

Tema: Gestão Sistêmica

ANÁLISE DA CONFIABILIDADE NA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM ENSAIOS DE TRAÇÃO*

Cláudia Lisiane Fanezi da Rocha¹

Daniel Antonio Kapper Fabricio²

Jefferson Haag³

Telmo Roberto Strohacker⁴

Resumo

Softwares desenvolvidos para análise das propriedades mecânicas em máquinas de ensaio de tração facilitam o trabalho rotineiro de caracterização dos materiais. No entanto, estes aplicativos não apresentam informações importantes como cálculos da incerteza de medição, cabendo uma análise da confiabilidade dos resultados obtidos por esses programas. O presente trabalho se propõe a comparar os valores dos limites de escoamento, de resistência, do módulo de elasticidade e da deformação final obtidos através do software *Instron Bluehill*[®] com os valores calculados através da análise minuciosa dos dados provenientes dos instrumentos de medição (célula de carga, extensômetro, sensor de deslocamento). Busca-se, assim, fornecer informações que auxiliem o trabalho de técnicos e engenheiros, além de estimar o erro percentual e desenvolver uma metodologia periódica para a garantia da confiabilidade da máquina de ensaio.

Palavras-chave: Propriedades Mecânicas; Ensaio de Tração; Confiabilidade.

RELIABILITY ANALYSIS IN THE DETERMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES IN TESTILE TESTS

Abstract

There are computational programs developed for the analysis of mechanical properties in tensile testing machines, which facilitate the routine to determine material properties. However, these programs do not present important data such as the estimation of their measurement uncertainty, requiring an analysis of the reliability of the results obtained. This work aims to compare the values of yield strength, tensile strength, modulus of elasticity and total extension obtained from *Instron Bluehill*[®] software with the values calculated by the direct analysis of data from the measuring instruments (load cell, extensometer and displacement sensor). Thus, this paper intends to provide information to help technicians and engineers, and also to estimate the relative error and develop a periodical methodology to ensure the reliability of the testing machine.

Keywords: Mechanical Properties; Tensile Test; Reliability.

¹ Engenheira Metalúrgica, Doutoranda, PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Engenheiro de Produção, Mestrando, PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil

³ Engenheiro Metalúrgico, Mestrando, PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalúrgico, Professor Doutor, PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

O ensaio de tração é amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, devido à vantagem de fornecer dados de uma ampla gama de propriedades mecânicas dos materiais. Além disso, o ensaio é relativamente simples e de realização rápida, podendo ser aplicado a diversos tipos de materiais de engenharia. Na execução do ensaio, a curva tensão-deformação convencional é obtida por carregamento uniaxial estático em corpos de prova padronizados [1].

Os ensaios de tração são rotineiramente aplicados na caracterização dos diversos tipos de materiais existentes. Os resultados oriundos dos ensaios são influenciados por diversas variáveis como: temperatura, taxa de deformação, anisotropia do material, tamanho de grão, porcentagem de impurezas e condições ambientais [2-4]. Ao executar o ensaio em máquinas universais, há programas computacionais que facilitam a aquisição e análise dos dados do ensaio. Em particular, o *software Instron Bluehill®*, utilizado nesse trabalho, determina automaticamente algumas propriedades do ensaio de tração, tais como os limites de escoamento e resistência. Para verificar a exatidão dos valores das propriedades calculadas pelo *software*, é de fundamental importância comparar os resultados obtidos com outro método de referência. A determinação dessas propriedades pode ser realizada por meio de planilhas eletrônicas, tratando-se os dados brutos adquiridos durante o ensaio.

Para análise dos dados, pode-se utilizar simplesmente o erro percentual entre os valores medidos. Para uma análise mais completa, é importante utilizar métodos estatísticos, tais como a Análise de Variância (*Analysis of Variance - ANOVA*). A ANOVA é uma metodologia que avalia a significância dos diversos fatores e interações. Em particular, a ANOVA de dois fatores (*two-way ANOVA*) busca identificar se os valores da média da variável de resposta diferem entre si devido ao efeito de dois fatores controláveis [5].

Portanto, o presente trabalho se propõe a comparar os valores dos limites de escoamento e de resistência obtidos através do *software Instron Bluehill®* com os valores obtidos diretamente dos instrumentos de medição, através do tratamento desses dados. Busca-se, assim, validar ou não os resultados calculados automaticamente pelo *software*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados ensaios de tração conforme previsto na norma ASTM E8/E8M [6], através de uma máquina eletromecânica marca *Instron* modelo 5585H com capacidade para 250 kN (25 toneladas). Tais ensaios foram executados a temperatura ambiente (aproximadamente 23°C).

Foram ensaiados corpos de prova (CPs) de seção retangular (Figura 1) e corpos de prova de seção circular (Figura 2). Para cada geometria, foram ensaiadas três amostras com escoamento contínuo e três com escoamento descontínuo.

As amostras estão identificadas com a seguinte estrutura: X-Y-Z, onde:

- X representa a geometria do corpo de prova, sendo C para Circular e R para Retangular;
- Y representa o patamar de escoamento, onde C indica um escoamento Contínuo e D um escoamento Descontínuo;
- Z representa o número do corpo de prova dentro de uma mesma condição (1, 2, 3).

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

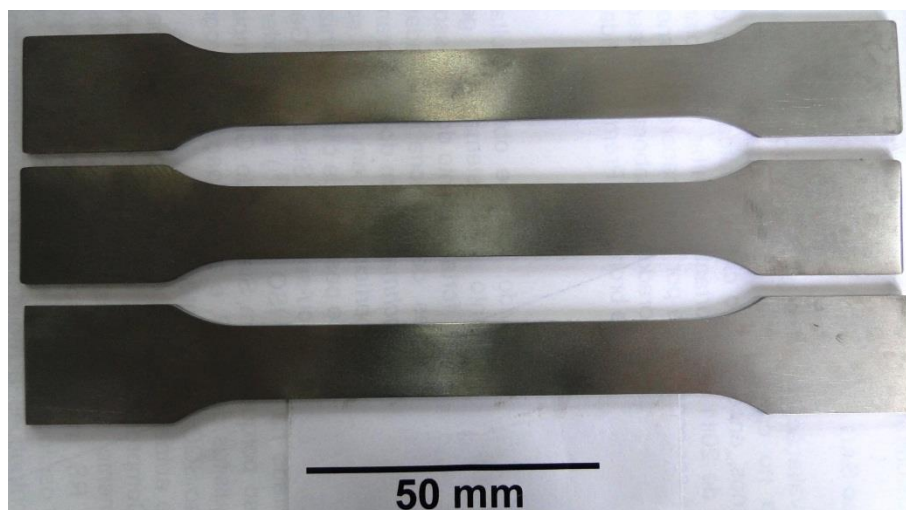


Figura 1. Corpos de prova de seção retangular.

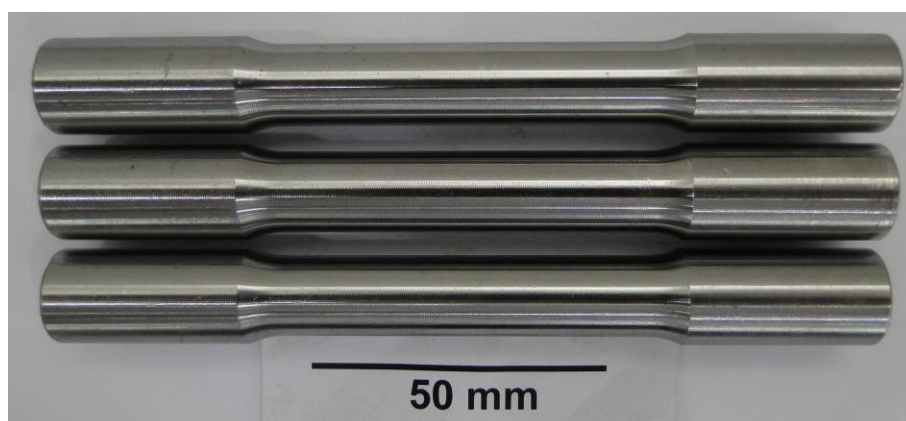


Figura 2. Corpos de prova de seção circular.

A Tabela 1 apresenta a identificação adotada para os doze corpos de prova ensaiados.

Tabela 1. Identificação dos corpos de prova

Identificação do CP	Geometria da Seção	Tipo de Escoamento
C-C-1	Circular	Contínuo
C-C-2	Circular	Contínuo
C-C-3	Circular	Contínuo
R-C-1	Retangular	Contínuo
R-C-2	Retangular	Contínuo
R-C-3	Retangular	Contínuo
C-D-1	Circular	Descontínuo
C-D-2	Circular	Descontínuo
C-D-3	Circular	Descontínuo
R-D-1	Retangular	Descontínuo
R-D-2	Retangular	Descontínuo
R-D-3	Retangular	Descontínuo

Os dados do ensaio foram tratados e analisados através de planilhas eletrônicas (método I), e em seguida foram comparados com os valores obtidos automaticamente através do software *Instron Bluehill*[®] (método II).

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

O procedimento utilizado para o tratamento de dados em planilhas eletrônicas é apresentado em uma representação esquemática na Figura 3 e na Figura 4. Esse procedimento é baseado nas normas ASTM E8/E8M [6] e ISO 6892-1 [7]. Para as amostras com escoamento contínuo, o limite de escoamento (σ_e) é calculado traçando uma reta paralela à região linear, utilizando o método *offset* e o limite n , este que é, normalmente 0,2% para metais e ligas. A tensão referente à intersecção entre a reta paralela e a curva tensão-deformação é o limite de escoamento do material. As amostras que apresentaram escoamento descontínuo tiveram o limite de escoamento calculado diretamente através da tensão mínima alcançada no patamar de escoamento. O limite de resistência (σ_u) é o valor máximo da tensão alcançada no ensaio de tração. O módulo de elasticidade (E) é calculado através da regressão dos pontos na região linear da curva tensão-deformação. Por fim, a deformação final (ϵ_f) é o último ponto de deformação da curva antes da fratura ocorrer, ou seja, a queda abrupta da tensão a subsequente deformação do corpo de prova.

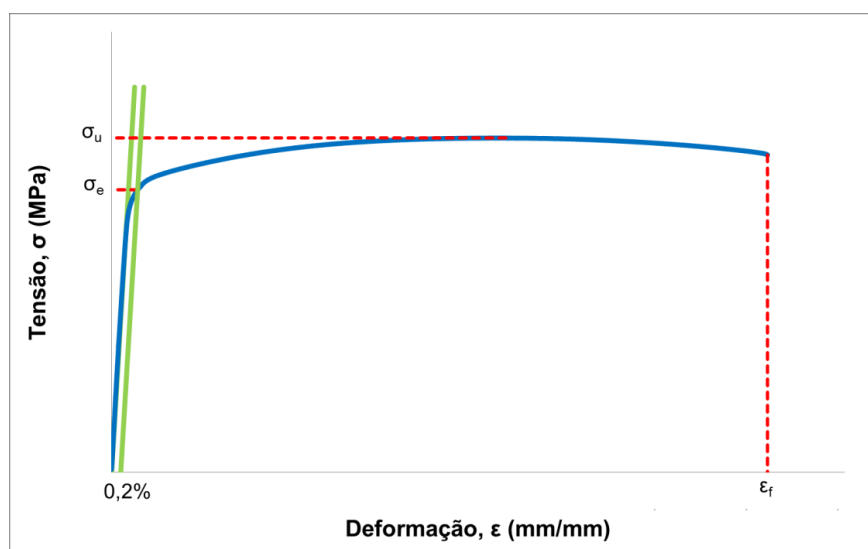


Figura 3. Representação esquemática do tratamento de dados por planilhas eletrônicas com escoamento contínuo.

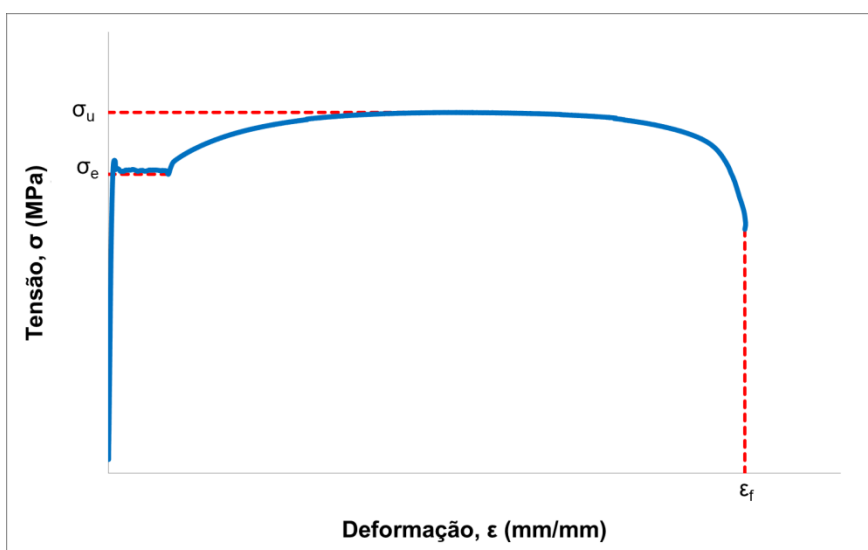


Figura 4. Representação esquemática do tratamento de dados para amostra com escoamento descontínuo.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Para cada uma das doze amostras ensaiadas, foram determinados os valores das propriedades σ_e , σ_u , E e ϵ_f . Cada uma dessas propriedades foi obtida pelo método direto (resultado calculado automaticamente pelo equipamento) e por filtragem (tratamento) dos dados, sendo comparados os seus respectivos valores.

Para a comparação entre os resultados tratados e os valores obtidos diretamente da máquina, foi realizado o cálculo do erro percentual ($EP\%$) entre os mesmos, assumindo o resultado calculado em planilha eletrônica como valor referência (VR) e o resultado obtido pela máquina como valor aproximado (VA). Esse cálculo é demonstrado na Equação 1.

$$EP\% = \frac{|VR-VA|}{VR} * 100\% \quad (1)$$

Complementarmente, foi realizada a *two-way ANOVA* entre os valores obtidos, visando verificar a significância das eventuais diferenças obtidas entre os métodos. Foram considerados os seguintes fatores controláveis:

- Método de cálculo: análise via planilha eletrônica (método I) e valor da máquina (método II);
- Tipo de ensaio: corpo de prova circular com escoamento contínuo, corpo de prova retangular com escoamento contínuo, CP circular com escoamento descontínuo e CP retangular com escoamento descontínuo,

A *ANOVA* foi realizada com nível de significância de 95% e, como critério de aceitação, foi analisado se os valores de F calculados foram inferiores aos valores estatísticos F tabelados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do ensaio de tração dos doze corpos de prova se encontram na Tabela 2. Na tabela, as colunas identificadas com I representam os valores tratados, e as colunas com II são os valores obtidos diretamente da máquina de ensaio.

Tabela 2. Resultados dos ensaios

CP	σ_e [MPa]		σ_u [MPa]		E [MPa]		ϵ_f [%]	
	I	II	I	II	I	II	I	II
C-C-1	677,69	682,26	763,98	763,98	98333,30	94139,03	16,69%	16,16%
C-C-2	681,06	684,19	765,37	765,37	94152,81	92224,07	13,35%	14,98%
C-C-3	680,40	678,25	761,76	761,76	98288,52	127562,48	12,98%	9,99%
R-C-1	215,75	217,02	289,92	289,92	152181,91	125636,40	27,62%	27,50%
R-C-2	217,88	218,52	291,25	291,25	148684,33	131981,58	25,21%	25,08%
R-C-3	224,06	224,56	295,80	295,80	148269,53	138462,57	22,30%	21,72%
C-D-1	388,73	394,92	579,19	579,19	218402,03	221318,43	25,25%	25,23%
C-D-2	387,42	400,39	585,45	585,45	225779,01	227097,58	32,96%	29,89%
C-D-3	395,49	409,22	589,67	589,67	202235,00	217172,97	40,33%	25,28%
R-D-1	260,90	264,55	319,39	319,39	109821,63	113081,26	33,87%	33,24%
R-D-2	270,24	272,37	327,84	327,84	124060,92	128962,17	30,37%	29,39%
R-D-3	219,95	219,54	348,27	348,27	82037,57	91859,56	56,37%	53,37%

A Figura 5 apresenta os valores dos erros percentuais encontrados para as propriedades entre os dois métodos de análise.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

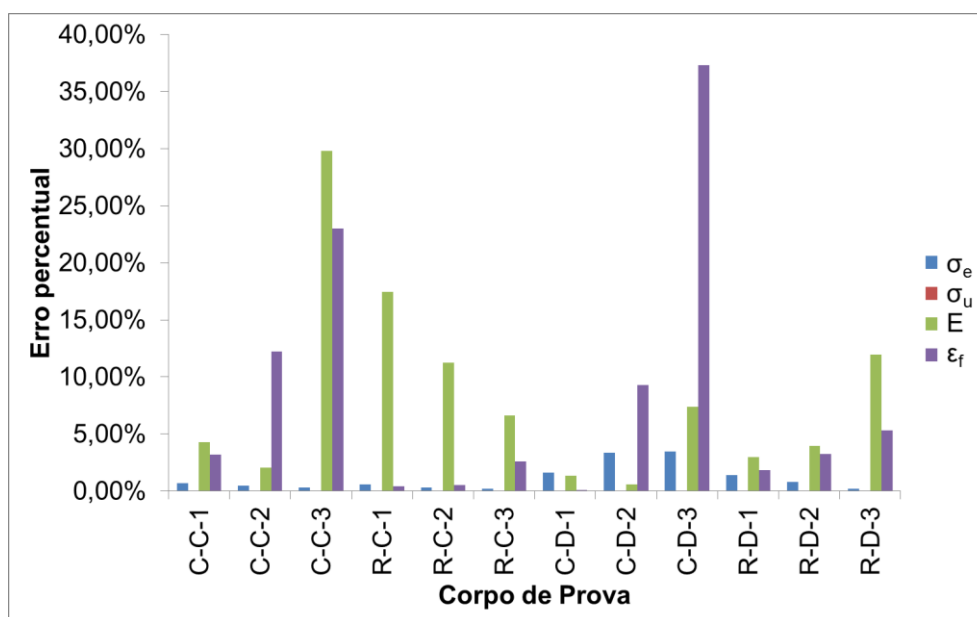


Figura 5. Erro percentual entre os métodos I e II.

Nota-se, pela Figura 5, que o erro percentual entre os métodos na determinação do limite de escoamento varia entre 0,19% e 3,47% para os diferentes corpos de prova. No caso do módulo de elasticidade, o erro percentual varia entre 0,58% e 29,78%, e para a deformação final, esse valor varia entre 0,08% e 37,32%. Somente para o limite de resistência não há nenhuma diferença entre os métodos I e II.

Assim, é importante avaliar a significância da diferença entre os métodos para os valores de σ_e , E e ϵ_f . Portanto, foi realizada uma *two-way ANOVA* para cada uma dessas propriedades, considerando como fatores controláveis o tipo de corpo de prova e o método de cálculo, a um nível de significância de 95% para validação.

A Tabela 3 apresenta os resultados da ANOVA para o limite de escoamento.

Tabela 3. ANOVA para o limite de escoamento

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tipo de ensaio	796469,1	3	265489,7	1290,116	2,75E-19	3,238872
Método de cálculo	89,01202	1	89,01202	0,432544	0,520094	4,493998
Interações	102,1879	3	34,06264	0,165523	0,918039	3,238872
Resíduo	3292,599	16	205,7874			
Total	799952,9	23	799952,9			

A Tabela 4 mostra os resultados da *two-way ANOVA* para o módulo de elasticidade.

Tabela 4. ANOVA para o módulo de elasticidade

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tipo de ensaio	5,23E+10	3	1,74E+10	98,20483	1,62E-10	3,238872
Método de cálculo	2191035	1	2191035	0,012347	0,912905	4,493998
Interações	6,71E+08	3	2,24E+08	1,261267	0,321024	3,238872
Resíduo	2,84E+09	16	1,77E+08			
Total	5,58E+10	23				

Por fim, a Tabela 5 apresenta a ANOVA para a deformação final.

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Tabela 5. ANOVA para a deformação final

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Tipo de ensaio	0,201215	3	0,067072	11,68035	0,000264	3,238872
Método de cálculo	0,002702	1	0,002702	0,470618	0,502524	4,493998
Interações	0,003208	3	0,001069	0,186198	0,904228	3,238872
Resíduo	0,091876	16	0,005742			
Total	0,299001	23				

A Tabela 6 apresenta as conclusões a respeito das três análises de variância realizadas, mostrando quais fatores foram significativos a um nível de confiança de 95%.

Tabela 6. Conclusão das análises

Propriedade	Fonte da variação	Influência
σ_e	Tipo de ensaio	Significativa
	Método de cálculo	Não significativa
	Interação entre os fatores	Não significativa
E	Tipo de ensaio	Significativa
	Método de cálculo	Não significativa
	Interação entre os fatores	Não significativa
ϵ_f	Tipo de ensaio	Significativa
	Método de cálculo	Não significativa
	Interação entre os fatores	Não significativa

Nos dois casos, os valores estatísticos F calculados foram menores que os valores F críticos para o método de cálculo, sendo assim possível afirmar, a um nível de confiança de 95%, que a diferença entre os métodos de determinação das propriedades não foi superior ao erro aleatório.

Pode-se notar uma diferença significativa entre os tipos de ensaio realizados. Esse resultado era esperado, visto que foram ensaiados materiais diferentes e com corpos de prova de geometrias diferentes.

Apesar de não apresentar diferença significativa entre o método de cálculo pela ANOVA, devem-se avaliar cuidadosamente os fatores que a afetam cada propriedade estudada. Para o limite de escoamento, o erro é esperado deveria ser baixo, visto que o software aplica o método *offset* com o limite n de 0,2%. Entretanto, como o software não avalia criticamente o patamar de escoamento, é esperado que o erro fosse maior para os materiais que apresentem esse tipo de comportamento. O limite de resistência não mostrou diferenças, o que era esperado em virtude da aquisição da carga máxima ser simples de ser executada. Para o módulo de elasticidade e para a deformação na fratura, o erro é muito maior e isso ocorre por diversos fatores operacionais, como escorregamento do extensômetro durante o ensaio em virtude da estrição e do encruamento do material. Cabe ressaltar que ambos esses parâmetros são apenas estimados pela técnica do ensaio de tração, principalmente, o módulo de elasticidade que precisa de maior precisão na aquisição das deformações se calculado a partir desse método (por exemplo, *strain gages* colados na superfície da amostra). Dessa forma, responsável pelo ensaio deve observar se desvios operacionais não vão influenciar no resultado final do ensaio de tração.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

4 CONCLUSÕES

Conclui-se que há diferença entre os métodos na determinação do limite de escoamento, do módulo de elasticidade e da deformação final, sendo que a diferença pode chegar a valores da ordem de 37%. No caso do limite de resistência, não é perceptível nenhuma diferença entre os métodos.

Foi realizada uma análise da variância para as propriedades em que houve diferença, e o teste concluiu que essa diferença não é superior ao erro aleatório entre as amostras. Ainda assim, dependendo da aplicação dos resultados, pode ser importante realizar a análise e correção dos dados obtidos no ensaio.

REFERÊNCIAS

- 1 Garcia A, Spim JA, Santos CA. Ensaios dos Materiais. 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC; 2012.
- 2 Souza SA. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos. 5ª ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher; 1982.
- 3 Dieter G. Metalurgia Mecânica. Rio de Janeiro: Guanabara Dois; 1981.
- 4 Meyers MA, Chawla KK. Mechanical Behavior of Materials. 2008.
- 5 Ribeiro Jld, Caten CST. Série Monográfica Qualidade: Projeto de Experimentos. Porto Alegre: UFRGS; 2000.
- 6 American Society for Testing and Materials. ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conchohocken; 2013.
- 7 International Organization for Standardization. ISO 6892-1: Tensile Testing of Metallic Materials - Part 1: Method of Test at Room Temperature. Geneva; 2009.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.