

FLAVIO SOARES PEREIRA

**ANÁLISE DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO PARA NÃO REPLICÁVEIS -
ENSAIOS DE TRAÇÃO UNIAXIAL EM MATERIAIS METÁLICOS**

São Paulo
2012

FLAVIO SOARES PEREIRA

**ANÁLISE DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO PARA NÃO REPLICÁVEIS -
ENSAIOS DE TRAÇÃO UNIAXIAL EM MATERIAIS METÁLICOS**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do certificado de
Especialista em Gestão e Engenharia
da Qualidade - MBA / USP

Orientador:
Prof. Dr. Adherbal Caminada Netto

São Paulo
2012

DEDICATÓRIA

**Dedico a todos os envolvidos com Qualidade
em nossas organizações**

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Larissa de Freitas Vieira, que durante todo esse tempo me apoiou e sempre acreditou na importância da minha formação em nossas vidas.

Ao professor Adherbal Caminada Netto, pela orientação e entusiasmo que expõe em todas as suas aulas.

Ao professor Gilberto Francisco Martha de Souza pelas importantes considerações prestadas na revisão e melhoria deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho que foram fundamentais para que esse trabalho fosse concluído.

A Usiminas - Cubatão por apoiar a minha especialização na área de gestão e engenharia da qualidade.

Ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo por dispor de um quadro de professores tão marcantes na formação de seus alunos.

RESUMO

A Análise dos Sistemas de Medição, conhecido pela sigla em inglês: *MSA*, são atividades importantes para qualquer Sistema de Gestão da Qualidade, pois buscam a determinação da variabilidade que os sistemas de medição impõe sobre os dados coletados durante a mensuração dos processos e testes de certificação dos produtos finais. As diretrizes para condução do *MSA* são descritas em seu manual técnico, publicado no Brasil pelo Instituto da Qualidade Automotiva (IQA), e possui foco em técnicas para sistemas replicáveis de medição. Os sistemas não replicáveis de medição, como os ensaios destrutivos, são previstos no manual de referência, porém abordados superficialmente. O presente trabalho tem como objetivo a descrição de um método para a realização da análise dos sistemas de medição em ensaios de tração uniaxial em materiais metálicos, exemplificando técnicas para a determinação da homogeneidade das amostras e a exposição dos resultados das variáveis de localização e das variáveis de dispersão do sistema de medição. Foram obtidos resultados satisfatórios sobre a tendência, linearidade, estabilidade, repetitividade e reprodutibilidade entre duas máquinas de tração utilizadas para a certificação da qualidade de produtos siderúrgicos.

Palavras-chave: Análise dos Sistemas de Medição. *MSA*. Sistemas não replicáveis. Ensaios de Tração.

ABSTRACT

The Measurement Systems Analysis, MSA, are important activities for any Quality Management System, because seeks the variability determination that the measurement systems implies over the data acquired within processes and certification testing of final products. The guidance for conduct the MSA are described on its reference manual, published by the Automotive Industry Action Group (AIAG), and highlight techniques for replicable measurement systems. The non-replicable measurement systems, as destructive testing, although cited on the manual, lack of information. The objective of the present work is to describe a method to execute the measurement system analysis over tensile testing of metallic materials showing techniques for testing of sufficient homogeneity on samples and the location and width variations. It were achieved satisfactory results of bias, linearity, stability, repeatability and reproducibility between two tensile machines used to certificate the quality of steel products.

Keywords: Measurement System Analysis, MSA, Non-replicable Systems, Tensile Testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do funcionamento de uma máquina de tração (CALLISTER, 2007)	20
Figura 2 - Comportamento característico da representação gráfica de um ensaio de tração (CALLISTER, 2007).....	21
Figura 3 - Comportamento da transição entre o regime elástico e plástico de um material metálico sob tração. (a) representa uma transição contínua e (b) representa uma transição descontínua (CALLISTER, 2007).	23
Figura 4 - Amostragem da chapa utilizada no trabalho (dimensões em milímetros). ..	26
Figura 5 - Divisão das amostras em corpos de prova.....	27
Figura 6 - Dimensões dos corpos de provas utilizados nesse estudo, exceto para o estudo de linearidade.	27
Figura 7 - Dados históricos para o limite de escoamento do material ASTM A36 nos últimos seis meses de produção, valores em MPa.	30
Figura 8 - Dados históricos para o limite de resistência do material ASTM A36 nos últimos seis meses de produção, valores em MPa.	30
Figura 9 - Dimensões dos corpos de provas utilizados no estudo de linearidade.....	39
Figura 10 - Representação da torção que o processo de corte por tesoura guilhotina causou nas tiras utilizadas nos corpos de provas.....	50
Figura 11 - Valores de referência determinados para o limite de resistência, valores em MPa.....	51
Figura 12 - Cartas de controle da amostragem da homogeneidade das amostras...	52
Figura 13 - Representação gráfica da tendência e linearidade para a Máquina 1.	56
Figura 14 - Representação gráfica da tendência e linearidade para a Máquina 2	61
Figura 15 - Percentual das variáveis de dispersão sobre a variação total (VT)	65
Figura 16 - Cartas de controle da estabilidade para a Máquina 1	67
Figura 17 - Cartas de controle da estabilidade para a Máquina 2	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de especificação dos requisitos mecânicos do aço ASTM A36 ...	25
Tabela 2 - Comparativo entre o erro relativo e a incerteza expandida das máquinas de ensaios	28
Tabela 3 - Valores do desvio-padrão de critério para a avaliação da homogeneidade.	31
Tabela 4 - Valores das áreas nominais dos corpos de provas utilizados no estudo de linearidade.....	39
Tabela 5 - Critérios de aceitação para a repetitividade e reprodutibilidade combinadas.....	43
Tabela 6 - Valores das constantes utilizadas no cálculo dos limites das cartas de controle	44
Tabela 7 - Dados coletados para o teste de homogeneidade do limite de escoamento das amostras, valores em MPa	45
Tabela 8 - Valores críticos do teste estatístico de Cochran para duplicatas (ISO, 1994).....	46
Tabela 9 - Dados coletados para o teste de homogeneidade do limite de resistência das amostras, valores em MPa	48
Tabela 10 - Valores da tendência para a carga central e Máquina 1	53
Tabela 11 - Valores da tendência para a carga inferior e Máquina 1.....	54
Tabela 12 - Valores da tendência para a carga superior e Máquina 1.....	55
Tabela 13 - Valores da tendência para a carga central e Máquina 2.....	57
Tabela 14 - Valores da tendência para a carga central e Máquina 2, após a calibração do equipamento.....	58
Tabela 15 - Valores da tendência para a carga inferior e Máquina 2.....	59
Tabela 16 - Valores da tendência para a carga superior e Máquina 2.....	60
Tabela 17 - Dados de Repetitividade e Reprodutibilidade para a Máquina 1.	62
Tabela 18 - Dados de Repetitividade e Reprodutibilidade para a Máquina 2.	62
Tabela 19 - Dados coletados para a estabilidade de ambas as máquinas, valores em MPa.....	66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 SOBRE A ANÁLISE DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO	14
2.1 AS VARIÁVEIS DE LOCALIZAÇÃO.....	15
2.2 AS VARIÁVEIS DE DISPERSÃO.....	15
2.3 REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE NOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO (GR&R).....	16
2.4 A ANÁLISE DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO REPLICÁVEIS	18
2.5 A ANÁLISE DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO NÃO REPLICÁVEIS.....	18
3 SOBRE O ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL.....	20
3.1 O LIMITE DE ESCOAMENTO.....	22
3.2 O LIMITE DE RESISTÊNCIA	24
4 MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL.....	25
4.2 PLANEJAMENTO DA AMOSTRAGEM.....	26
4.3 MÁQUINAS DE TRAÇÃO	28
4.4 DETERMINAÇÃO DA HOMOGENEIDADE DAS AMOSTRAS.....	28
4.4.1 Método 01 - relatório técnico da IUPAC.....	31
4.4.2 Método 02 - norma ISO 13528	34
4.5 DETERMINAÇÃO DA TENDÊNCIA E LINEARIDADE	37
4.5.1 Cálculo da tendência	37
4.5.2 Critério de aceitação da tendência	38

4.5.3 Determinação da linearidade.....	38
4.6 DETERMINAÇÃO DA REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE	39
4.6.1 Critérios de aceitação da repetitividade e reprodutibilidade combinadas (GR&R)	43
4.7 DETERMINAÇÃO DA ESTABILIDADE	43
4.7.1 Cálculo dos limites de controle para a média:	43
4.7.2 Cálculo dos limites de controle para a amplitude:	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1 HOMOGENEIDADE DAS AMOSTRAS	45
5.1.1 Teste para o limite de escoamento	45
5.1.2 Teste para o limite de resistência	47
5.2 TENDÊNCIA E LINEARIDADE	53
5.2.1 Tendência para carga central e Máquina 1.....	53
5.2.2 Tendência para carga inferior e Máquina 1	54
5.2.3 Tendência para carga superior e Máquina 1	55
5.2.4 Tendência para carga central e Máquina 2.....	57
5.2.5 Tendência para carga inferior e Máquina 2	59
5.2.6 Tendência para carga superior e Máquina 2	60
5.3 REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE	61
5.4 ESTABILIDADE	65
6 CONCLUSÕES	69
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
8 REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

Para que as empresas se mantenham financeira e tecnologicamente eficazes, em um mercado cada vez mais competitivo, são necessárias ações de melhoria em seus processos para que estes sejam mais estáveis e apresentem menor variabilidade, desta forma reduzindo os custos inerentes aos mesmos. Atualmente existe uma gama de ferramentas específicas para o planejamento e execução das ações de melhoria como as ferramentas utilizadas nos projetos Seis Sigma (BOWER, 2003). Para que essas ações de melhoria tenham o resultado esperado, os processos são controlados e monitorados através de medições que expressem o comportamento das características críticas que afetem diretamente a variabilidade dos mesmos. As próprias normas de sistema de gestão da qualidade como a ISO 9001 e ISO/TS 16949 (ABNT, 2010) possuem requisitos explícitos para o controle e monitoramento dos processos (LIMA, FERREIRA *et al.*, 2010) tanto na fase de projeto quanto na fase de produção propriamente dita.

Desta forma são necessários sistemas de medição em várias etapas dos processos. Os dados obtidos por estes sistemas de medição são a base para a tomada de decisões nas ações de melhoria. Assim, a qualidade dos dados coletados são de extrema importância dentro das organizações. A confiabilidade dos dados pode gerar impactos significativos no desempenho financeiro das organizações. Pode-se citar o caso das normas regulamentadoras (KÄLLGREN, LAUWAARS *et al.*, 2003) que exigem legalmente limites para características de alguns produtos que afetam a vida e o meio-ambiente. Sistemas de medições de baixa confiabilidade podem levar a uma recusa de produtos que atendam os limites destas características, ou pior, aprovar produtos suspeitos que possam causar danos irreversíveis tanto para a organização quanto para a comunidade.

Para que as organizações consigam determinar se os seus dados são confiáveis os seus sistemas de medição devem ser avaliados. Quanto mais precisa é a medição mais confiável é o controle do processos (GAWLIK e REWILAK, 1999). A análise dos sistemas de medição é um conjunto de ferramentas estatísticas que verificam e atestam a conformidade dos sistemas de medições e, portanto a confiabilidade dos dados obtidos ao longo dos processos. A análise dos sistemas de

medição são mais conhecidas pela sigla originária da língua inglesa M.S.A - *Measurement System Analysis*. O M.S.A. foi desenvolvido pelo Grupo de Trabalho de Análise do Sistema de Medição sob o patrocínio do *Automotive Industry Action Group (AIAG)*. Suas origens datam da década de 1980 (AIAG, 2010) com o crescimento do controle estatístico de processos (C.E.P.) dentro das organizações Norte-americanas. Porém, a literatura sobre metrologia (RUGGERI, KENETT *et al.*, 2007a) já publicava referências sobre a preocupação com a precisão dos sistemas de medição desde a década de 1930.

A medição tem como objetivo determinar o valor de uma grandeza. O sistema de medição é o conjunto dos procedimentos e dispositivos, ou instrumentos, de medição. Qualquer sistema de medição sofre variações originárias da variabilidade natural dos seus próprios componentes. As fontes de variação são inúmeras (SPIERS, 1989) e incluem o observador, o equipamento, o método e o meio-ambiente. A análise do sistema de medição permite a estimativa do erro de medição, das fontes dos erros, a verificação da estabilidade do sistema de medição ao longo do tempo e a capacidade do sistema em medir o processo.

O próprio manual de referência do M.S.A. (AIAG, 2010) tem o foco nos sistemas de medição onde as leituras possam ser replicadas em cada peça. Isso quer dizer que a característica mensurada da peça não é alterada após a realização da medição. Este mesmo manual prevê a utilização das ferramentas estatísticas em sistemas de medição não replicáveis como os existentes em ensaios destrutivos, porém fornece poucas informações de como conduzir os estudos nesses casos. O presente trabalho tem como objetivo preencher a lacuna sobre os sistemas de medição não replicáveis com a descrição de um estudo para a análise do sistema de medição em máquinas de tração uniaxial utilizadas em organizações que realizam ensaios mecânicos para a certificação de seus produtos. A exposição do experimento visa abordar técnicas para a determinação da estabilidade, linearidade, tendência, repetitividade e reprodutibilidade das máquinas de tração.

2 SOBRE A ANÁLISE DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Toda vez que são realizadas medições nos processos produtivos dentro das organizações o resultado que observamos é a combinação das variabilidades do produto e do sistema de medição, conforme a equação abaixo:

$$\sigma_{processo}^2 = \sigma_{produto}^2 + \sigma_{medição}^2 \quad (1)$$

A eq.(1) mostra que quanto maior a variabilidade do sistema de medição maior será a expressão da variabilidade do processo em questão.

Toda a análise do sistema de medição tem como objetivo quantificar a variabilidade do sistema de medição, $\sigma_{medição}^2$, e indicar a necessidade de ações caso seja comprovado que essa variabilidade comprometa uma grande parcela da variabilidade total mensurada, $\sigma_{processo}^2$. Sempre que os sistemas de medição são avaliados deve-se levar em consideração três questões fundamentais (AIAG, 2010):

- o sistema de medição deve demonstrar sensibilidade adequada;
- o sistema de medição deve ser estável;
- as propriedades estatísticas como localização e dispersão devem ser capazes com relação aos limites de especificação do produto ou processo.

A primeira etapa de análise de um sistema de medição é a execução de um experimento estatístico para avaliar as variáveis de localização do sistema: tendência e linearidade. A segunda etapa é a execução de um experimento estatístico para avaliar as variáveis de dispersão: repetitividade e reprodutibilidade. E por último o monitoramento contínuo do próprio sistema de medição para a verificação de sua estabilidade ao longo do tempo.

Para uma boa análise do sistema de medição este deve ser avaliado em condições reais de processo (GAWLIK e REWILAK, 1999). Desta forma é possível determinar se o sistema de medição é afetado pelo operador que o está utilizando, se as condições ambientais tem influência significativa em sua capacidade e, se o sistema de medição possui capacidade de detectar mudanças nos processo.

2.1 AS VARIÁVEIS DE LOCALIZAÇÃO

As variáveis de localização estão associadas com a exatidão de medição conforme a definição descrita no Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2008): "grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro de um mensurando". Dentro da análise dos sistemas de medição divide-se as variáveis de localização em três componentes (AIAG, 2010; (RUGGERI, KENETT *et al.*, 2007a):

1. Tendência: diferença entre a média das medições observadas e o valor de referência;
2. Linearidade: mede como a mudança no tamanho do mensurando afeta a tendência do sistema de medição ao longo da faixa de operação, ou amplitude do processo;
3. Estabilidade: é a variação da tendência ao longo do tempo.

2.2 AS VARIÁVEIS DE DISPERSÃO

As variáveis de dispersão estão associadas com a precisão de medição conforme a definição descrita no Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO, 2008): "grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas". Dentro da análise dos sistemas de medição divide-se as variáveis de dispersão em duas componentes (AIAG, 2010; (RUGGERI, KENETT *et al.*, 2007a):

1. Repetitividade: variabilidade do sistema de medição quando uma mesma característica de uma mesma peça é medida diversas vezes pelo mesmo operador. A variação entre sucessivas medições feitas sob condições fixas e definidas. É a variação dentro do sistema;

2. Reprodutibilidade: variação das médias das medições feitas por diferentes avaliadores, utilizando um mesmo instrumento de medição, enquanto medindo uma mesma característica de uma mesma peça. É denominada como a variação entre sistemas, e pode incluir, além dos avaliadores, a variação entre dispositivos de medição, laboratórios ou ambientes.

2.3 REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE NOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO (GR&R)

Enquanto as variáveis de localização apenas evidenciam a conformidade do sistema de medição em realizar medições próximas aos valores de referência e ao longo da amplitude do processo, as variáveis de dispersão estão diretamente relacionadas com a variação do sistema de medição, conforme a equação abaixo:

$$\sigma_{\text{medição}}^2 = \sigma_{\text{GR\&R}}^2 = \sigma_{\text{reprodutibilidade}}^2 + \sigma_{\text{repetitividade}}^2 \quad (2)$$

onde $\sigma_{\text{GR\&R}}^2$, é a variação do sistema de medição; $\sigma_{\text{reprodutibilidade}}^2$ e $\sigma_{\text{repetitividade}}^2$ são a reprodutibilidade e a repetitividade do mesmo, respectivamente.

Portanto o GR&R é uma estimativa da variação combinada entre a repetitividade e reprodutibilidade. Isso quer dizer que a grandeza denominada GR&R consiste na combinação da variação do instrumento, dentro do sistema, e a variação dos avaliadores, entre sistemas (GAWLIK e REWILAK, 1999). Essa dispersão da medição pode ser decomposta em três componentes da variância (RUGGERI, KENETT *et al.*, 2007b):

$$\sigma_{\text{GR\&R}}^2 = \sigma_o^2 + \sigma_{po}^2 + \sigma_e^2 \quad (3)$$

onde σ_o^2 é a variância atribuída as diferenças sistemáticas entre os operadores; σ_{po}^2 é a variância resultante da diferença adicional entre operadores por objeto; e σ_e^2 é o erro restante da variância. A repetitividade é representada por σ_e^2 , e $(\sigma_o^2 + \sigma_{po}^2)$ representa a reprodutibilidade.

Os estudos clássicos de GR&R tem uma configuração típica de, p , peças escolhidas aleatoriamente e medidas independentemente por, r , vezes por cada, o , operador (MAST e TRIP, 2005). Desta forma é possível estimar cada variância descrita na eq.(3). Apesar destes estudos recomendarem a utilização de mais de uma peça, o experimento para o cálculo do GR&R não necessita da presença de mais de uma peça, pois não produz inferências sobre a variação peça-a-peça (RUGGERI, KENETT *et al.*, 2007b). Para esses casos a variância resultante da diferença adicional entre operadores por objeto, σ_{p0}^2 , é igual a zero. Desta forma a da eq.(3) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\sigma_{GR\&R}^2 = \sigma_o^2 + \sigma_e^2 \quad (4)$$

e , portanto, reprodutibilidade é representada apenas pela variância atribuída as diferenças sistemáticas entre os operadores, σ_o^2 .

2.4 A ANÁLISE DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO REPLICÁVEIS

O experimento padrão para a análise dos sistemas de medição é indicado para sistemas replicáveis. Os sistemas replicáveis são baseados em suposições sobre as características estatísticas das medições. Essas suposições são (RUGGERI, KENETT *et al.*, 2007b):

- a. A tendência é constante para cada medição dentro da faixa de medição, linearidade, e constante com o tempo, estabilidade;
- b. A variação é independente da peça medida. O erro é homogêneo;
- c. O valor verdadeiro da peça é constante no tempo durante um intervalo de tempo relevante. A característica da peça não se altera com o tempo;
- d. A característica medida da peça não é afetada pela medição.

2.5 A ANÁLISE DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO NÃO REPLICÁVEIS

Os sistemas não replicáveis são caracterizados quando uma das duas suposições, c ou d, descritas anteriormente, não são verdadeiras. No caso descrito para esse trabalho a suposição, c, é verdadeira, pois a característica da peça não se altera com o tempo. Porém a suposição, d, é falsa, uma vez que o ensaio é destrutivo, e a característica da peça é alterada após a medição. Para ensaios destrutivos esse problema fundamental pode ser resolvido com a substituição da suposição, d, por suposições alternativas que tem o mesmo efeito prático (RUGGERI, KENETT *et al.*, 2007b). Essas suposições alternativas são (MAST e TRIP, 2005):

- e. As peças são homogêneas. As peças podem ser consideradas idênticas para o estudo de medição;
- f. O estudo pode ser realizado em peças alternativas em que a suposição, e, é verdadeira e apresenta a mesma distribuição de probabilidade;

- g. A variação das peças pode ser modelada por uma função com um número limitado de parâmetros;
- h. Existe um método alternativo não destrutivo, replicável, para a medição;
- i. Existe um método alternativo perfeitamente destrutivo e com o valor de referência conhecido. Substituição das peças por padrões conhecidos.

Mesmo com a substituição da suposição, d, por uma das suposições alternativas, e até i, os sistemas não replicáveis, geralmente, levam a uma superestimação da precisão do sistema de medição (HAN e HE, 2007). Isso deve-se ao fato de que qualquer variação das peças será atribuída erroneamente à precisão do sistema de medição. Essa superestimação da dispersão do sistema de medição possui dois pontos de vista para a tomada de decisões. Primeiro, se a estimativa da dispersão do sistema de medição é satisfatória a dispersão do valor verdadeiro também será. Segundo, com o aumento da dispersão do sistema de medição há a chance do mesmo se julgado inadequado erroneamente.

Esse trabalho baseia-se na comprovação da suposição, e, para a realização da análise do sistema de medição. Desta forma pretende-se identificar um lote de peças com características suficientemente semelhantes que possam ser consideradas como a mesma peça (GORMAN e BOWER, 2002).

3 SOBRE O ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

O ensaio de tração uniaxial pode ser considerado o ensaio mecânico mais comum para a avaliação do comportamento tensão x deformação de um determinado material. Os dados obtidos nos ensaios de tração são exaustivamente utilizados nos projetos de engenharia, principalmente para caracterização de materiais utilizados em projetos estruturais. A maioria dos produtos metálicos produzidos dentro de usinas siderúrgicas são comercializados com base nas propriedades mecânicas de tração que os mesmos apresentam. Existem inúmeras normas internacionais com a finalidade de padronizar e auxiliar o comércio desses produtos metálicos, especificando limites para cada variável obtida com a realização dos ensaios de tração.

O ensaio de tração consiste em alongar um corpo de prova até que ocorra a sua ruptura. As extremidade do corpo de prova são presas por garras existentes na máquina de ensaio. Essas garras são afastadas, uma em relação a outra, na mesma direção do eixo do corpo de prova a uma velocidade constante. Durante o alongamento do corpo de prova a máquina de ensaio registra a carga aplicada e o deslocamento relativo entre as garras. Um exemplo esquemático do funcionamento do equipamento é representado na Figura 1.

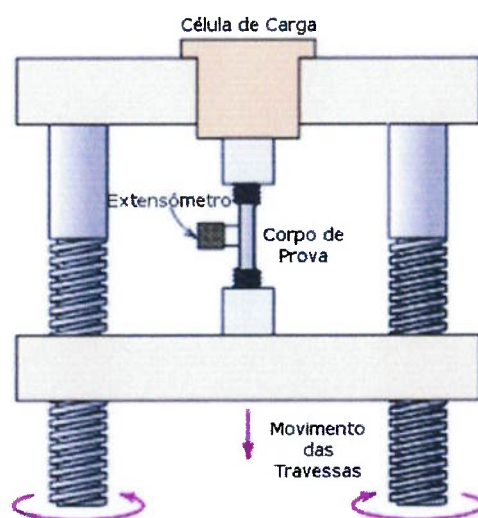


Figura 1 - Representação do funcionamento de uma máquina de tração (CALLISTER, 2007)

Os dados obtidos são representados de forma gráfica, eixo da ordenada expressando a tensão e o eixo da abscissa expressando a deformação, e possuem um comportamento característico, no caso de trações uniaxiais, em materiais metálicos, representado pela Figura 2.

A tensão descrita nesse ensaio é conhecida como tensão de engenharia e é definida por (CALLISTER, 2007):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (5)$$

onde F é a força aplicada perpendicularmente a seção transversal do corpo de prova e sua unidade é definida em newtons (N); A_0 é a área inicial da seção transversal do corpo de prova anterior a aplicação da força e sua unidade é definida em (m^2). A razão entre N e m^2 dá a origem a unidade de medida de tensão, Pascal (Pa). No caso dos ensaios de tração em materiais metálicos é comum a tensão ser representada em megapascals, MPa, onde $1 \text{ MPa} = 10^6 \frac{N}{m^2}$.

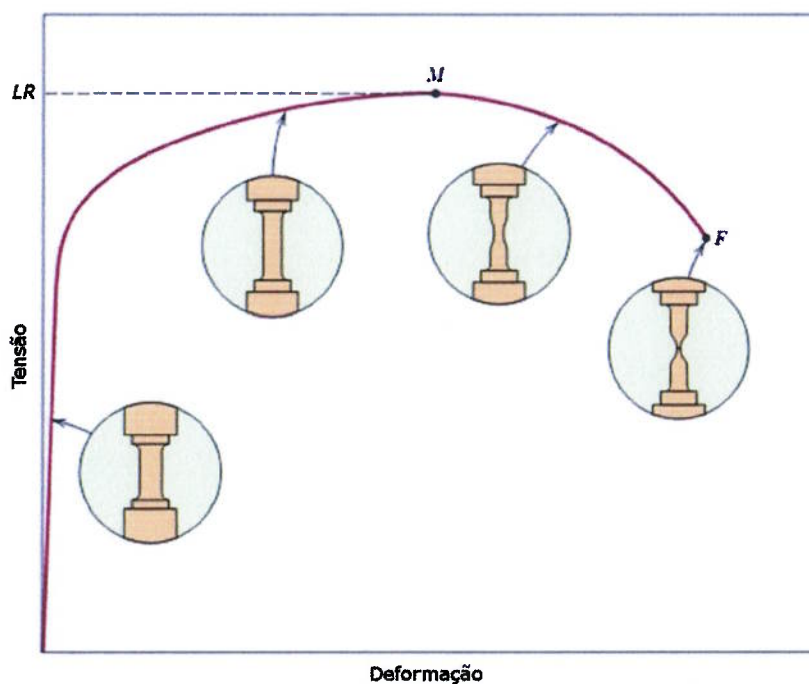


Figura 2 - Comportamento característico da representação gráfica de um ensaio de tração (CALLISTER, 2007).

Já a deformação descrita nesse ensaio é conhecida como deformação de engenharia e é definida por (CALLISTER, 2007):

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6)$$

onde l_0 é o comprimento inicial anterior a aplicação da força; l_i é o comprimento no instante medido. A característica Δl é a diferença entre l_i e l_0 e mede a mudança no comprimento no instante medido. A deformação de engenharia é uma característica adimensional, mas pode ser descrita como metro por metro ou milímetro por milímetro. Na maioria dos casos, a deformação de engenharia é representada como um percentual quando seu valor é multiplicado por 100.

As características mecânicas de um material metálico, principalmente o limite de escoamento e o limite de resistência, podem ser obtidas diretamente de um gráfico como o representado acima.

3.1 O LIMITE DE ESCOAMENTO

O limite de escoamento, conhecido pela sigla LE, representa o ponto onde o comportamento do material sujeito a tensões de tração deixa de seguir um comportamento estritamente elástico, conforme a lei de Hooke: tensão e deformação não são mais diretamente proporcionais, e começam a seguir um comportamento plástico, resultando em uma deformação permanente. Nos materiais metálicos o comportamento dessa transição entre o comportamento elástico e o comportamento plástico ocorrem de duas maneiras, conforme a Figura 3.

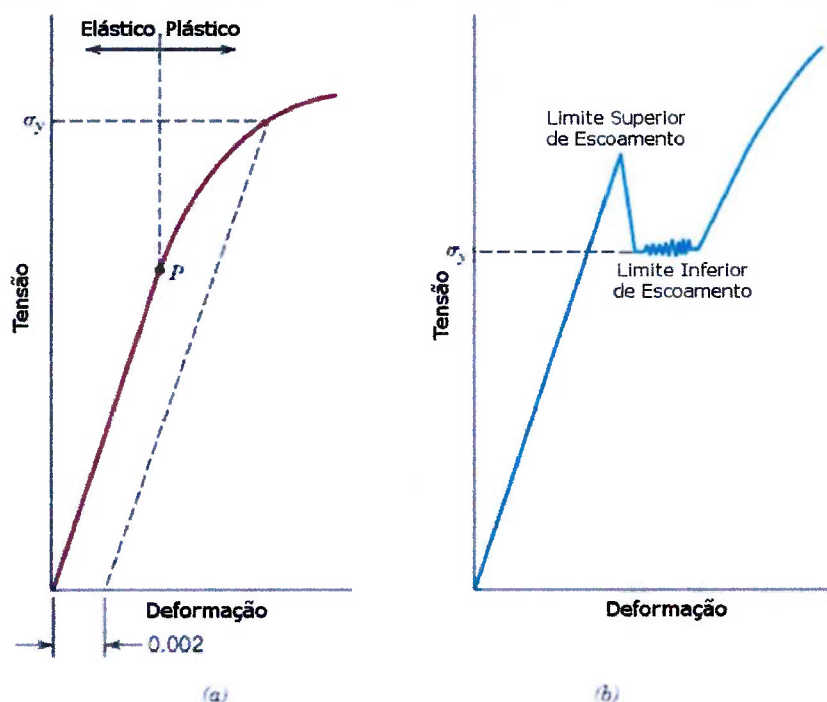


Figura 3 - Comportamento da transição entre o regime elástico e plástico de um material metálico sob tração. (a) representa uma transição contínua e (b) representa uma transição descontínua (CALLISTER, 2007).

A diferença física entre os dois comportamentos pode ser explicado pela teoria das discordâncias e os efeitos de soluções sólidas substitucionais e intersticiais dentro das estruturas cristalinas dos materiais metálicos (DIETER, 1988). Na prática, o resultado é que são necessários dois métodos diferentes para a determinação do limite de escoamento.

Nos materiais que apresentam uma transição contínua, conforme item (a) da figura 3, o limite de escoamento é determinado pelo valor de intersecção com a tensão, de uma linha paralela deslocada a 0,2% da deformação. Esse tipo de limite de escoamento é conhecido pela sigla $LE_{0,2\%}$.

Nos materiais que apresentam uma transição descontínua, conforme item (b) da figura 3, o limite de escoamento é determinado pelo valor do pico de tensão localizado antes do fenômeno de descontinuidade, tensão constante com o aumento da deformação. Esse tipo de limite de escoamento é conhecido pela sigla LE_{sup} .

3.2 O LIMITE DE RESISTÊNCIA

Quando observa-se as curvas tensão x deformação de engenharia em materiais metálicos, após o fenômeno do limite de escoamento do material, a tensão necessária para o processo de deformação plástica aumenta até um ponto máximo, identificado como M na Figura 2, e após esse ponto a tensão diminui até a eventual fratura, ponto F na mesma figura. A tensão registrada nesse ponto máximo é identificada como o limite de resistência, conhecida pela sigla LR, e é a tensão máxima que a estrutura do material pode ser submetida nas condições restritas da tração uniaxial (DIETER, 1988). Toda a deformação ocorre de maneira uniforme até esse ponto por toda a região usinada do corpo de prova de tração (CALLISTER, 2007). Entretanto, quando ocorre o fenômeno do limite de resistência, uma pequena estrição, ou pescoço, começa a se formar em alguma região do comprimento do corpo de prova, e subsequentemente o restante da deformação, e a fratura do material, é confinada nessa região. A Figura 2 ilustra o comportamento descrito em um corpo de prova de tração e é possível observar o fenômeno da estrição após o ponto M .

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL

Por questões financeiras não foi possível a realização da análise do sistema de medição com a utilização de materiais de referência certificados. A hipótese para que esse estudo pudesse ser realizado é de que os processos siderúrgicos podem prover uma quantidade suficiente de material homogêneo com relação as suas propriedades mecânicas. Desta forma, o material escolhido para o estudo é uma chapa com dimensões 12,5 x 2.440 x 6.000 mm, espessura, largura e comprimento, respectivamente, da especificação ASTM A36.

A escolha desta especificação deve-se ao fato de ser um material com um alto volume de produção e ser relativamente barato seu custo total de produção com relação a outras especificações oferecidas nas siderúrgicas de produtos planos dentro do mercado brasileiro.

A ASTM A36 é uma norma específica para aços-carbono estruturais utilizados em pontes ou prédios e propósitos estruturais gerais (ASTM, 2008). Os requisitos mecânicos para essa qualidade estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Limites de especificação dos requisitos mecânicos do aço ASTM A36

Propriedade Mecânica	Limites (MPa)	
	Inferior	Superior
Limite de Escoamento (LE)	250	---
Limite de Resistência (LR)	400	550

As propriedades mecânicas de tração definidas na norma ASTM A36 seguem os requisitos definidos em outra norma, ASTM A6, sobre requisitos gerais para aços estruturais laminados em barras, chapas, perfis e folhas. Os requisitos para os ensaios de tração na norma ASTM A6 (ASTM, 2011a) são:

- Os ensaios de tração devem ser conduzidos de acordo com os métodos descritos na norma ASTM A370 (ASTM, 2011b);

- Os corpos de provas devem ser retirados, no mínimo, com uma espessura de distância, onde a espessura é a espessura da própria chapa, de qualquer borda que sofreu calor através de cortes por chama;
- A orientação dos corpos de prova devem ser de tal forma que o eixo do corpo de prova é transversal a direção de laminação da chapa.

4.2 PLANEJAMENTO DA AMOSTRAGEM

A chapa foi cortada, por meio de uma guilhotina, em 65 amostras de 450 x 450 mm, sendo composta por 5 colunas nomeadas de A à E e 13 linhas identificadas sequencialmente de 1 à 13. A Figura 4 representa graficamente essa estratificação.



Figura 4 - Amostragem da chapa utilizada no trabalho (dimensões em milímetros).

Cada uma destas amostras foi identificada conforme a seguinte simbologia: **YYY**, onde o **X** identifica a coluna A à E e os dois **YY** os dois dígitos da linha 1 à 13. Exemplo: E07 significa uma amostra da coluna E linha 7.

Exceto para as amostras utilizadas na determinação da linearidade, cada uma das amostras foram cortadas, com o uso da guilhotina, em dez tiras de 35 mm de largura por 450 mm de comprimento para a usinagem de corpos de provas de tração, conforme a Figura 5. Todos os corpos de prova de tração são transversais a direção de laminação da chapa. Os corpos de provas utilizados para todas as etapas da análise do sistema de medição, com exceção da determinação de linearidade, seguem as medidas apresentadas na Figura 6.

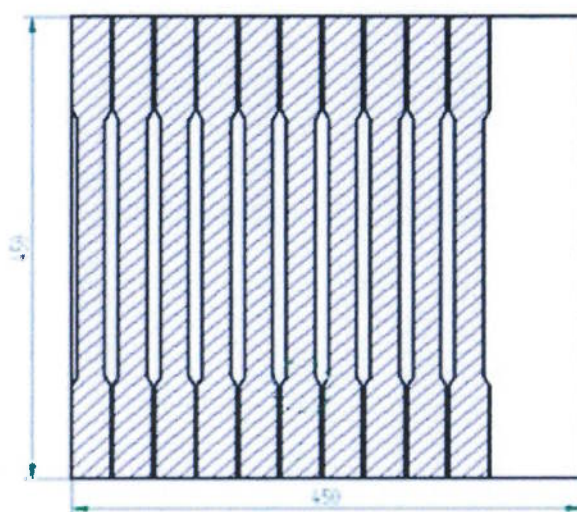


Figura 5 - Divisão das amostras em corpos de prova

Cada um destes corpos de prova foi identificado conforme a seguinte simbologia: $YYYWW$, X identifica a coluna A à E, YY os dois dígitos da linha 1 à 13 e WW identifica os corpos de prova da amostra. Exemplo: E0705 significa corpo de prova pertencente a coluna E, linha 07, sendo o 5º corpo de prova.

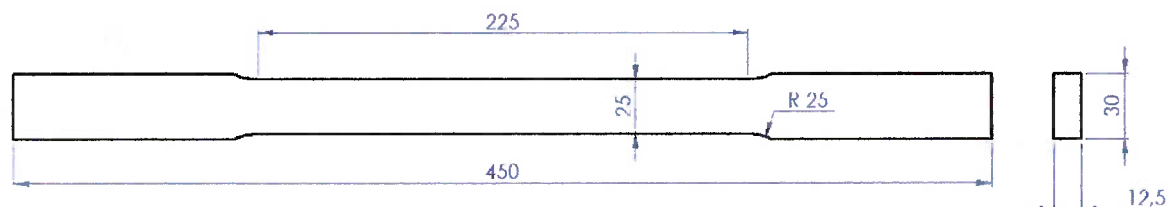


Figura 6 - Dimensões dos corpos de provas utilizados nesse estudo, exceto para o estudo de linearidade.

4.3 MÁQUINAS DE TRAÇÃO

Foram disponibilizadas duas máquinas de ensaios de tração para esse trabalho. Para a determinação da homogeneidade foi escolhida a máquina com os melhores resultados de calibração quando comparados os erros e incertezas dentro das faixas de calibração, de acordo com a Tabela 2. As definições e métodos para a expressão do erro relativo, q , e a incerteza expandida foram baseados na norma ABNT NBR-ISO 7500-1 (ABNT, 2004). Para a diferenciação entre as máquinas de tração foram designadas como: Máquina 1, com capacidade máxima de 100 tonelada força, e Máquina 2, com capacidade máxima de 30 tonelada força. A Máquina 1 é a que apresentou os melhores resultados de calibração, menores valores absolutos do erro relativo e incerteza expandida, e portanto foi utilizada para a determinação da homogeneidade das amostras e outras etapas da análise do sistema de medição. A Máquina 2 foi utilizada para todas as outras atividades da análise do sistema de medição.

Tabela 2 - Comparativo entre o erro relativo e a incerteza expandida das máquinas de ensaios

Faixa de calibração (kN)	Máquina 01		Máquina 02	
	Erro relativo, q (%)	Incerteza expandida (kN)	Erro relativo, q (%)	Incerteza expandida (kN)
50	0,2	0,15	0,2	0,22
100	-0,1	0,30	0,4	0,36
200	-0,1	0,30	0,1	0,69
300	-0,1	0,29	-0,2	0,30

4.4 DETERMINAÇÃO DA HOMOGENEIDADE DAS AMOSTRAS

Uma das principais dificuldades na execução da análise dos sistemas de medição para sistemas não replicáveis é estabelecer um método estatístico para a determinação da homogeneidade das amostras. O tamanho do lote homogêneo é uma consideração importante no planejamento e análise de um estudo de GR&R em

ensaios destrutivos. Um planejamento e análise mais tradicional, ou cruzado, pode ser apropriado quando um lote é grande o suficiente para designar pelo menos duas partes de cada lote para cada operador. Isso deve-se pelo fato que cada operador pode testar cada lote diversas vezes (o lote é cruzado com os operadores). Quando um lote pode ser cruzado com os operadores, esse planejamento de experimento permite a estimativa da interação dos operadores com os lotes. Quando um lote homogêneo é pequeno e diversas partes de cada lote não podem ser distribuídas para cada operador, o método mais apropriado é o modelo hierárquico (GORMAN e BOWER, 2002).

Para esse estudo foram separadas 25 das 65 amostras retiradas da chapa. Cada uma das 25 amostras teve dois corpos de provas selecionados aleatoriamente, totalizando 50 corpos de prova para a determinação da homogeneidade das amostras.

A estimativa do valor do número de corpos de prova utilizados na determinação da homogeneidade das amostras foi feita pelo seguinte método (MAGALHÃES e LIMA, 2002):

$$n = \left(\frac{\sigma_{p_{\max}} \times z_{0,95}}{\varepsilon} \right)^2 \quad (7)$$

onde,

n , é o tamanho da amostra;

$\sigma_{p_{\max}}$, é o maior valor do desvio-padrão de critério para a avaliação da homogeneidade de acordo com a Tabela 3, igual a 15,72;

$z_{0,95}$, é o valor significativo da distribuição normal padrão com probabilidade de 95%, igual a 1,96;

ε , é o erro amostral máximo, nesse caso igual a 5 MPa, escolhido deliberadamente.

Substituindo os valores de $\sigma_{p_{\max}}$, $z_{0,95}$ e ε na eq.(7), tem-se que o tamanho da amostra é aproximadamente 38. Desta forma o valor de 50 corpos de prova possibilita uma margem de segurança para a determinação da homogeneidade.

Em caso positivo da homogeneidade das amostras pode-se supor que os lotes homogêneos são suficientemente grandes para uma análise mais tradicional, uma vez que cada uma das amostras possibilita 10 corpos de provas para ensaios.

Como não há referência de um método específico de determinação de homogeneidade de amostras para ensaios de tração foram utilizados dois procedimentos estatísticos utilizados dentro da área química para a determinação da homogeneidade das amostras. Esses métodos foram avaliados quanto sua eficácia na seção de resultados e discussões.

Para ambos os métodos foi necessário determinar o desvio-padrão de critério para a avaliação da homogeneidade, conhecido como σ_p . Esse valor representa o desvio-padrão máximo desejado para os ensaios. Nesse caso foram levantados os dados históricos dos limites de escoamento e de resistência desse material nos últimos seis meses de produção, o que possibilitou 153 ensaios nesse período. Esses dados históricos estão resumidos na Figura 7 e Figura 8 abaixo.

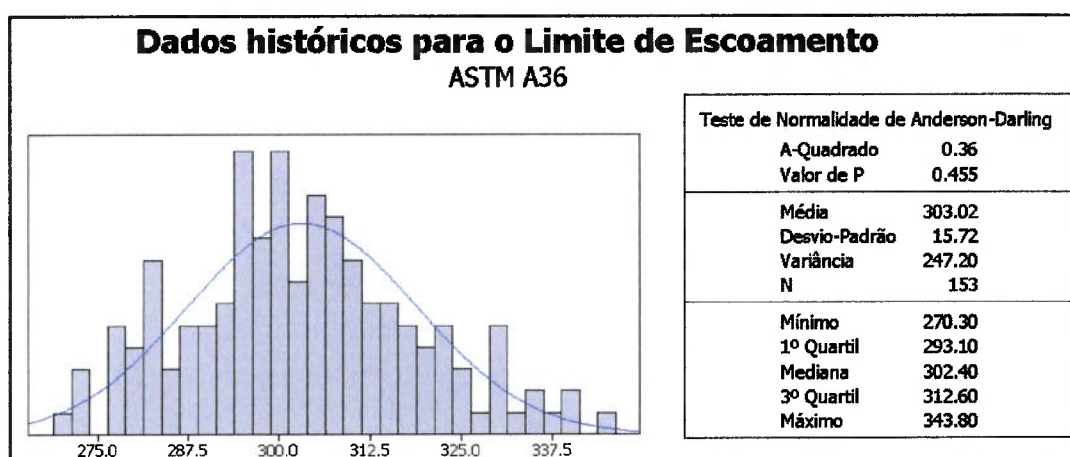


Figura 7 - Dados históricos para o limite de escoamento do material ASTM A36 nos últimos seis meses de produção, valores em MPa.

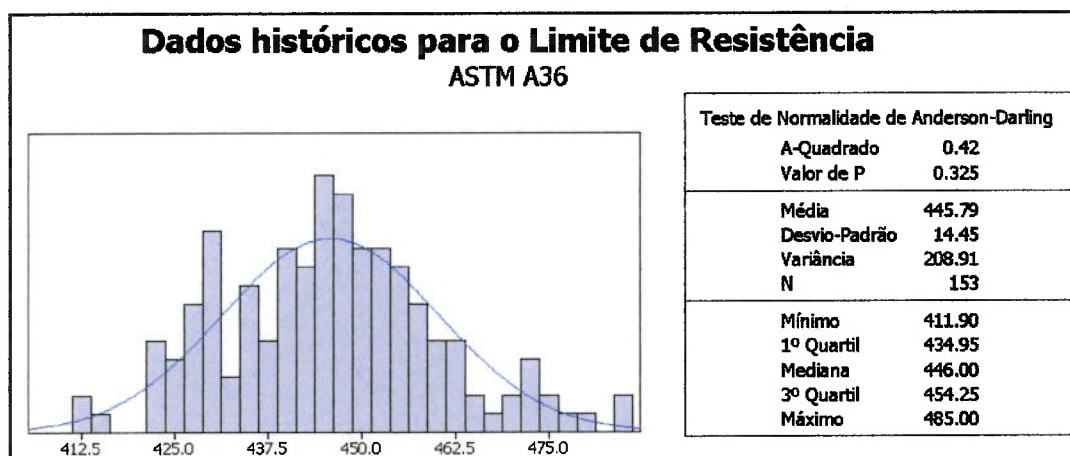


Figura 8 - Dados históricos para o limite de resistência do material ASTM A36 nos últimos seis meses de produção, valores em MPa.

Tanto para o LE quanto para o LR os dados históricos apresentaram um comportamento normal e dessa forma podem ser utilizados para a determinação dos valores de σ_p . Ambos os limites estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores do desvio-padrão de critério para a avaliação da homogeneidade.

Propriedade Mecânica	σ_p (MPa)
Limite de Escoamento (LE)	15,72
Limite de Resistência (LR)	14,45

4.4.1 Método 01 - relatório técnico da IUPAC

O texto a seguir foi extraído e traduzido do relatório: "*The International Harmonized Protocol for the Proficiency Testing of Analytical Chemistry Laboratories*" (THOMPSON, ELLISON *et al.*, 2006), anexo 1: Procedimento recomendado para a verificação da homogeneidade de um material.

4.4.1.1 Procedimento:

- Preparar uma grande quantidade do material de forma que é esperada a sua homogeneidade, por qualquer método apropriado;
- Dividir o material e selecionar m amostras, com um mínimo de 10, escolhidas aleatoriamente;
- Separar cada amostra escolhida em duas porções, ou corpos de provas;
- Ensaiar os $2m$ corpos de provas de maneira aleatória e de acordo com o método escolhido.

4.4.1.2 Métodos Estatísticos

4.4.1.2.1 Teste C de Cochran

- Calcular a soma quadrática das diferenças entre cada par de corpo de prova de cada m amostra:

$$S_{DD} = \sum_m D_i^2 \quad (8)$$

- Calcular o valor crítico C do teste de Cochran:

$$C = \frac{D_{máx}^2}{S_{DD}} \quad (9)$$

onde, $D_{máx}^2$ é a maior diferença quadrática entre todas as diferenças quadráticas calculadas anteriormente.

Considerações para a interpretação do teste de Cochran (ISO, 1994) :

- Se o valor C do teste é menor do que o valor crítico para um nível de confiança de 95% não há presença de amostras consideradas *outlier*;
- Se o valor C do teste é maior que o valor crítico para um nível de confiança de 95% e menor que o valor crítico para um nível de confiança de 99% a amostra deve ser considerada marginal;
- Se o valor C do teste é maior que o valor crítico para um nível de confiança de 99% a amostra deve ser considerada um *outlier*.

4.4.1.2.2 Teste de homogeneidade

- Calcular a variância dentro das amostras:

$$s_{an}^2 = \frac{\sum D_i^2}{2m} \quad (10)$$

- Calcular a média geral das amostras:

$$\bar{S} = \frac{\sum S_i}{m} \quad (11)$$

onde, S_i é a soma dos valores dos corpos de provas de cada m amostra.

- Calcular a variância geral das amostras:

$$V_s = \frac{\sum (S_i - \bar{S})^2}{m - 1} \quad (12)$$

- Calcular a variância entre as amostras, s_{sam}^2

$$s_{sam}^2 = \frac{\left(\frac{V_s}{2} - s_{an}^2\right)}{2} \quad (13)$$

se a estimativa acima for negativa então $s_{sam}^2 = 0$.

- Calcular a variância permitida da amostragem, σ_{all}^2

$$\sigma_{all}^2 = (0,3\sigma_p)^2 \quad (14)$$

onde, σ_p é o desvio-padrão de critério para a avaliação da homogeneidade.

- Calcular o valor c crítico para o teste de homogeneidade:

$$c = F_1 \sigma_{all}^2 + F_2 s_{an}^2 \quad (15)$$

sendo,

$$F_1 = \frac{\chi_{m-1; 0,95}^2}{m - 1} \quad (16)$$

onde, $\chi_{m-1; 0,95}^2$ é o valor da probabilidade de 0,05 de uma distribuição chi-quadrado de uma variável aleatória com m-1 graus de liberdade.

$$F_2 = \frac{F_{m-1;m;0,95} - 1}{2} \quad (17)$$

onde, $F_{m-1;m;0,95}$ é o valor da probabilidade de 0,05 de uma distribuição F de uma variável aleatória com m-1 e m graus de liberdade.

- Critérios de homogeneidade

Se $s_{sam}^2 > c$, há a evidência, com um nível de confiança de 95%, que o material não é suficientemente homogêneo;

Se $s_{sam}^2 < c$, há a evidência, com um nível de confiança de 95%, que o material é suficientemente homogêneo.

4.4.2 Método 02 - norma ISO 13528

O texto a seguir foi extraído e traduzido da norma ISO 13528: *"Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons"* (ISO, 2005), anexo B: Verificação da homogeneidade e estabilidade das amostras.

4.4.2.1 Procedimento:

- Escolher um número m de amostras retiradas aleatoriamente, onde $m \geq 10$;

- Preparar duas porções de corpos de provas para cada amostra usando técnicas apropriadas para a minimização das diferenças entre-corpos-de-prova;
- Ensaiair os $2m$ corpos de provas de forma aleatória, obtendo o resultado da medição para cada corpo de prova, completando toda a série de ensaios sob condições de repetitividade.

4.4.2.2 Método estatístico:

Os dados para a verificação da homogeneidade são representados por:

$$x_{t,k}$$

onde,

t , representa as amostras ($t=1,2, \dots, m$)

k , representa os corpos de provas ($k=1,2$)

- Calcular a média das amostras:

$$\bar{x}_t = \frac{(x_{t,1} + x_{t,2})}{2} \quad (18)$$

- Calcular a amplitude das entre as amostras:

$$w_t = |x_{t,1} - x_{t,2}| \quad (19)$$

- Calcular a média geral:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum \bar{x}_t}{m} \quad (20)$$

- Calcular o desvio-padrão da média das amostras:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x}_t - \bar{\bar{x}})^2}{m - 1}} \quad (21)$$

- Calcular o desvio-padrão dentro das amostras:

$$s_w = \sqrt{\frac{\sum w_t^2}{2m}} \quad (22)$$

- Calcular o desvio-padrão entre as amostras:

$$s_s = \sqrt{s_x^2 - \left(\frac{s_w^2}{2}\right)} \quad (23)$$

4.4.2.3 Critério de avaliação para a verificação de homogeneidade:

Comparar o desvio-padrão entre as amostras s_s com o desvio-padrão de critério para a avaliação da homogeneidade σ_p . As amostras podem ser consideradas homogêneas se:

$$s_s \leq 0,3\sigma_p \quad (24)$$

A justificativa para o fator de 0,3 é que quando este critério é cumprido o desvio-padrão entre as amostras contribuem com não mais de 10% do desvio-padrão para o ensaio de proficiência.

4.5 DETERMINAÇÃO DA TENDÊNCIA E LINEARIDADE

Após a execução dos testes de homogeneidade das amostras, foram retirados 30 corpos de provas de maneira aleatória para a determinação da tendência e linearidade das máquinas. Esses 30 corpos de provas foram divididos em 3 grupos de 10 corpos de provas. Com essas características tem-se o tamanho das amostras n igual a 10 e o valor significativo de t (bi-caudal) é igual a 2,2622, para um nível de significância de 5%.

4.5.1 Cálculo da tendência

Para o cálculo da tendência é utilizado o teste de hipóteses:

$$H_0 \text{tendência} = 0$$

$$H_1 \text{tendência} \neq 0$$

- Determinar a tendência de cada ensaio:

$$\text{tendência} = x_i - \text{valor de referência} \quad (25)$$

- Determinar a tendência média:

$$\text{tendência média} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{tendência}}{n} \quad (26)$$

- Determinar o desvio-padrão da repetitividade:

$$\sigma_{\text{repetitividade}} = \sigma_r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (27)$$

- Determinar o desvio-padrão da tendência:

$$\sigma_b = \frac{\sigma_r}{\sqrt{n}} \quad (28)$$

- Determinar o t estatístico da tendência:

$$\text{estatística } t = t_{\text{tendência}} = \frac{\text{tendência média}}{\sigma_b} \quad (29)$$

4.5.2 Critério de aceitação da tendência

Há dois critérios que podem ser utilizados para a determinação de uma tendência aceitável, ou estatisticamente nula, e estas são:

- O valor t estatístico estar fora da região crítica para um nível de significância de 5%;
- O valor zero encontra-se dentro do intervalo de confiança para um nível de significância de 5%, conforme a equação abaixo:

$$\text{tendência média} - [\sigma_b(t_{v,1-\alpha/2})] \leq \text{zero} \leq \text{tendência média} + [\sigma_b(t_{v,1-\alpha/2})] \quad (30)$$

4.5.3 Determinação da linearidade

Quando são realizados ensaios de tração o que a máquina realmente está medindo é a carga, força, que o material impõe contra o movimento de separação das garras. A propriedade intrínseca do material são as tensões descritas anteriormente como o limite de escoamento e limite de resistência. Essas tensões foram determinadas com o teste de homogeneidade do material. A carga que a máquina mede é diretamente proporcional a área da seção útil do corpo de prova. Portanto, para a determinação da linearidade o procedimento escolhido foi a

realização de três testes de tendência para diferentes corpos de provas com áreas de seções transversais distintas, conforme a Tabela 4 e Figura 9, abaixo:

Tabela 4 - Valores das áreas nominais dos corpos de provas utilizados no estudo de linearidade

Corpo de prova	b (mm)	w (mm)	Espessura (mm)	Área nominal (mm ²)
1) Carga inferior	12,5	30,0	12,5	156,25
2) Carga central	25,0	30,0	12,5	312,50
3) Carga superior	40,0	50,0	12,5	500,00

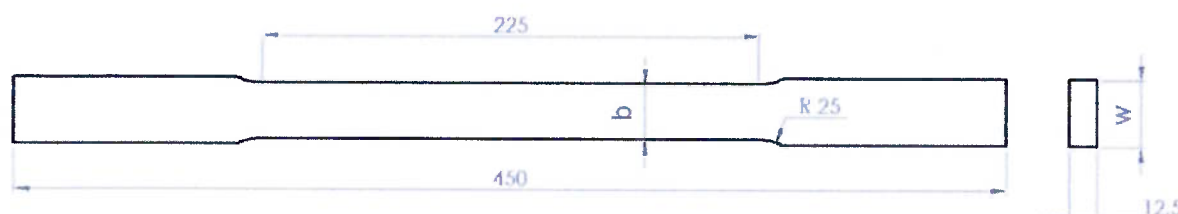


Figura 9 - Dimensões dos corpos de provas utilizados no estudo de linearidade

Para a usinagem dos corpos de prova identificados como carga superior foi necessária a utilização de amostras com tamanhos diferentes dos descritos na Figura 4. Conforme descrito no item 4.2 a largura da chapa utilizada nesse trabalho é igual a 2.440 mm e foi dividida em 5 colunas de amostras de 450 mm. Desta forma 190 mm não foram utilizados na maioria das amostras, exceto para as amostras utilizadas na determinação de linearidade para a carga superior, que tiveram dimensões de 450 mm de comprimento por 640 mm de largura.

4.6 DETERMINAÇÃO DA REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE

Por se tratar de medições de controle de produto, como no caso da conformidade, ou não, à uma característica especificada em norma, a avaliação do sistema de medição é baseada com o GR&R para a tolerância (AIAG, 2010).

O experimento foi planejado para duas máquinas de tração, uma vez que, no processo de medição utilizado para a certificação do produto não há a preferência

de uma, ou outra máquina, para a realização dos ensaios. Portanto, qualquer máquina de ensaio deve ser capaz de realizar o ensaio. Para a repetitividade foram escolhidas dez amostras, dentro das 65 amostras retiradas da chapa. Cada uma das dez amostras tiveram 6 corpos de provas escolhidos aleatoriamente e divididos entre as duas máquinas. No final, o planejamento do experimento para a determinação do GR&R foram: 10 amostras, 3 repetições e 2 máquinas.

- Cálculo da variação total (VT):

$$VT = \frac{LSE - LIE}{6} \quad (31)$$

onde,

LSE , é o limite superior de especificação;

LIE , é o limite inferior de especificação.

- Cálculo da repetitividade (VE):

$$VE = \bar{R} \times K_1 \quad (32)$$

onde,

$\bar{R}$, é a média das amplitudes médias dos ensaios de cada máquina;

K_1 , é uma constante em função do número de repetições, nesse caso $K_1 = 0,5908$ (AIAG, 2010);

- Cálculo do percentual da repetitividade na variação total (% VE)

$$\%VE = 100 \times \frac{VE}{VT} \quad (33)$$

onde,

VE , é a repetitividade;

VT , é a variação total;

- Cálculo da reprodutibilidade (VA):

$$VA = \sqrt{(\bar{X}_{DIFF} \times K_2)^2 - \left(\frac{VE^2}{nr}\right)} \quad (34)$$

onde,

$\bar{X}_{DIFF}$, é a amplitude da diferença dos valores médios de cada máquina;

K_2 , é uma constante em função do número de máquinas, nesse caso $K_2 = 0,7071$ (AIAG, 2010);

n , é o número de partes, nesse caso $n = 10$;

r , é o número de repetições, nesse caso $r = 3$.

- Cálculo do percentual da reprodutibilidade na variação total (%VA)

$$\%VA = 100 \times \frac{VA}{VT} \quad (35)$$

onde,

VA, é a reprodutibilidade;

VT, é a variação total;

- Cálculo da repetitividade e reprodutibilidade combinadas (GR&R):

$$GR\&R = \sqrt{VE^2 + VA^2} \quad (36)$$

onde,

VE, é a repetitividade;

VA, é a reprodutibilidade;

- Cálculo do percentual da repetitividade e reprodutibilidade combinadas na variação total (%GR&R)

$$\%GR\&R = 100 \times \frac{GR\&R}{VT} \quad (37)$$

onde,

GR&R, é a repetitividade e reprodutibilidade combinadas;

VT, é a variação total;

- Cálculo da variação das amostras (*VP*):

$$VP = \sqrt{VT^2 - GR\&R^2} \quad (38)$$

onde,

VT, é a variação total;

GR&R, é a variação da repetitividade e reprodutibilidade;

- Cálculo do percentual da variação das amostras na variação total (%*VP*)

$$\%VP = 100 \times \frac{VP}{VT} \quad (39)$$

onde,

VP, é a variação das amostras;

VT, é a variação total;

- Cálculo do número de distintas categorias (*ndc*):

$$ndc = 1,41 \frac{VP}{GR\&R} \quad (40)$$

onde,

VP, é a variação das amostras;

GR&R, é a variação da repetitividade e reprodutibilidade;

4.6.1 Critérios de aceitação da repetitividade e reprodutibilidade combinadas (GR&R)

Os critérios de aceitação são baseados sobre o percentual da repetitividade e reprodutibilidade combinadas na variação total (%GR&R) de acordo com a Tabela 5 (AIAG, 2010).

Tabela 5 - Critérios de aceitação para a repetitividade e reprodutibilidade combinadas.

%GR&R	Crítério
$\leq 10 \%$	Sistema de medição aceitável.
$10 \% < \%GR\&R \leq 30 \%$	Sistema de medição marginal, aceitável para algumas aplicações.
$> 30 \%$	Sistema de medição inaceitável.

4.7 DETERMINAÇÃO DA ESTABILIDADE

Com os dados gerados pelo estudo da homogeneidade das amostras foi possível a determinação dos valores críticos para cartas de controle com o intuito do acompanhamento da estabilidade das máquinas de tração.

As cartas de controle foram determinadas para o controle através dos gráficos da média e amplitude (x-barra e R) (ROTONDARO e RAMOS, 2011).

4.7.1 Cálculo dos limites de controle para a média:

- Limite superior de controle, $LSC_{\bar{x}}$:

$$LSC_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + A_2 \cdot \bar{R} \quad (41)$$

- Limite inferior de controle, $LIC_{\bar{x}}$:

$$LIC_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} - A_2 \cdot \bar{R} \quad (42)$$

onde,

$\bar{\bar{x}}$, é a média das médias observadas;

A_2 , é uma constante em função do tamanho da amostra n ;

$\bar{R}$, é a média das amplitudes.

4.7.2 Cálculo dos limites de controle para a amplitude:

- Limite superior de controle, $LSC_{\bar{R}}$:

$$LSC_{\bar{R}} = D_4 \cdot \bar{R} \quad (43)$$

- Limite inferior de controle, $LIC_{\bar{R}}$:

$$LIC_{\bar{R}} = D_2 \cdot \bar{R} \quad (44)$$

onde,

D_4 e D_2 , são constantes em função do tamanho da amostra n ;

$\bar{R}$, é a média das amplitudes.

Os valores das constantes são tabelados e conhecidos na literatura (OAKLAND, 2008), conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Valores das constantes utilizadas no cálculo dos limites das cartas de controle

Tamanho da amostra (n)	Constantes		
	A_2	D_2	D_4
2	1,88	0	3,27
3	1,02	0	2,58

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 HOMOGENEIDADE DAS AMOSTRAS

5.1.1 Teste para o limite de escoamento

Os dados coletados estão descritos na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 - Dados coletados para o teste de homogeneidade do limite de escoamento das amostras, valores em MPa

Amostra	Corpo de prova		Amplitude	Soma	Média
m	a	b	$D_i = a - b $ $= w_i$	$S_i = a + b$	$\bar{x}_i = \frac{S_i}{2}$
A01	276,0	272,4	3,6	548,4	274,2
A02	273,0	271,3	1,7	544,2	272,1
A04	305,7	295,2	10,4	600,9	300,4
A05	295,8	282,9	12,9	578,7	289,3
A08	284,6	280,5	4,1	565,1	282,6
A09	290,9	282,5	8,4	573,5	286,7
B02	237,3	232,4	4,9	469,7	234,9
B06	262,0	264,8	2,8	526,8	263,4
B08	264,2	270,2	6,0	534,3	267,2
B09	300,5	284,9	15,7	585,4	292,7
C02	272,1	270,6	1,6	542,7	271,3
C03	300,7	287,1	13,6	587,7	293,9
C09	307,5	296,0	11,5	603,5	301,8
C11	299,9	284,2	15,7	584,0	292,0
C12	308,4	297,1	11,2	605,5	302,8
D01	314,1	310,6	3,5	624,6	312,3
D02	310,7	300,5	10,3	611,2	305,6
D03	312,9	305,5	7,4	618,4	309,2
D07	282,1	277,9	4,2	560,1	280,0
D09	245,7	258,7	13,0	504,4	252,2
D13	276,5	275,7	0,8	552,2	276,1
E03	324,9	319,0	5,9	643,9	322,0
E10	243,1	258,7	15,6	501,8	250,9
E12	303,8	292,0	11,9	595,8	297,9
E13	245,9	263,7	17,8	509,5	254,8
Total			214,4	14172,6	7086,3

5.1.1.1 Avaliação pelo o método 01

- Teste C de Cochran

Tabela 8 - Valores críticos do teste estatístico de Cochran para duplicatas (ISO, 1994)

m	95%	99%
5	0,841	0,928
10	0,602	0,718
15	0,471	0,575
20	0,480	0,389
25	0,334	0,413
30	0,293	0,363

O valor da soma quadrática das diferenças entre cada par de corpo de prova, eq. (8): $S_{DD} = 2479,9$.

O valor da maior diferença quadrática entre todas as diferenças quadráticas: $D_{máx}^2 = 316,18$.

O valor crítico C do teste de Cochran, eq. (9): $C = 0,127$.

O valor de C, portanto é menor que ambos os valores críticos para os níveis de confiança em 95 e 99%. Desta forma, para ambos os níveis de confiança, pode-se afirmar que não há evidências de amostras consideradas *outlier*.

- Teste de homogeneidade

A variância dentro das amostras, eq. (10): $s_{an}^2 = 49,60$.

A variância entre as amostras, eq. (13): $s_{sam}^2 = 446,12$.

A variância permitida da amostragem, eq. (14): $\sigma_{all}^2 = (0,3 \times 15,72)^2 = 22,24$.

O valor crítico c para o teste de homogeneidade, eq. (15): $c = F_1 \sigma_{all}^2 + F_2 s_{an}^2$.

Como o número de amostras m é igual a 25 tem-se que $F_1 = 1,52$ e $F_2 = 0,48$, portanto $c = 1,52 \times 22,24 + 0,48 \times 49,60 = 57,61$.

Como $s_{sam}^2 = 446,12 \geq 57,61$, há a evidência, com um nível de confiança de 95%, que o material não é suficientemente homogêneo para o LE.

5.1.1.2 Avaliação pelo método 02

- Teste de homogeneidade

O desvio-padrão da média das amostras, eq. (21): $s_x = 21,70$.

O desvio-padrão dentro das amostras, eq. (22): $s_w = 7,04$.

O desvio-padrão entre as amostras, eq. (23): $s_s = 21,12$.

Para que as amostras sejam considerada homogêneas $s_s \leq (0,3 \times 15,72) \leftrightarrow s_s \leq 4,72$. Como o valor de s_s é maior que 4,72 pode-se afirmar que há a evidência de que o material não é suficientemente homogêneo para o LE.

5.1.2 Teste para o limite de resistência

Os dados coletados estão descritos na Tabela 9 abaixo.

Tabela 9 - Dados coletados para o teste de homogeneidade do limite de resistência das amostras, valores em MPa

Amostra	Corpo de prova		Amplitude	Soma	Média
<i>m</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	$D_i = a - b $ $= w_t$	$S_i = a + b$	$\bar{x}_t = \frac{S_i}{2}$
A01	453,7	459,1	5,4	912,8	456,4
A02	456,8	460,3	3,5	917,1	458,5
A04	455,6	460,3	4,7	915,9	457,9
A05	455,0	458,0	3,0	913,0	456,5
A08	455,6	454,2	1,3	909,8	454,9
A09	456,2	451,2	5,0	907,4	453,7
B02	457,0	455,9	1,1	912,9	456,5
B06	458,1	456,6	1,5	914,6	457,3
B08	455,2	456,3	1,1	911,5	455,8
B09	454,9	454,1	0,8	909,0	454,5
C02	457,5	457,3	0,2	914,8	457,4
C03	452,1	455,8	3,7	908,0	454,0
C09	455,9	454,4	1,5	910,3	455,2
C11	455,0	456,1	1,1	911,2	455,6
C12	457,1	453,7	3,4	910,9	455,4
D01	458,4	455,3	3,1	913,7	456,9
D02	457,5	456,9	0,7	914,4	457,2
D03	454,5	457,6	3,1	912,1	456,1
D07	460,0	457,8	2,2	917,9	458,9
D09	457,2	454,6	2,7	911,8	455,9
D13	456,2	456,5	0,3	912,7	456,4
E03	455,1	457,1	2,0	912,3	456,1
E10	457,4	457,1	0,2	914,5	457,2
E12	454,3	456,0	1,8	910,3	455,1
E13	458,8	454,6	4,3	913,4	456,7
Total			57,8	22812,3	11406,1

5.1.2.1 Avaliação pelo o método 01

- Teste C de Cochran

O valor da soma quadrática das diferenças entre cada par de corpo de prova, eq. (8): $S_{DD} = 191,2$.

O valor da maior diferença quadrática entre todas as diferenças quadráticas:

$$D_{máx}^2 = 29,24.$$

O valor crítico C do teste de Cochran, eq. (9): $C = 0,153$.

O valor de C , portanto é menor que ambos os valores críticos para os níveis de confiança em 95 e 99%, Tabela 8. Desta forma, para ambos os níveis de confiança, podemos afirmar que não há evidências de amostras consideradas *outlier*.

- Teste de homogeneidade

A variância dentro das amostras, eq. (10): $s_{an}^2 = 3,82$.

A variância entre as amostras, eq. (13): $s_{sam}^2 = -0,212$. Como esse valor é negativo $s_{sam}^2 = 0$.

A variância permitida da amostragem, eq. (14): $\sigma_{all}^2 = (0,3 \times 14,45)^2 = 18,79$.

O valor crítico c para o teste de homogeneidade, eq. (15): $c = F_1 \sigma_{all}^2 + F_2 s_{an}^2$. Como o número de amostras m é igual a 25 temos que $F_1 = 1,52$ e $F_2 = 0,48$, portanto $c = 1,52 \times 18,79 + 0,48 \times 3,82 = 30,39$.

Como $s_{sam}^2 = 0 \leq 30,39$, há a evidência, com um nível de confiança de 95%, que o material é suficientemente homogêneo para o LR.

5.1.2.2 Avaliação pelo método 02

- Teste de homogeneidade

O desvio-padrão da média das amostras, eq. (21): $s_x = 1,30$.

O desvio-padrão dentro das amostras, eq. (22): $s_w = 1,96$.

O desvio-padrão entre as amostras, eq. (23): $s_s = 0$, pois $s_s^2 < 0$ e não há valor real para o desvio-padrão entre as amostras.

Para que as amostras sejam considerada homogêneas $s_s \leq (0,3 \times 14,45) \leftrightarrow s_s \leq 4,34$. Como o valor de s_s é menor que 4,34 pode-se afirmar que há a evidência de que o material é suficientemente homogêneo para o LR.

Os resultados dos testes de homogeneidade foram consistentes para os dois métodos avaliados. Para o limite de escoamento o material não foi considerado homogêneo em ambos os testes e para o limite de resistência o material apresentou ser suficientemente homogêneo nos dois métodos. Esse resultado acabou sendo surpreendente, pois tratando-se do mesmo material com a mesma composição química e o mesmo tratamento termomecânico, era esperado que os testes de homogeneidade confirmassem, ou não, os critérios para ambos os limites de escoamento e resistência.

Durante a fase de preparação dos corpos de provas foi percebido que algumas tiras apresentaram um leve torção devido ao próprio processo de corte por guilhotina. Essa torção está representada na Figura 10. Conforme foram sendo ensaiados os corpos de provas foi percebido que a característica de transição descontínua do limite de escoamento, característico do material ASTM A36, não foi presente em todos os corpos de provas. Na verdade os corpos de provas que apresentaram maior grau de torção, devido ao corte das tiras, apresentaram uma transição contínua no limite de escoamento.



Figura 10 - Representação da torção que o processo de corte por tesoura guilhotina causou nas tiras utilizadas nos corpos de provas.

Desta forma os valores para o LE foram muito mais dispersos que os valores de LR e, conseqüentemente, os testes de homogeneidade acabaram sendo rejeitados para a característica do LE. Por esse motivo todas as outras etapas deste trabalho acabaram sendo avaliadas apenas para o limite de resistência (LR) do material.

Com a confirmação da homogeneidade das amostras para o LR os valores coletados durante essa etapa foram utilizados para a determinação dos valores de referência para as próximas etapas da análise do sistema de medição. Esses valores estão reunidos na Figura 11. É possível perceber que os dados apresentam

um elevado grau de normalidade e, realmente, um desvio-padrão muito baixo quando comparado com o desvio-padrão histórico do material.

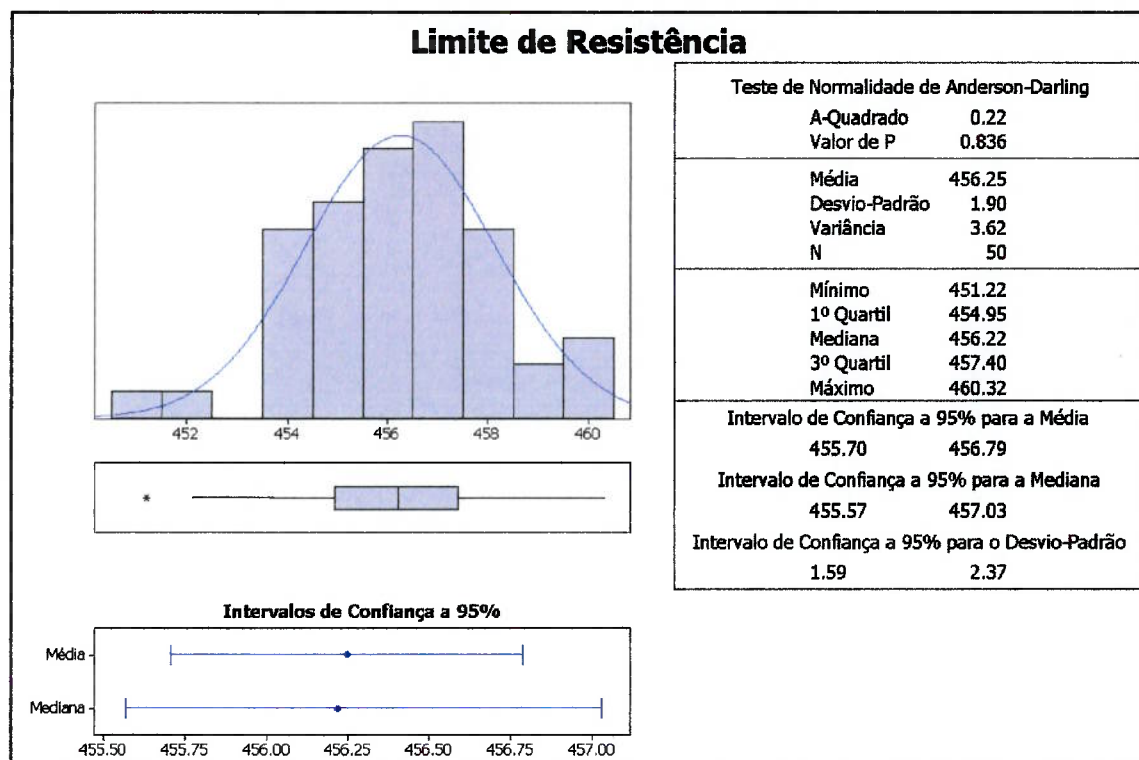


Figura 11 - Valores de referência determinados para o limite de resistência, valores em MPa.

Outra informação retirada dos dados apresentados na Tabela 9 foi utilizada para a construção das cartas de controle para a média e amplitude, conhecidas como X-barra/R, que foram a base para a verificação da estabilidade das máquinas posteriormente. Essas cartas, indicadas na Figura 12, foram construídas a partir das 25 amostras considerando cada corpo de prova uma repetição, desta forma temos:

A média das médias das amostras, $\bar{\bar{x}} = 456,2$.

A amplitude média das amostras, $\bar{R} = 2,3$.

- Limites de controle para a média:

Limite superior de controle, eq. (41): $LSC_{\bar{x}} = 456,3 + 1,88 \times 2,3 = 460,6$.

Limite inferior de controle, eq. (42): $LIC_{\bar{x}} = 456,3 - 1,88 \times 2,3 = 451,9$.

- Limites de controle para a amplitude:

Limite superior de controle, eq. (43): $LSC_{\bar{R}} = 3,27 \times 2,3 = 7,6$.

Limite inferior de controle, eq. (44): $LIC_{\bar{R}} = 0 \times 2,3 = 0$.

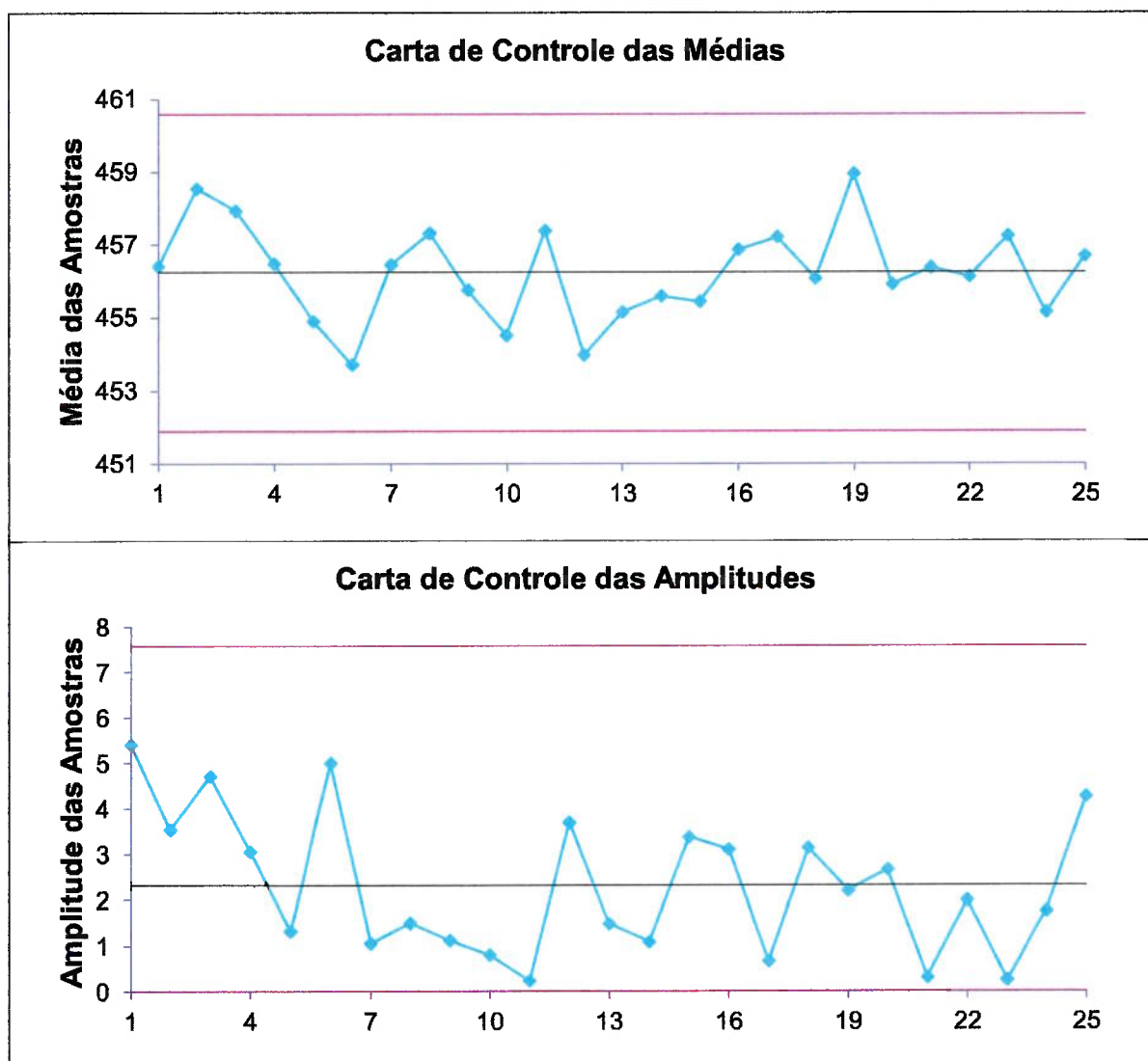


Figura 12 - Cartas de controle da amostragem da homogeneidade das amostras

Em ambas as cartas de controle é possível perceber que não há a presença de comportamentos que indiquem a presença de causas especiais, como (OAKLAND, 2008):

- Nenhum ponto está fora dos limites de controle;

- Não há a presença de mais de 6 pontos de um lado, superior ou inferior, a média geral;
- Não há a presença de mais de 6 pontos que estejam subindo ou descendo consecutivamente;

5.2 TENDÊNCIA E LINEARIDADE

5.2.1 Tendência para carga central e Máquina 1

O valor da carga central foi estimado substituindo o valor da média calculada na Tabela 10 e o valor da área nominal para a carga central na Tabela 4 na eq. (5). Portanto, a carga central é igual a 142,9 kN.

Tabela 10 - Valores da tendência para a carga central e Máquina 1

Identificação		Máquina 1	
Valor de Referência		456,3	Tendência
Medições	1	459,9	3,6
	2	457,5	1,2
	3	453,4	-2,9
	4	455,6	-0,7
	5	459,3	3,0
	6	459,0	2,7
	7	458,4	2,1
	8	455,1	-1,2
	9	459,2	2,9
	10	455,3	-1,0
Média		457,28	0,98

O desvio-padrão da repetitividade, eq. (27): $\sigma_r = 2,26$.

O desvio-padrão da tendência, eq. (28): $\sigma_b = 0,71$.

O t estatístico da tendência, eq. (29): $t_{tendência} = 0,31$.

O intervalo de confiança da tendência a 95%, eq. (30): $IC_{\alpha_{0,05}} = [-0,64; 2,60]$.

Desta forma pode-se afirmar que o valor t estatístico está fora da região crítica e o valor zero encontra-se dentro do intervalo de confiança e, portanto a tendência é aceitável para a máquina.

5.2.2 Tendência para carga inferior e Máquina 1

O valor da carga inferior foi estimado substituindo o valor da média calculada na Tabela 11 e o valor da área nominal para a carga inferior na Tabela 4 na eq. (5). Portanto, a carga inferior é igual a 71,6 kN.

Tabela 11 - Valores da tendência para a carga inferior e Máquina 1

Identificação		Máquina 1	
Valor de Referência		456,3	Tendência
Medições	1	458,0	1,7
	2	459,1	2,8
	3	457,3	1,0
	4	457,6	1,3
	5	453,8	-2,5
	6	458,3	2,0
	7	457,0	0,7
	8	453,8	-2,5
	9	470,2	13,9
	10	455,6	-0,7
Média		458,06	1,76

O desvio-padrão da repetitividade, eq. (27): $\sigma_r = 4,62$.

O desvio-padrão da tendência, eq. (28): $\sigma_b = 1,46$.

O t estatístico da tendência, eq. (29): $t_{tendência} = 0,56$.

O intervalo de confiança da tendência a 95%, eq. (30): $IC_{\alpha_{0,05}} = [-1,55; 5,06]$.

Desta forma pode-se afirmar que o valor t estatístico está fora da região crítica e o valor zero encontra-se dentro do intervalo de confiança e, portanto a tendência é aceitável para a máquina.

5.2.3 Tendência para carga superior e Máquina 1

O valor da carga superior foi estimado substituindo o valor da média calculada na Tabela 12 e o valor da área nominal para a carga superior na Tabela 4 na eq. (5). Portanto, a carga superior é igual a 228,1 kN.

Tabela 12 - Valores da tendência para a carga superior e Máquina 1

Identificação		Máquina 1	
Valor de Referência		456,3	Tendência
Medições	1	460,7	4,4
	2	458,9	2,6
	3	455,9	-0,4
	4	453,3	-3,0
	5	456,9	0,6
	6	454,1	-2,2
	7	456,1	-0,2
	8	451,0	-5,3
	9	459,6	3,3
	10	455,4	-0,9
Média		456,19	-0,11

O desvio-padrão da repetitividade, eq. (27): $\sigma_r = 2,99$.

O desvio-padrão da tendência, eq. (28): $\sigma_b = 0,95$.

O t estatístico da tendência, eq. (29): $t_{tendência} = -0,04$.

O intervalo de confiança da tendência a 95%, eq. (30): $IC_{\alpha,0,95} = [-2,25; 2,03]$.

Desta forma pode-se afirmar que o valor t estatístico está fora da região crítica e o valor zero encontra-se dentro do intervalo de confiança e, portanto a tendência é aceitável para a máquina.

A Figura 13 traduz a representação gráfica da tendência e linearidade da Máquina 1. Pode-se perceber que o valor zero está entre os intervalos de confiança para as três cargas. Nessa figura os valores da tendências para as cargas inferior, central e superior estão dispostas da esquerda para a direita, respectivamente. Pode-se concluir que os valores das variáveis de localização de tendência e linearidade estão aceitáveis para a Máquina 1.

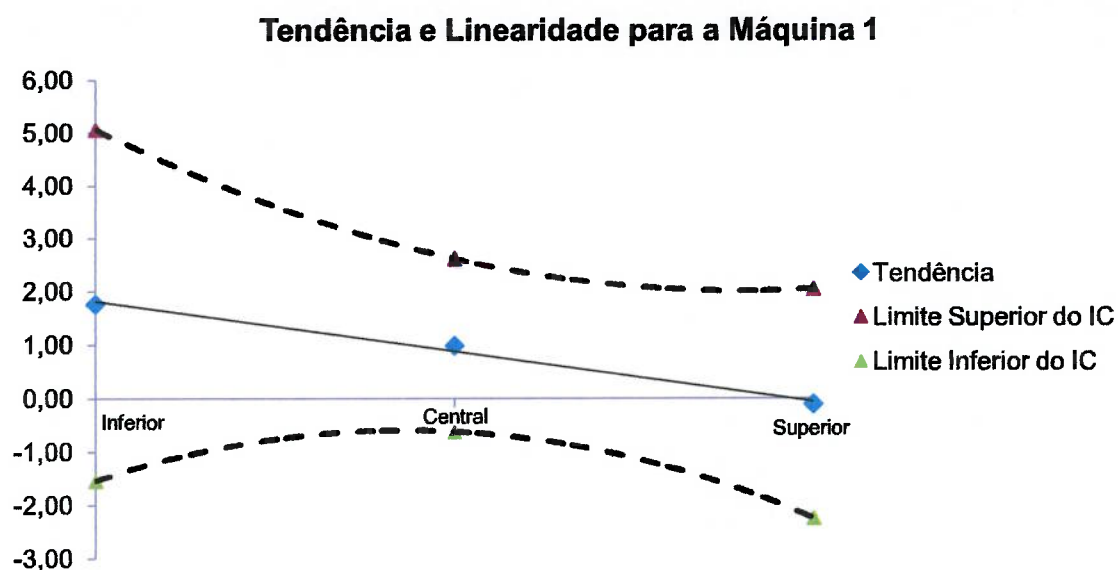


Figura 13 - Representação gráfica da tendência e linearidade para a Máquina 1.

A Figura 13 também mostra que para cargas mais baixas tanto a tendência quanto os valores dos intervalos de confiança são maiores. Esse comportamento era esperado uma vez que os valores de carga inferior são menores que 10% da capacidade de carga da máquina, aproximando-se do limite inferior nominal do equipamento.

5.2.4 Tendência para carga central e Máquina 2

O valor da carga central foi estimado substituindo o valor da média calculada na Tabela 13 e o valor da área nominal para a carga central na Tabela 4 na eq. (5). Portanto, a carga central é igual a 144,3 kN.

Tabela 13 - Valores da tendência para a carga central e Máquina 2

Identificação		Máquina 2	
Valor de Referência		456,3	Tendência
Medições	1	462,2	5,9
	2	458,1	1,8
	3	464,4	8,1
	4	464,7	8,4
	5	465,9	9,6
	6	460,4	4,1
	7	455,8	-0,5
	8	457,8	1,5
	9	470,3	14,0
	10	459,3	3,0
Média		461,89	5,59

O desvio-padrão da repetitividade, eq. (27): $\sigma_r = 4,43$.

O desvio-padrão da tendência, eq. (28): $\sigma_b = 1,40$.

O t estatístico da tendência, eq. (29): $t_{tendência} = 1,77$.

O intervalo de confiança da tendência a 95%, eq. (30): $IC_{\alpha_{0,05}} = [2,42; 8,76]$.

Desta forma pode-se afirmar que o valor t estatístico está fora da região crítica, mas o valor zero encontra-se fora do intervalo de confiança e, portanto a tendência é inaceitável para a máquina. Com esse resultado ruim da tendência na Máquina 2 a primeira ação tomada foi a execução de uma nova calibração nesse equipamento. Durante a calibração foi constatado que a máquina estava realmente com um desvio e foi necessário a realização de um ajuste para que retornasse a sua operação normal. Assim foi executado uma nova série de ensaios conforme descrito na Tabela 14.

O valor da carga central após os ajustes na Máquina 2 indicaram uma carga igual a 142,4 kN.

Tabela 14 - Valores da tendência para a carga central e Máquina 2, após a calibração do equipamento

Identificação		Máquina 2	
Valor de Referência		456,3	Tendência
Medições	1	455,7	-0,6
	2	458,2	1,9
	3	453,7	-2,6
	4	454,2	-2,1
	5	456,0	-0,3
	6	460,4	4,1
	7	454,6	-1,7
	8	459,3	3,0
	9	451,8	-4,5
	10	454,5	-1,8
Média		455,83	-0,47

O desvio-padrão da repetitividade, eq. (27): $\sigma_r = 2,70$.

O desvio-padrão da tendência, eq. (28): $\sigma_b = 0,85$.

O t estatístico da tendência, eq. (29): $t_{tendência} = -0,15$.

O intervalo de confiança da tendência a 95%, eq. (30): $IC_{\alpha_{0,05}} = [-2,40; 1,46]$.

Desta forma pode-se afirmar que o valor t estatístico está fora da região crítica e o valor zero encontra-se fora do intervalo de confiança e, portanto a tendência é inaceitável para a máquina.

5.2.5 Tendência para carga inferior e Máquina 2

O valor da carga inferior foi estimado substituindo o valor da média calculada na Tabela 15 e o valor da área nominal para a carga inferior na Tabela 4 na eq. (5). Portanto, a carga inferior é igual a 70,9 kN.

Tabela 15 - Valores da tendência para a carga inferior e Máquina 2

Identificação		Máquina 2	
Valor de Referência		456,3	Tendência
Medições	1	448,6	-7,7
	2	455,6	-0,7
	3	461,9	5,6
	4	449,0	-7,3
	5	445,5	-10,8
	6	449,4	-6,9
	7	457,2	0,9
	8	456,4	0,1
	9	460,7	4,4
	10	455,9	-0,4
Média		454,01	-2,29

O desvio-padrão da repetitividade, eq. (27): $\sigma_r = 5,55$.

O desvio-padrão da tendência, eq. (28): $\sigma_b = 1,76$.

O t estatístico da tendência, eq. (29): $t_{tendência} = -0,72$.

O intervalo de confiança da tendência a 95%, eq. (30): $IC_{\alpha_{0,05}} = [-6,26; 1,68]$.

Desta forma pode-se afirmar que o valor t estatístico está fora da região crítica e o valor zero encontra-se dentro do intervalo de confiança e, portanto a tendência é aceitável para a máquina.

5.2.6 Tendência para carga superior e Máquina 2

O valor da carga superior foi estimado substituindo o valor da média calculada na Tabela 16 e o valor da área nominal para a carga superior na Tabela 4 na eq. (5). Portanto, a carga superior é igual a 229,1 kN.

Tabela 16 - Valores da tendência para a carga superior e Máquina 2

Identificação		Máquina 2	
Valor de Referência		456,3	Tendência
Medições	1	457,4	1,1
	2	455,3	-1,0
	3	464,8	8,5
	4	453,8	-2,5
	5	460,5	4,2
	6	453,0	-3,3
	7	452,8	-3,5
	8	459,9	3,6
	9	461,4	5,1
	10	463,6	7,3
Média		458,24	1,94

O desvio-padrão da repetitividade, eq. (27): $\sigma_r = 4,42$.

O desvio-padrão da tendência, eq. (28): $\sigma_b = 1,40$.

O t estatístico da tendência, eq. (29): $t_{tendência} = 0,61$.

O intervalo de confiança da tendência a 95%, eq. (30): $IC_{\alpha_{0,05}} = [-1,23; 5,10]$.

Desta forma pode-se afirmar que o valor t estatístico está fora da região crítica e o valor zero encontra-se dentro do intervalo de confiança e, portanto a tendência é aceitável para a máquina.

A Figura 14 faz a representação gráfica da tendência e linearidade da Máquina 2. Pode-se perceber que o valor zero está entre os intervalos de confiança para as três cargas. Nessa figura os valores da tendências para as cargas inferior, central e superior estão dispostas da esquerda para a direita, respectivamente. Pode-se concluir que os valores das variáveis de localização de tendência e linearidade estão aceitáveis para a Máquina 2.

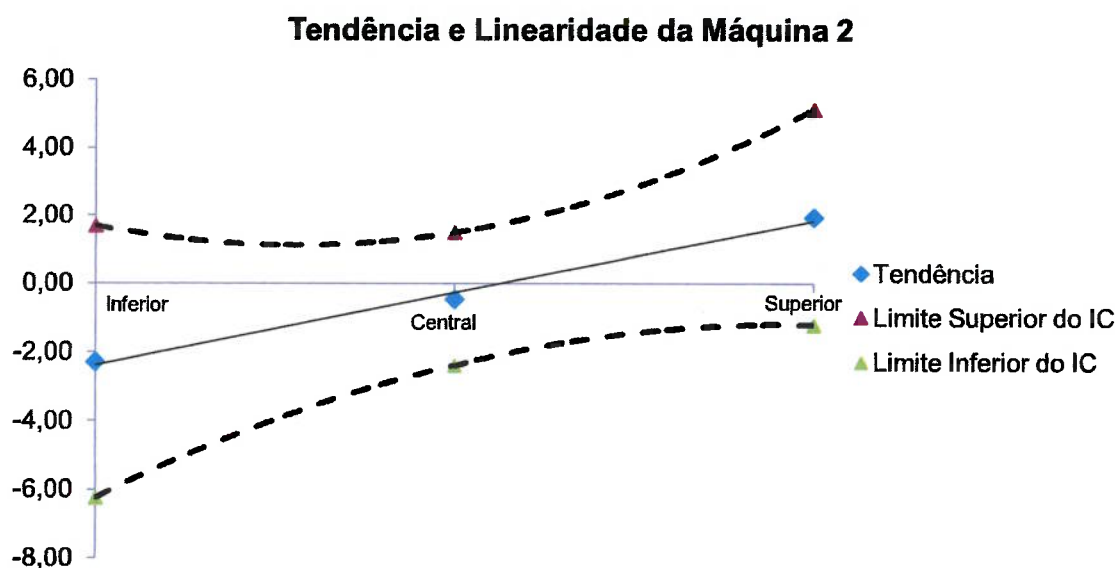


Figura 14 - Representação gráfica da tendência e linearidade para a Máquina 2

A Figura 14 também mostra que tanto para cargas mais baixas quanto para cargas mais altas a tendência e os valores dos intervalos de confiança são maiores. Esse comportamento era esperado uma vez que os valores de carga inferior representam 25%, os valores de carga central representam 50%, e os valores de carga superior representam 75%, da capacidade nominal do equipamento, evidenciando que a Máquina 2 tem uma resposta melhor quando exigida próxima a metade de sua capacidade nominal.

5.3 REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE

Essa etapa foi iniciada apenas após a confirmação de que as variáveis de localização estavam aceitáveis e sob controle, pois desta forma qualquer dúvida referente aos valores apresentados, pela duas máquinas de tração, foram excluídas.

Essa é com certeza a etapa mais importante de toda a análise do sistema de medição. A partir dos resultados dessa etapa é possível determinar se o sistema de medição é adequado, ou não, para a realização das medições. Nesse caso se as máquinas de ensaio de tração uniaxial são capazes de realizar medições das propriedades mecânicas e, posteriormente, seus resultados utilizados na certificação

dos produtos. A Tabela 17 resume os dados coletados para a Máquina 1 e a Tabela 18 para a Máquina 2.

Tabela 17 - Dados de Repetitividade e Reprodutibilidade para a Máquina 1.

Máquina 1		Amostras									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Repetição	1	460,0	459,5	457,2	458,0	458,2	459,8	455,9	456,0	459,3	457,8
	2	456,0	458,3	453,9	457,1	456,2	454,9	457,3	458,5	455,4	457,9
	3	456,8	454,4	455,3	457,2	456,0	455,1	459,0	455,4	458,7	457,1
Média		457,6	457,4	455,5	457,4	456,8	456,6	457,4	456,6	457,8	457,6
Amplitude		4,0	5,1	3,3	0,9	2,2	4,9	3,1	3,1	3,9	0,8

A média dos valores médios para a Máquina 1: $\bar{X}_{Máquina\ 1} = 457,1$.

A média das amplitudes para a Máquina 1: $\bar{R}_{Máquina\ 1} = 3,1$.

Tabela 18 - Dados de Repetitividade e Reprodutibilidade para a Máquina 2.

Máquina 2		Amostras									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Repetição	1	456,2	453,3	457,4	458,3	453,8	454,5	456,5	457,8	454,8	454,0
	2	454,3	452,5	456,1	456,7	454,3	454,4	459,7	457,8	455,5	456,4
	3	454,6	456,4	456,2	457,0	459,2	457,9	457,3	456,6	461,6	455,4
Média		455,0	454,1	456,6	457,3	455,8	455,6	457,8	457,4	457,3	455,3
Amplitude		1,9	3,9	1,3	1,6	5,4	3,5	3,2	1,2	6,8	2,4

A média dos valores médios para a Máquina 2: $\bar{X}_{Máquina\ 2} = 456,2$.

A média das amplitudes para a Máquina 2: $\bar{R}_{Máquina\ 2} = 3,1$.

A média das amplitudes médias: $\bar{\bar{R}} = 3,1$.

A amplitude da diferença dos valores médios de cada máquina: $\bar{X}_{DIFF} = 0,9$.

O limite superior de controle das amplitudes: $LSC_{\bar{R}} = \bar{\bar{R}} \times D_4 = 3,1 \times 2,58 = 8,0$. O valor do $LSC_{\bar{R}}$ foi comparado com as amplitudes encontradas em cada amostra de cada máquina para evidenciar amostras duvidosas, nesse caso: $Amplitude > LSC_{\bar{R}}$. Tanto para a Máquina 1 quanto para a Máquina 2 não foram evidenciadas amostras duvidosas.

- Cálculo da variação total (VT), eq. (31):

$$VT = \frac{550 - 400}{6} = 25$$

- Repetitividade (VE), eq.(32), e percentual na variação total ($\%VE$), eq. (33):

$$VE = 3,1 \times 0,5908 = 1,846$$

$$\%VE = 100 \times \frac{1,846}{25} = 7,38\%$$

- Cálculo da reprodutibilidade (VA), eq. (34), e percentual na variação total ($\%VA$), eq. (35):

$$VA = \sqrt{(0,9 \times 0,7071)^2 - \left(\frac{1,846^2}{10 \times 3}\right)} = 0,503$$

$$\%VA = 100 \times \frac{0,503}{25} = 2,01\%$$

- Cálculo da repetitividade e reprodutibilidade ($GR\&R$), eq. (36), e percentual na variação total ($\%GR\&R$), eq. (37):

$$GR\&R = \sqrt{1,846^2 + 0,503^2} = 1,913$$

$$\%GR\&R = 100 \times \frac{1,913}{25} = 7,65\%$$

- Cálculo da variação das amostras (VP), eq. (38), e percentual na variação total ($\%VP$), eq. (39):

$$VP = \sqrt{25^2 - 1,913^2} = 24,927$$

$$\%VP = 100 \times \frac{24,927}{25} = 99,71\%$$

- Cálculo do número de distintas categorias (ndc), eq. (40):

$$ndc = 1,41 \frac{24,927}{1,913} = 18,4 \sim 18$$

Os dados apresentados acima mostram que o sistema de medição para os ensaios de tração uniaxial utilizado na certificação das propriedades mecânicas dos produtos siderúrgicos é adequado para o uso pretendido. Quando verifica-se o percentual da variação responsável pelo sistema de medição sobre a variação total, conhecido como GR&R, o resultado foi abaixo de 10% o que comprova a aceitação do sistema de medição (AIAG, 2010). Além disso, outra informação importante é que não importa qual máquina de tração está sendo utilizada para a liberação dos resultados dos ensaios, pois o percentual referente a variação entre as máquinas é abaixo de 3% da variação total. A Figura 15 mostra quanto cada componente das variáveis de dispersão contribuem para a variação total. Pode-se notar que a variação das amostras é a maior responsável e está intimamente ligada com a própria variação do processo (LIMA, FERREIRA *et al.*, 2010). O número de distintas categorias (ndc) é muito superior a 5 o que mostra que a resolução do sistema de medição é absolutamente adequada para a detecção de variações dentro da faixa de liberação do produto.

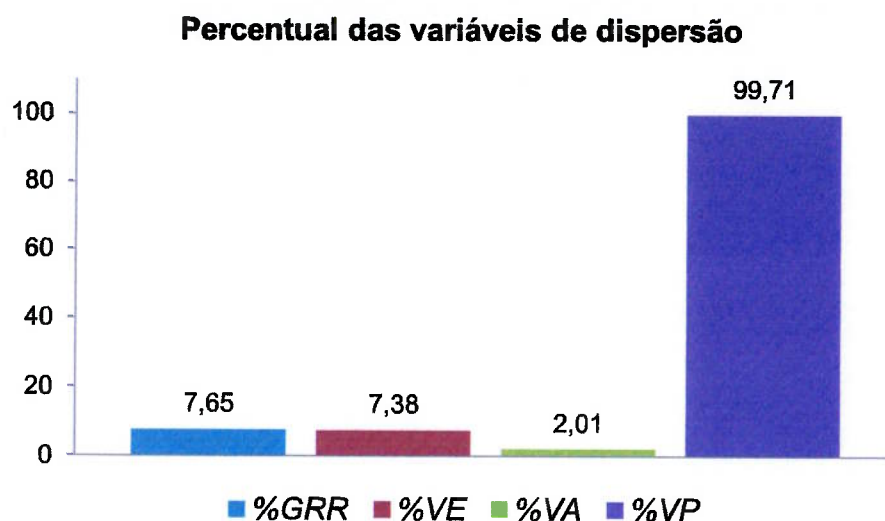


Figura 15 - Percentual das variáveis de dispersão sobre a variação total (VT)

5.4 ESTABILIDADE

Apesar da estabilidade ser uma das componentes das variáveis de localização a sua determinação foi executada após a comprovação de todos os outros critérios de aceitação da análise do sistema de medição. Isso deve-se principalmente pelo fato de que a estabilidade mostra o comportamento do sistema de medição ao longo do tempo, e caso a análise do sistema de medição não fosse satisfatória todos os resultados da estabilidade deveriam ser descartados.

Com a aprovação do sistema de medição a estabilidade foi acompanhada, até o término desse trabalho, em 15 ocasiões com os ensaios sendo executados a cada dois dias, totalizando o acompanhamento de ambas as máquinas durante 30 dias, dados registrados na Tabela 19. Esses ensaios seguiram as mesmas características dos ensaios de homogeneidade com duas amostras por máquina para cada uma das quinze ocasiões. Esses resultados estão registrados na Figura 16 para a Máquina 1 e na Figura 17 para a Máquina 2. Os limites das cartas de controle são os mesmos apresentados ao final do item sobre a homogeneidade das amostras.

Tabela 19 - Dados coletados para a estabilidade de ambas as máquinas, valores em MPa.

Ordem de medição	Máquina 1		Máquina 2	
	Corpo de Prova		Corpo de Prova	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
1	457,7	457,0	455,4	456,8
2	457,0	456,8	453,0	455,7
3	458,5	458,6	456,8	456,5
4	458,3	456,4	459,4	454,1
5	454,6	454,7	459,2	453,4
6	460,4	456,0	460,5	455,2
7	454,2	457,5	450,7	454,4
8	457,7	458,8	455,6	457,6
9	452,7	455,3	458,9	452,3
10	456,0	452,2	453,5	459,6
11	454,3	458,0	454,5	454,2
12	455,7	455,4	452,0	456,4
13	457,2	457,5	451,6	454,1
14	453,8	452,1	453,8	450,9
15	453,9	457,7	454,3	455,6

O estudo da estabilidade das máquina descritas nesse trabalho tem outra função além da comprovação de um dos critérios previstos na análise dos sistemas de medição. Cada vez mais há a necessidade que os laboratórios que fornecem ensaios para as certificações de produtos sejam acreditados pelo INMETRO na norma ABNT NBR ISO/IEC 17025, (ABNT, 2005). Esta norma possui diversos requisitos para a garantia da qualidade dos resultados dos ensaios. Um destes requisitos está descrito no seu item 5.9.1: "*O laboratório deve ter procedimentos de controle da qualidade para monitorar a validade dos ensaios e calibrações realizados*". O resultado dos valores observados pelo estudo da estabilidade das máquinas atende esse requisito, uma vez que o material teve sua homogeneidade assegurada e atua como material de referência secundário.

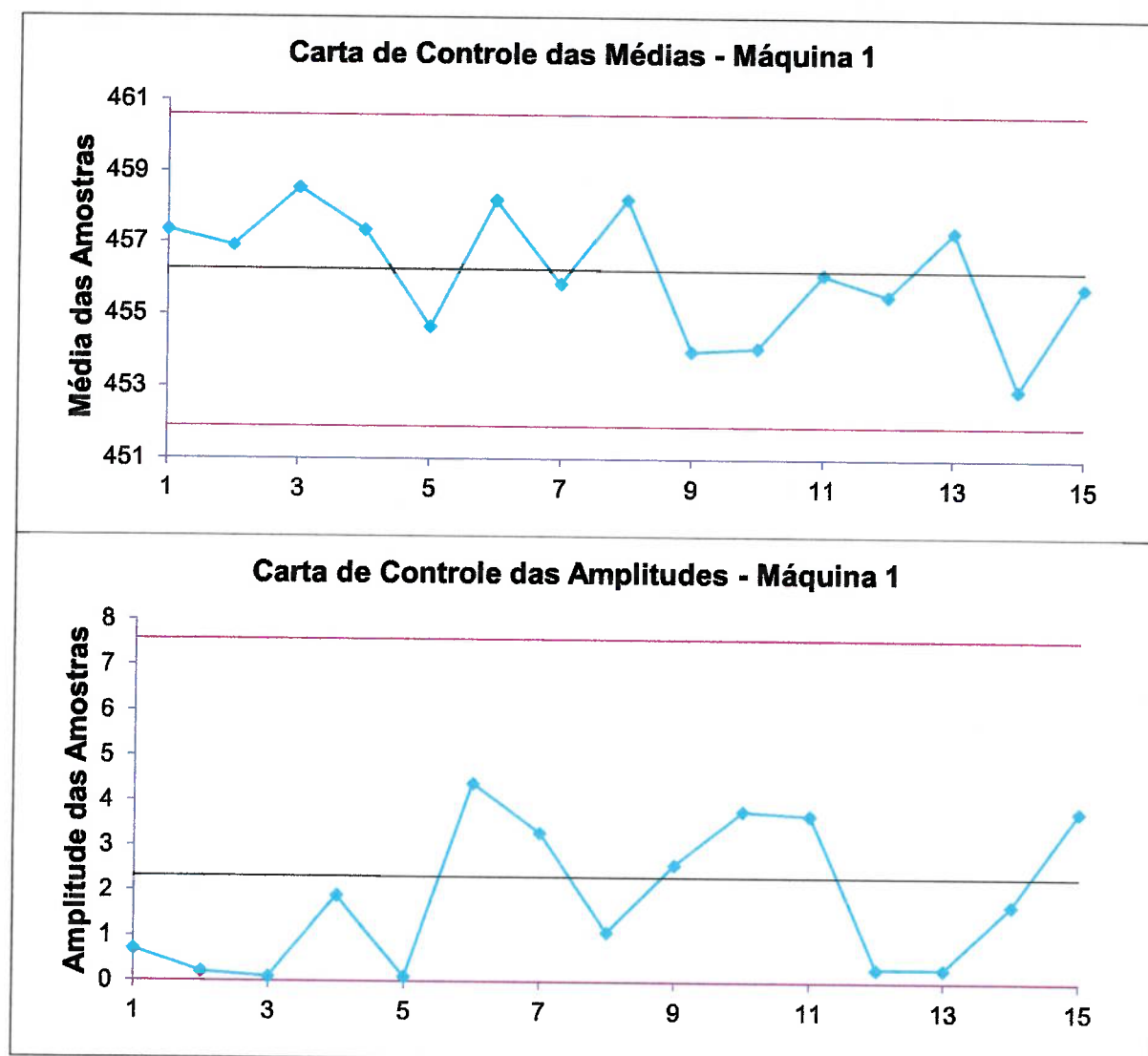


Figura 16 - Cartas de controle da estabilidade para a Máquina 1

Para as Máquinas 1 e 2, analisadas nas cartas apresentadas na Figura 16 e na Figura 17 respectivamente, é possível perceber que não há a presença de comportamentos que indiquem a presença de causas especiais, como (OAKLAND, 2008):

- Nenhum ponto está fora dos limites de controle;
- Não há a presença de mais de 6 pontos de um lado, superior ou inferior, a média geral;
- Não há a presença de mais de 6 pontos que estejam subindo ou descendo consecutivamente;

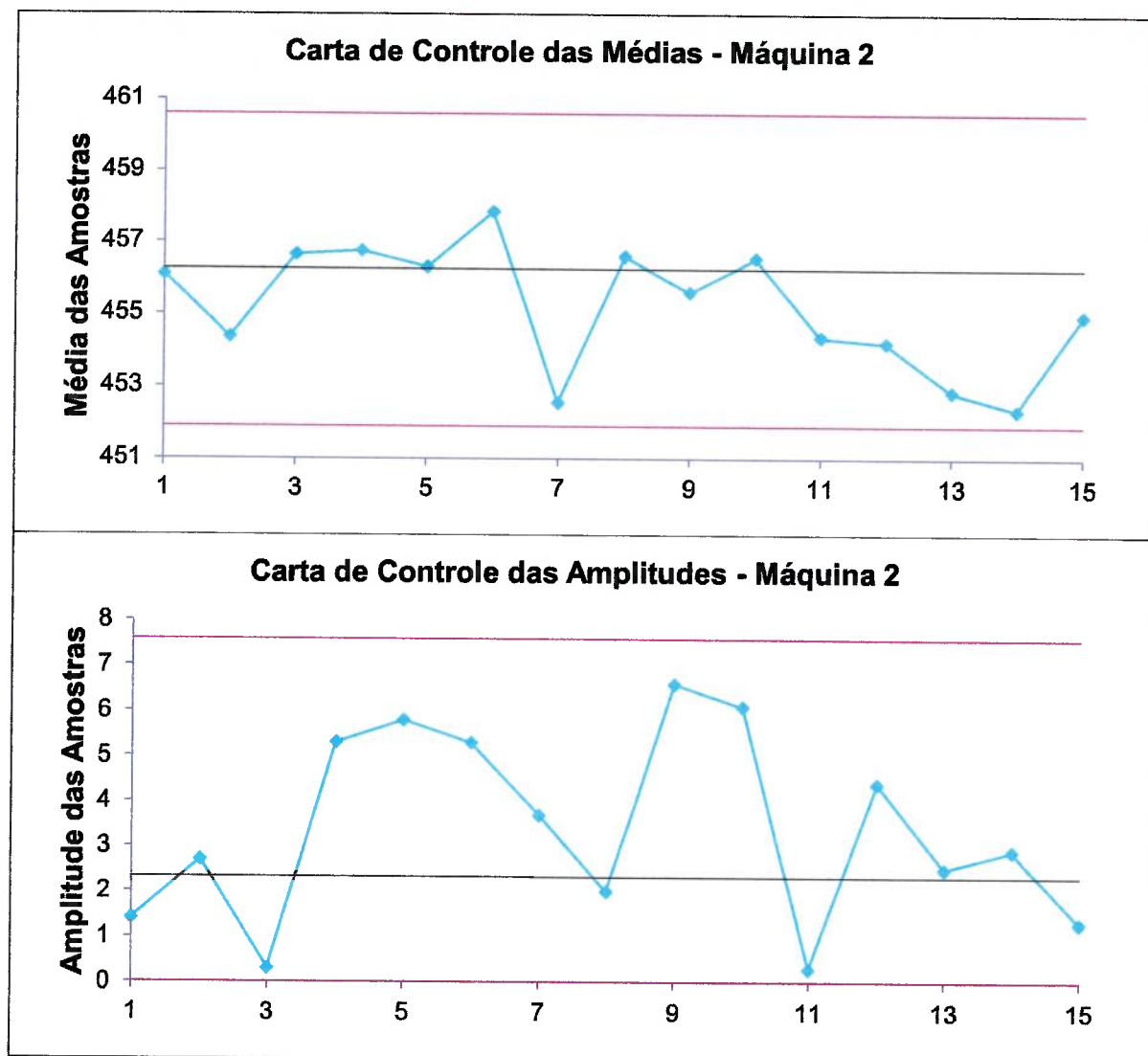


Figura 17 - Cartas de controle da estabilidade para a Máquina 2

6 CONCLUSÕES

Os resultados revelaram que foi possível a realização da análise dos sistemas de medição para sistemas não replicáveis. Os métodos descritos neste trabalho mostraram duas técnicas estatísticas para a comprovação da homogeneidade das amostras e que apresentaram os mesmos resultados para ambas as técnicas, não sendo evidente uma técnica preferencial.

Era esperado a comprovação da homogeneidade das amostras para as duas propriedades do material, limite de escoamento e limite de resistência, porém a propriedade do limite de escoamento foi afetada pelo próprio processo de obtenção dos corpos de prova de tração, e teve de ser descartado para os outros requisitos esperados na análise do sistema de medição.

O limite de resistência do material foi aprovado em todos os requisitos esperados na análise do sistema de medição como a tendência, a linearidade, a estabilidade, a repetitividade e reprodutibilidade. O sistema de medição obteve um percentual da variação total de 7,65%, desta forma sendo aceitável para a sua finalidade.

Foi comprovada a necessidade da execução da determinação das variáveis de localização antes das variáveis de dispersão, uma vez que, através dos resultados de tendência, foi identificada a necessidade de uma nova calibração para a adequação de uma das máquinas utilizadas no estudo.

Por fim, a comprovação da homogeneidade das amostras, além de ser o fator mais importante na análise dos sistemas de medição para sistemas não replicáveis, foi utilizado para a determinação das condições de estabilidade que as máquinas devem seguir, sendo uma ferramenta para o monitoramento da validade dos ensaios de tração executados nas duas máquinas estudadas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar outros métodos de preparação dos corpos de prova de tração em busca da preservação da característica de transição descontínua do limite de escoamento da especificação ASTM A36;
- Realizar a análise do sistema de medição em amostras de mesma qualidade, porém diferentes lotes em busca da determinação da variabilidade do sistema de medição sobre o processo e não sobre as tolerâncias do produto;
- Executar os ensaios de homogeneidade em qualidades que não apresentem a característica de limite de escoamento descontínuo para a utilização dos dados no controle da estabilidade dos extensômetros.

8 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR-ISO 7500-1:** Materiais metálicos - Calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial - Parte 1: Máquinas de ensaio de tração/compressão - Calibração do sistema de medição da força. Rio de Janeiro, 2004. 19 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ISO/IEC 17025:** Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro, 2005. 31 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ISO/TS 16949:** Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos particulares para aplicação da ABNT NBR ISO 9001:2008 para organizações de produção automotiva e peças de reposição pertinentes. Rio de Janeiro, 2010. 45 p.

AIAG. Automotive Industry Action Group. **Análise dos Sistemas de Medição - MSA:** Manual de Referência. 4ª ed. Instituto da Qualidade Automotiva - IQA, 2010. 231 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A36/ A36M:** Standard Specification for Carbon Structural Steel. Pennsylvania, 2008. 3 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A6/A6M:** Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling. Pennsylvania, 2011a. 63 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A370:** Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. Pennsylvania, 2011b. 47 p.

BOWER, K. M. Non-Tradition MSA with Continuous Data. **Six Sigma Forum - American Society for Quality**, 7 p., Dez. 2003.

CALLISTER, W. D. Mechanical Properties of Metals. **Materials science and engineering : an introduction**. York: John Wiley & Sons, 2007, 7ª ed., p. 131-173.

DIETER, G. E. Strengthening Mechanisms. **Mechanical Metallurgy: SI Metric Edition**. Singapura: McGraw-Hill, 1988, 3ª ed., p. 184-240.

GAWLIK, J.; REWILAK, J. Repeatability and reproducibility (R&R) studies for the assessment of measurement system capability. **e & i Elektrotechnik und Informationstechnik**, v. 116, n. 4, 266-270 p., Set. 1999.

GORMAN, D.; BOWER, K. M. Measurement System Analysis and Destructive Testing. **Six Sigma Forum Magazine**, v. 01, n. 04, 16-19 p., Ago. 2002.

HAN, Y.-J.; HE, Z. An Applied Study of Destructive Measurement System Analysis. **Industrial Electronics and Applications**, 30-34 p., China, Mai. 2007.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia - VIM: conceitos fundamentais e gerais e termos associados**. 1ª ed. Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial, 2008. 78 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5725-2: Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method**. Switzerland, 1994. 42 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13528: Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons**. Switzerland, 2005. 66 p.

KÄLLGREN, H. *et al.* Role of measurement uncertainty in conformity assessment in legal metrology and trade. **Accreditation and Quality Assurance: Journal for Quality, Comparability and Reliability in Chemical Measurement**, v. 8, n. 12, 541-547 p., 2003.

LIMA, J. T. *et al.* Measurement Systems Analysis (MSA): garantindo a consistência dos controles nos Processos de Fabricação. **Banas Metrologia & Instrumentação**, 74-79 p., Jun. 2010. Disponível em: <<http://banasmetrologia.com.br/wp-content/uploads/2012/02/Sistema-de-Medi%C3%A7%C3%A3o1.pdf>>. Acesso em: 09 abr. 2012.

MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. D. Inferência Estatística - Teste de Hipóteses. **Noções de probabilidade e estatística**. São Paulo: Ed.USP, 2002, 5ª ed., p. 243-280.

MAST, J. D.; TRIP, A. Gauge R&R Studies for Destructive Measurement. **Journal of Quality Technology**, v. 37, n. 1, 40-49 p., Jan. 2005.

OAKLAND, J. S. Apêndices B e C. **Statistical Process Control**. Oxford: Elsevier, 2008, 6ª ed., p. 401-402.

ROTONDARO, R. G.; RAMOS, A. W. Mantendo o processo sob controle. **Seis Sigma: estratégia gerencial para melhoria de processos, produtos e serviços**. São Paulo: Atlas, 2011, 1ª ed., p. 294-352.

RUGGERI, F. *et al.* Measurement Systems Analysis. **Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability**. Pennsylvania: John Wiley, 2007a. v. 3, p. 1061-1077.

_____. Gauge Repeatability and Reproducibility (R&R). **Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability**. Pennsylvania: John Wiley, 2007b. v. 2, p. 705-727.

SPIERS, B. Analysis of Destructive Measuring Systems. **ASQC Quality Congress Transactions**, v. 43, n. 0, 22-27 p., Toronto 1989.

THOMPSON, M. *et al.* The International Harmonized Protocol for the Proficiency Testing of Analytical Chemistry Laboratories. **IUPAC, Pure and Applied Chemistry**, v. 78, n. 01, 145-196 p., Jan. 2006.