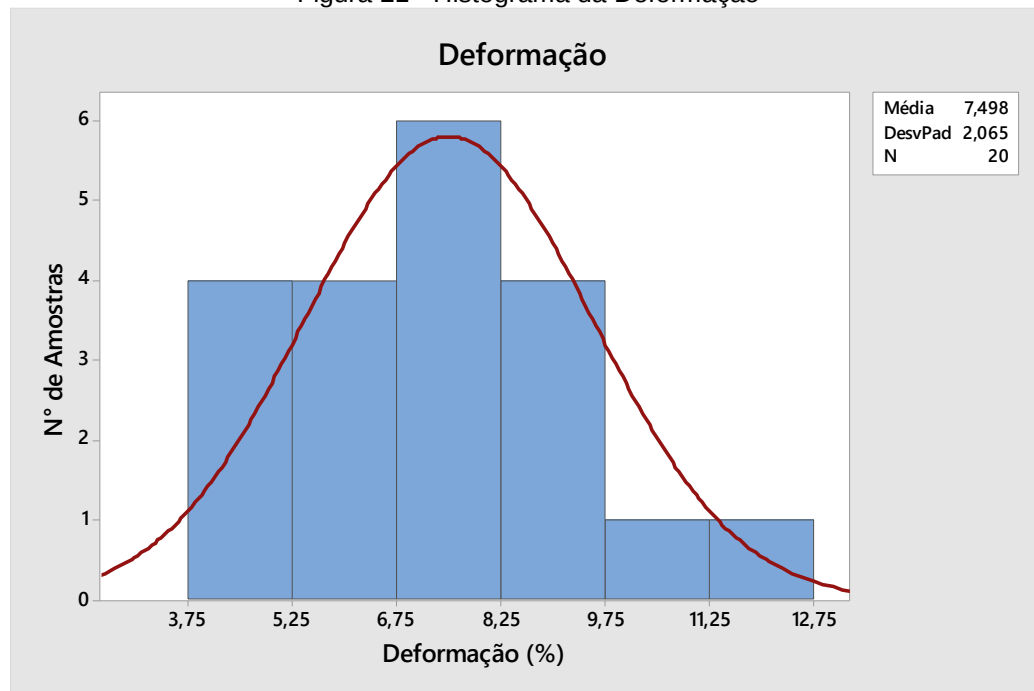
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20 - Histograma do Limite de Resistência



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21 - Histograma da Deformação



Fonte: Elaborado pelo autor

Destes gráficos podemos identificar que na Figura 19, o intervalo que apresenta maior frequência de resultados é o de 470 – 490 MPa e o que apresenta menor frequência é o de 490 – 530 MPa. Para a Figura 20 a maior frequência está no intervalo de 705 – 735 MPa e a menor frequência no intervalo de 735 – 765 MPa. Na Figura 21 esses intervalos estão entre 6,75 – 8,25 % e 9,75 – 12,75 %, respectivamente.

4.2 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Para essa avaliação foram definidas inicialmente as fontes de incerteza capazes e influenciar no resultado da medição da máquina de ensaio. Foram consideradas as seguintes fontes de incerteza: repetibilidade, resolução da máquina e do paquímetro e incerteza herdada da máquina e do paquímetro.

A repetibilidade é uma incerteza estatística, que leva em consideração o desvio padrão e pode ser caracterizada como do tipo A. A resolução é tipo B com distribuição de probabilidade retangular e a incerteza herdada pela calibração também do tipo B, porém com distribuição normal, como pode ser visto na Tabela 11.

Tabela 11 - Fontes de Incerteza do mensurando

Fonte de Incerteza	Tipo de Incerteza	Distribuição
Repetibilidade	A	Normal
Resolução da Máquina	B	Retangular
Resolução do Paquímetro	B	Retangular
Incerteza Herdada da Máquina	B	Normal
Incerteza Herdada do Paquímetro	B	Normal

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dessas fontes de incerteza, se pode aplicar o método ISO GUM descrito para calcular a incerteza de medição de cada um dos parâmetros definidos no trabalho. São eles: limite de escoamento, limite de resistência e deformação.

4.2.1 Limite de Escoamento

Com base nas equações 3.2, 3.4, 3.5, definidas na metodologia, e a teoria já vista sobre o ISO GUM, os resultados obtidos para as fontes de incerteza estão representados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultado das fontes de incerteza do limite de escoamento

Fonte de Incerteza	Valor	Divisor	Incerteza Padrão $u(x_i)$	Coefficiente de Sensibilidade (c_i)	Grau de Liberdade (v_i)
Repetibilidade (MPa)	29,71	1	29,71	1	19
Resolução da Máquina (N)	5	$\sqrt{3}$	2,89	0,03	∞
Resolução do Paquímetro (mm)	0,02	$\sqrt{3}$	0,0115	143,67	∞
Incerteza Herdada da Máquina (N)	250	2	125	0,03	∞
Incerteza Herdada do Paquímetro (mm)	0,02	2	0,01	143,67	∞

Fonte: Elaborado pelo autor

Após concluir o preenchimento da Tabela 12, pode-se dar continuidade para encontrar a incerteza de medição associada ao limite de escoamento.

O fator de abrangência foi determinado com um nível de confiança de 95,45%.

A Tabela 13 mostra o resultado da incerteza de medição para o limite de escoamento, bem como incerteza combinada, grau de liberdade e fator e abrangência.

Tabela 13 - Resultado para o Limite de Escoamento

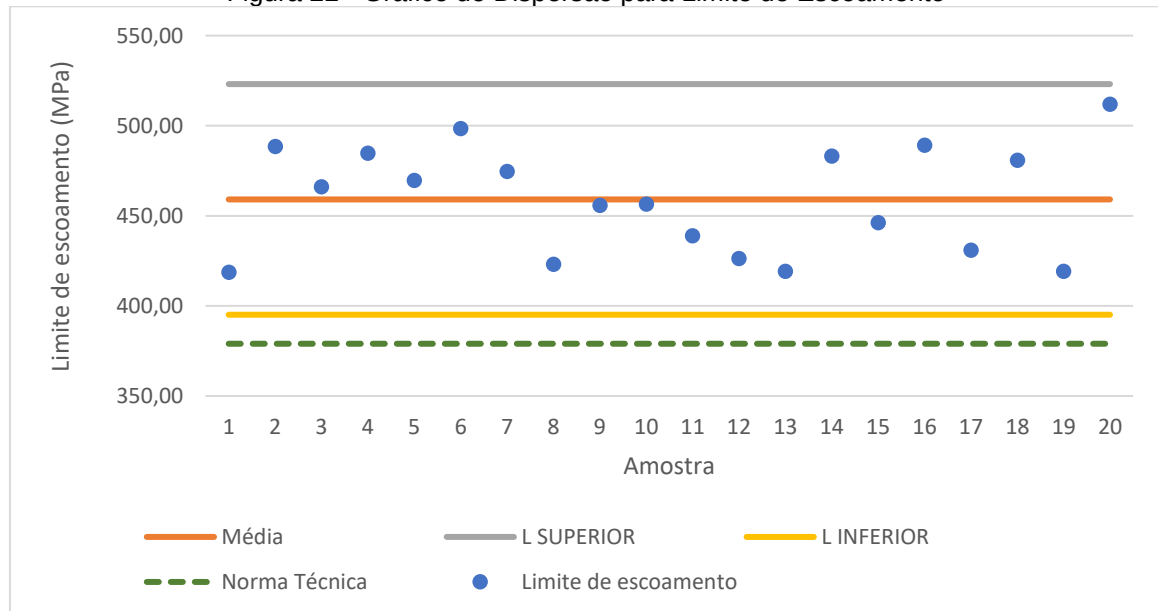
Incerteza Combinada $u_c(y)$ (MPa)	ν_{eff}	Fator de Abrangência (k)	Incerteza Expandida (U) (MPa)
30,02	20	2,13	64

Fonte: Elaborado pelo Autor

Com isso, a melhor representação da estimativa do mensurado é dado $y = 459,09 \pm 64$ MPa.

A Figura 22 mostra um gráfico de dispersão com o limite superior e inferior da incerteza, valor da norma técnica (linha tracejada) e a distribuição dos resultados nesse intervalo.

Figura 22 - Gráfico de Dispersão para Limite de Escoamento



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando o gráfico de dispersão da Figura 22, pode-se observar que os valores para o limite de escoamento, ficaram dentro dos limites calculados. Essa figura também permite fazer a comparação dos resultados com o especificado na norma técnica (valor apresentado na linha tracejada), que neste caso apresenta valores sempre superiores ao estabelecido na norma, ou seja, em conformidade.

4.2.2 Limite de Resistência

Para o limite de resistência foram utilizadas as mesmas equações aplicadas para os cálculos do limite de escoamento.

Os cálculos para o limite de resistência foram aplicados sem a presença da amostra número 20 (outlier).

A Tabela 14 apresenta o balanço do ISO GUM para as fontes de incerteza.

Tabela 14 - Resultado das fontes de incerteza do limite de resistência					
Fonte de Incerteza	Valor	Divisor	Incerteza Padrão $u(x_i)$	Coefficiente de Sensibilidade (c_i)	Grau de Liberdade (v_i)
Repetibilidade (MPa)	48,87	1	48,87	1	18
Resolução da Máquina (N)	5	$\sqrt{3}$	2,89	0,03	∞
Resolução do Paquímetro (mm)	0,02	$\sqrt{3}$	0,0115	212,47	∞
Incerteza Herdada da Máquina (N)	250	2	125	0,03	∞
Incerteza Herdada do Paquímetro (mm)	0,02	2	0,01	212,47	∞

Fonte: Elaborado pelo autor

Após o desenvolvimento da Tabela 14, pôde-se dar continuidade para encontrar a incerteza expandida para o limite de resistência.

A Tabela 15 mostra o resultado da incerteza de medição, bem como a incerteza combinada, grau de liberdade e fator de abrangência.

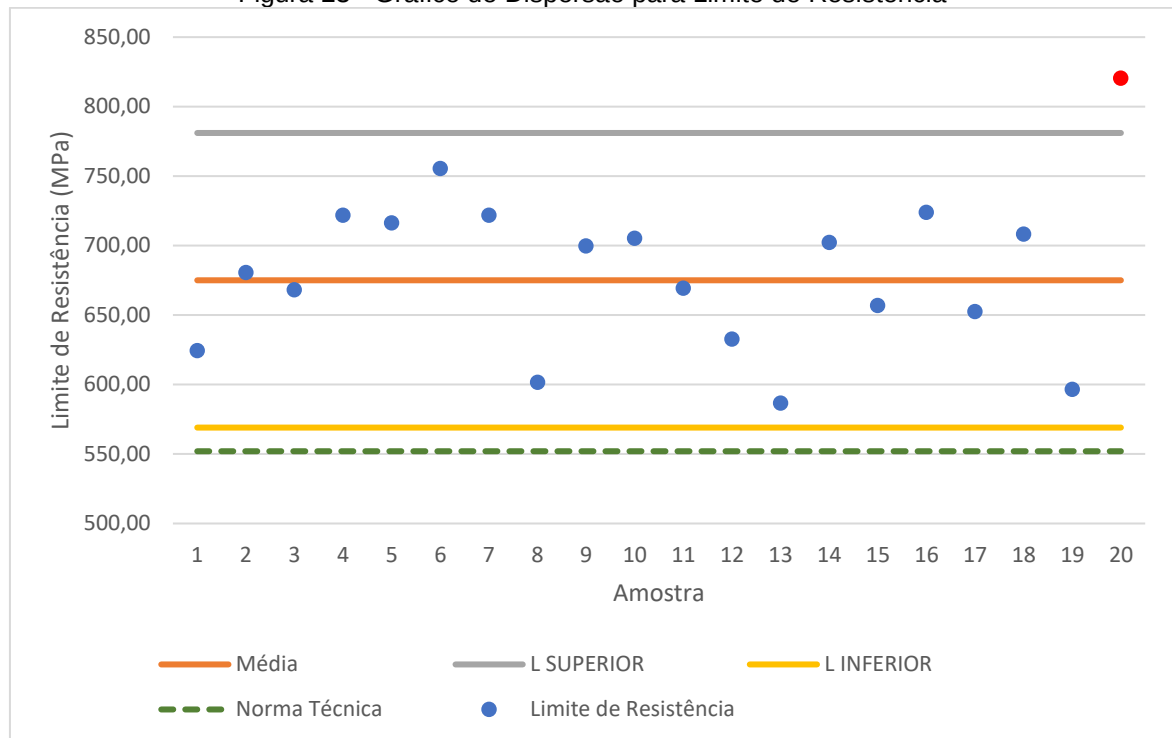
Tabela 15 - Resultado para o Limite de Resistência			
Incerteza Combinada $u_c(y)$ (MPa)	v_{eff}	Fator de Abrangência (k)	Incerteza Expandida U (MPa)
49,12	18	2,15	106

Fonte: Elaborado pelo autor

Com isso a estimativa para limite de resistência é dada por: $y = 675,02 \pm 106$ MPa.

O gráfico de dispersão da Figura 23, detalha o limite superior e inferior da incerteza, valor da norma técnica (linha tracejada) e a distribuição dos resultados nesse intervalo.

Figura 23 - Gráfico de Dispersão para Limite de Resistência



Analisando o gráfico da Figura 23, observa-se que o valor da amostra 20 (outlier) que se encontrar em vermelho ficou fora do intervalo dos limites de incerteza e os demais valores ficaram dentro desses limites. Nessa mesma figura, pode-se perceber também que todos os valores estão superiores ao especificado na norma, estando em conformidade.

4.2.3 Deformação

A avaliação da incerteza para deformação seguiu as etapas já calculadas nos tópicos anteriores. Existe uma diferença nas fontes de incerteza, que segundo a equação 3.6, não se fez necessário a utilização a resolução e da incerteza da máquina. As fontes de incerteza junto com os resultados dos cálculos aplicados do ISO GUM estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultado das fontes de incerteza da deformação

Fonte de Incerteza	Valor	Divisor	Incerteza Padrão $u(x_i)$	Coeficiente de Sensibilidade (c_i)	Grau de Liberdade (v_i)
Repetibilidade (%)	2,06	1	2,06	1	19
Resolução do Paquímetro (mm)	0,02	$\sqrt{3}$	0,0115	0,3	∞
Incerteza Herdada do Paquímetro (mm)	0,02	2	0,01	0,3	∞

Fonte: Elaborado pelo autor

Após o desenvolvimento da Tabela 16, pôde-se dar continuidade para encontrar a incerteza de medição para a deformação.

A Tabela 17 mostra o resultado da incerteza de medição, bem como a incerteza combinada, grau de liberdade e fator de abrangência.

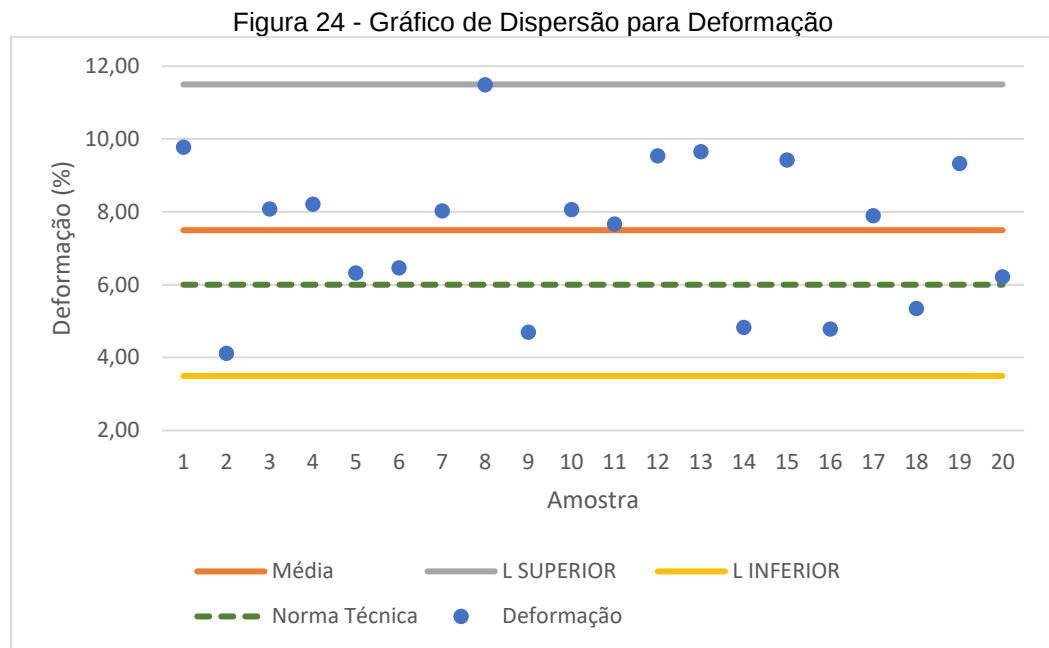
Tabela 17 - Resultado para a deformação

Incerteza Combinada $u_c(y)(\%)$	v_{eff}	Fator de Abrangência (k)	Incerteza Expandida $U (\%)$
2,06	19	2,14	4

Fonte: Elaborado pelo autor

A estimativa para o mensurado é dada por: $y = 7,49 \pm 4 \%$.

O gráfico de dispersão da Figura 24, detalha o limite superior e inferior da incerteza, valor da norma técnica e a distribuição dos resultados nesse intervalo.

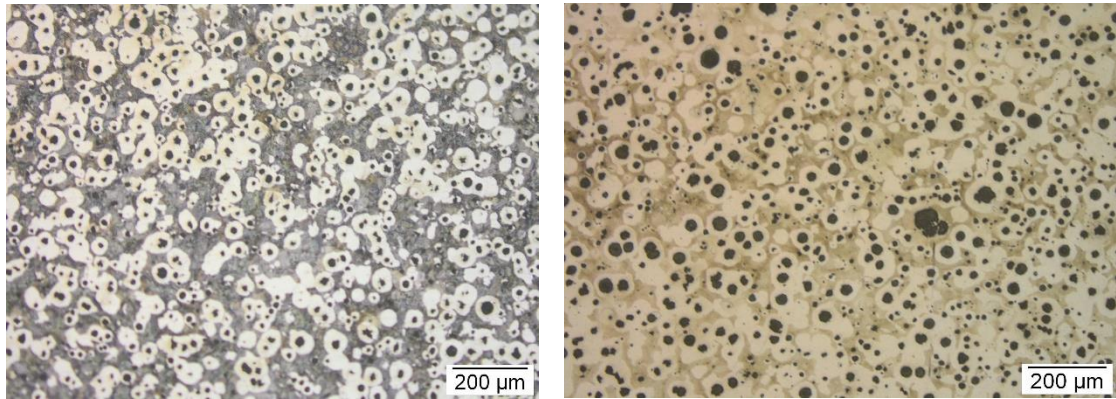


Analisando a Figura 24, percebe-se que os valores ficaram dentro dos limites calculados, porém alguns desses valores medidos ficaram abaixo do limite inferior estabelecido pela norma. Neste caso, as amostras 2, 9, 14, 16 e 18 ficaram fora do padrão de conformidade estabelecido neste trabalho. Para essa situação, se faz necessário um estudo mais específico do material, já que as não-conformidades encontradas podem ser provenientes de materiais de diferentes remessas.

Apesar da maioria dos resultados se apresentarem dentro dos padrões da norma de ferro fundido nodular, se fazendo uma análise mais detalhada, verifica-se que existem desvios consideráveis entre os resultados obtidos. Esses desvios podem ser oriundos da dispersão que existe ao se analisar a distribuição e aglomeração dos nódulos pequenos de grafita (grafita tipo V e VI) (VIDAL, 2013).

A Figura 25 mostra a microscopia de dois corpos de prova que exhibe a distribuição aleatória dos nódulos de grafita.

Figura 25 - Microscopia de dois corpos de prova



Fonte: Elaborado pelo Autor

Conforme a análise de Guesser (2009) a microestrutura esferoidal pode ter impacto nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular, isso se dá pela dispersão da grafita em relação ao seu formato esferoidal ideal. A microestrutura esferoidal e a aglomeração dos nódulos são possíveis fatores para os resultados do ensaio de tração apresentarem diferença entre as amostras.

A própria repetibilidade dos resultados pode ser afetada por este fenômeno. Uma sugestão apresentada por Beckert et al. (2015) para uma análise de medição de um ensaio de tração, é a aplicação da metodologia R&R não-replicável, não abordado neste texto.

5 CONCLUSÃO

Ao fim das discussões e resultados levantados, é importante trazer algumas considerações gerais sobre este trabalho. Primeiramente, vale o reforço ao propósito da análise da conformidade dos resultados das medições com base na norma ASTM A 536-84 e na avaliação da incerteza de medição. Este exercício contribui para o desenvolvimento científico, industrial e mercadológico ao enxergar procedimentos de medição, possibilitando melhorias nessas áreas.

Na avaliação da incerteza de medição pela metodologia ISO GUM os valores das incertezas, se apresentaram coerentes para os parâmetros do ensaio, com resultados das medições dentro dos limites de incerteza expandida.

Ao abordar a conformidade com relação a norma técnica utilizada, os valores também ficaram conformes. Porém no parâmetro deformação, alguns valores ficaram fora do especificado pela norma. Para esse caso se faz necessário um estudo mais detalhado, uma vez que a presença de nódulos no material pode influenciar no resultado dos parâmetros analisados.

O trabalho utilizou cinco fontes de incerteza, são elas: repetibilidade, resolução do paquímetro e da máquina, incerteza do paquímetro e da máquina e a metodologia se mostrou eficiente. A realização do ensaio obteve resultados conformes, segundo a análise da conformidade realizada.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aplicar a metodologia do R&R não-replicável, após essa aplicação pode-se fazer uma comparação com a metodologia apresentada no texto. Levantando novos resultados e discursões para os parâmetros do ensaio de tração.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A 536 -84: Standard Specification for Ductile Iron Castings**, USA, 2009.

BAYER, P. S. **Ensaaios dos materiais**. 2013. Disponível em: <<http://www.joinville.ifsc.edu.br/~paulosergio/Ensaaios%20dos%20Materiais/Apostila%20de%20Ensaaios%20dos%20Materiais.pdf>>. Acesso em: 03 jan.2019.

BECKERT, S. F. *et al.* **Análise dos Sistemas de Medição (MSA) aplicada às medições não replicáveis: um estudo de caso no ensaio de tração**. 8º Congresso Brasileiro de Metrologia, Bento Gonçalves/RS, 2015. Disponível em: <http://media.metrologia2015.org.br/media/uploads/trabalhos/final-sueliFB-RS.pdf>. Acesso em: 1 maio 2019.

CABRAL, P. **Erros e incertezas nas medições**. 2004. Disponível em: <<http://www.peb.ufrj.br/cursos/ErrosIncerezas.pdf>>. Acesso em: 08 jan.2019.

CALLISTER JR, W. D., **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. Editora LTC, 5. Edição, Rio de Janeiro, 2002.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**, 7ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, 2012.

COSTA, L.P. **Avaliação da Incerteza de Medição no Levantamento de Curvas de Fadiga S-N de Materiais Metálicos a temperatura ambiente**. 2010. 64 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/29415>>. Acesso em: 20 jan. 2019.

COUTO, P. R. G. **A Estimativa da Incerteza de Medição pelos Métodos do ISO GUM 95 e de Simulação de Monte Carlo**. [S.l.],2008. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/metcientifica/mecanica/pdf/ISOGUM95_MonteCarlo.pdf>. Acesso em: 14 jan.2019.

DIETER, G. E, **Mechanical Behavior Under Tensile and Compressive Loads**. In:AMERICAN SOCIETY FOR MATERIAL, ASM Handbook, Mechanical Testing and Evaluation, Ohio, ASM International, vol.08, 2000.

DOMENEGHETTI, G. **A Expressão da Incerteza de Medição em Ensaaios Mecânicos: ISO GUM e Monte Carlo aplicados no Ensaio de Tração**. 2011. 58,59 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior Tupy, Joinville, 2011. Disponível em: <http://unisociesc.com.br/app/uploads/2018/05/027_dissertacoes2.pdf>. Acesso em: 02 jan. 2019.

DONATELLI, G. D.; KONRATH, A. C. **Simulação de Monte Carlo na avaliação de incertezas de medição**. Revista de Ciência e Tecnologia, 2005. Disponível em: <<https://chasqueweb.ufrgs.br/~valner.brusamarello/comp1.pdf>>. Acesso em: 14 jan.2019.

EURACHEM/CITAC. **Guia EURACHEM/CITAC Determinando a Incerteza na Medição Analítica**. Segunda. [S.I.], 2002. Disponível em: <<http://www.quimlab.com.br/PDF-art/Guia%20Eurachem%20em%20Portugu%EAAs.pdf>>. Acesso em: 14 jan.2019.

HOLT, J. M, **Uniaxial Tension Testing**. In: AMERICAN SOCIETY FOR MATERIAL, ASM Handbook, Mechanical Testing and Evaluation, Ohio, ASM International, vol.08, 2000.

FERREIRA, A. L. **Comparação de diferentes técnicas para detecção e tratamento de outliers na determinação de fatores de medidores**. 2017. Dissertação - Portifca Universade Catolica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/33040/33040.PDF>. Acesso em: 4 fev. 2019.

FREDEL, M. C.; ORTEGA, P.; BASTOS, E. **Propriedades mecânicas: ensaios fundamentais**. 2011. Disponível em: <<http://cermat.ufsc.br/wp-content/uploads/2015/03/APOSTILA-DO-LABORATORIO-DE-PROPRIEDADES-MEC-160315.pdf>>. Acesso em: 15 jan.2019.

GUESSER, W L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**, 1ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

JCGM. **Avaliação de dados de medição — Guia para a expressão de incerteza de medição**. [S.I.], 2008. JCGM 100:2008. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/gum_final.pdf>. Acesso em: 04 jan.2019.

JORNADA, D. H., JORNADA, F. H. **Cálculo de Incerteza de Medição: Estudo Comparativo entre os Métodos do GUM, de Monte Carlo e de Integração Numérica**. Congresso da Qualidade em Metrologia- Rede Metrológica do Estado de São Paulo - REMESP 11 a 14 de junho de 2007. Disponível em: <<https://chasqueweb.ufrgs.br/~valner.brusamarello/comp2.pdf>>. Acesso em: 04 jan. 2019.

JORNADA, D. H. **Incerteza de Medição: Guia Prático do Avaliador de Laboratórios**. Rede Metrológica RS, 2013. Disponível em: <http://www.redemetrologica.com.br/uploads/pages/15/1405816078_DOC_128.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2019.

JUNIOR., A. A. G.; SOUZA, A. R. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. [S.I.]: Manole, 2008. Disponível em: <<https://www.ebah.com.br/content/ABAAAfelQAE/fundamentos-metrologia-cientifica-industrial-armando-albertazzi>>. Acesso em: 04 jan.2019.

LIMA, L. G. **As incertezas das medições: pontos críticos e simplificações para a metrologia dimensional na indústria**. 1999. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara D'Oeste, 1999. Disponível em: <https://www.unimep.br/phpg/bibdig/pdfs/docs/25052012_160628_luis_gonzaga_de_lima.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2019.

LIMA, L. F. M.; MAROLDI, A. M.; SILVA, D. V. O. da. **Outlier(s) nos cálculos bibliométricos: primeiras aproximações**. Liinc em Revista, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p.257–268, 2013. Disponível em: <<http://revista.ibict.br/liinc/article/view/3398/2986>>. Acesso em: 23 jan. 2019.

LIMA JR, P. et al. **O laboratório de mecânica**. Porto Alegre: IF-UFRGS, 2012. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/fis1258/index_arquivos/TXT_02.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2019.

LIRA, F. A. **Metrologia na Indústria**. 6. ed. Sao Paulo: Erica Ltda, 2008. 246 p.

PARIS, A. A. F. **Tecnologia Da Soldagem De Ferros Fundidos**. 1. ed. [S.l.]: UFSM, 2013. 144 p. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/cristiano_scheuer/tecnologia-da-soldagem-de-ferros-fundidos>. Acesso em: 02 jan. 2019.

ROSÁRIO, A. M. **Estudo dos Efeitos de elementos de liga na solidificação de um ferro fundido cinzento via análise térmica**. 2012. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de MATERIAIS) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2012. Disponível em: <<http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/1448>>. Acesso em: 03 jan. 2019.

SANTO, A. B. S. **A Utilização de Cobre em Ferros Fundidos**. Conaf, 2007. Disponível em: <<http://foundrygate.com/upload/artigos/A%20UTILIZA%C3%87%C3%83O%20D E%20COBRE%20EM%20FERROS%20FUNDIDOS%20NODULARES.doc>>. Acesso em: 04 jan. 2019.

SILVA, B. C. de A. **Estudo das Incertezas na Medição de espessura por Ultrassom em peças aeronáuticas**. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://dippg.cefet-rj.br/ppemm/attachments/article/81/15_Bruno%20Cesar%20de%20Andrade%20Silva.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2019.

SOBRAL, M. D. C.; OLIVEIRA, D. G. R. **Tecnologia dos materiais**. 2009. Disponível em: <http://www.ifba.edu.br/metalografia/arq/apostila_sem_i_2009.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2019.

SOUSA, G. G. P.; JR, L. S. **Aplicação da Simulação de Monte Carlo no Cálculo da Incerteza de Medição**. Extensão em Ação, Fortaleza, 2016. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufc.br/extensaoemacao/article/view/3832>>. Acesso em: 14 jan. 2019.

VIDAL, D.F. **Análise de Estrutura e Propriedades Mecânicas de um Ferro Fundido Nodular em Processo de Fundição Produzido pela Técnica de Imersão de Sino**. Dissertação – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2013. Disponível em: < <http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/AN%C3%81LISE-DE-ESTRUTURA-E-PROPRIEDADES-MEC%C3%82NICAS-DE-UM-FERRO-FUNDIDO-NODULAR-EM-PROCESSO-DE-FUNDI%C3%87%C3%83O-PRODUZIDO-PELA-T%C3%89CNICA-1.pdf>>. Acesso em: 03 jan.2019.

VIM. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados** (VIM 2012). Duque de Caxias, RJ, 2012. Disponível em: < http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>. Acesso em: 14 jan.2019.