

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO VERDADEIRA USANDO UMA CÂMERA DIGITAL¹

Tarcísio Flávio Umbelino Rêgo²

Pedro Paiva Brito³

Hébert Martins da Silva⁴

ânes Landre Jr.⁵

Resumo

Este trabalho vem apresentar uma metodologia para medição da deformação e da tensão experimentadas pelo corpo-de-prova durante o ensaio de tração, com vistas em se obter o gráfico de tensão real em função da deformação real do material testado. Para determinação da deformação sofrida pelo corpo-de-prova, o ensaio foi registrado com uma câmera digital. O sinal de vídeo gerado foi gravado em um computador onde as imagens foram tratadas e a variação das dimensões lineares (diâmetro e comprimento) do material foram quantificadas. A força aplicada pela máquina de tração foi medida com uma célula de carga e capturada com uma placa de aquisição de dados ligada ao computador. Foram realizados dois ensaios em aço SAE 1020, sendo registrados alongamentos máximos de 16 e 20%. A resolução média obtida com a câmera na medição do diâmetro e comprimento do corpo-de-prova foi de 0,35mm, implicando que o sistema não é sensível a deformações menores que 0,1%. A partir desse avanço inicial, espera-se que, com o refinamento do sistema de aquisição de imagens, seja possível melhorar os resultados obtidos.

Palavras-chave: Ensaio de tração; Curva tensão-deformação verdadeira; Câmera digital.

METHODOLOGY FOR THE DETERMINATION OF THE TRUE STRESS-STRAIN CURVE USING A DIGITAL CAMERA

Abstract

The present work proposes a methodology for measurement of the strain and stress to which a material is subjected during the tensile test, with the objective of determining the true stress-strain curve. In order to measure the strain observed by the test specimen, the tensile test was recorded with a digital camera. The resulting video output was saved in a computer where the images were treated and the variations of linear dimensions (diameter and length) of the material were quantified. The applied force was measured using a load cell and captured with data acquisition hardware during the test in a computer. Two tests were made, using SAE 1020 steel, with maximum elongations of 16% and 20%. The smallest average variation of length and diameter captured was 0,35mm, which implies that the system is not sensitive to deformations inferior to 0,1%. It is expected that improvements to the image acquisition system will lead to more precise results.

Key words: Tensile test; Real stress-strain curve; Digital camera.

¹ *Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ*

² *TP²PT Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Engenheiro, aluno do mestrado em Engenharia Mecânica.*

³ *TP³PT Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Engenheiro, aluno do mestrado em Engenharia Mecânica.*

⁴ *TP⁴PT Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Engenheiro, aluno do mestrado em Engenharia Mecânica.*

⁵ *TP⁵PT Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Doutor.*

1 INTRODUÇÃO

A curva tensão-deformação de um material fornece importantes informações sobre suas propriedades mecânicas. Essa curva é obtida por meio do ensaio de tração, onde um corpo-de-prova é submetido a uma carga monotônica até o rompimento. Convencionalmente, a deformação longitudinal sofrida pelo material é medida e, em conjunto com o registro da força aplicada, determina-se a tensão à qual o material é submetido, considerando-se que a área da seção transversal do corpo-de-prova se mantém constante. Para se obter a curva de tensão-deformação verdadeira, é necessário conhecer a variação de área do corpo-de-prova ao durante o ensaio. Diversos avanços têm sido obtidos na medição de deformação durante o ensaio de tração, especialmente em situações onde é inviável posicionar um instrumento de medição em contato com o corpo-de-prova⁽¹⁻³⁾ (esse é o caso, em geral, de ensaios realizados a altas temperaturas). Vial⁽⁴⁾ sugere a utilização de câmeras digitais para medição da variação dimensional do corpo-de-prova, durante o ensaio de tração (Figura 1), sem, contudo, apresentar resultados experimentais. Metodologia semelhante foi aplicada por Gaudig et al⁽⁵⁾ em ensaios realizados a alta temperatura, obtendo-se uma resolução de 0,01 para a deformação, correspondente a 0,25 pixels. Lyons et al.⁽⁶⁾ registraram avanços e chegaram a uma resolução da ordem de 10^{-3} para a deformação, usando, como referência para determinação das distâncias relativas no corpo-de-prova, pontos distribuídos aleatoriamente ao longo da região de interesse.

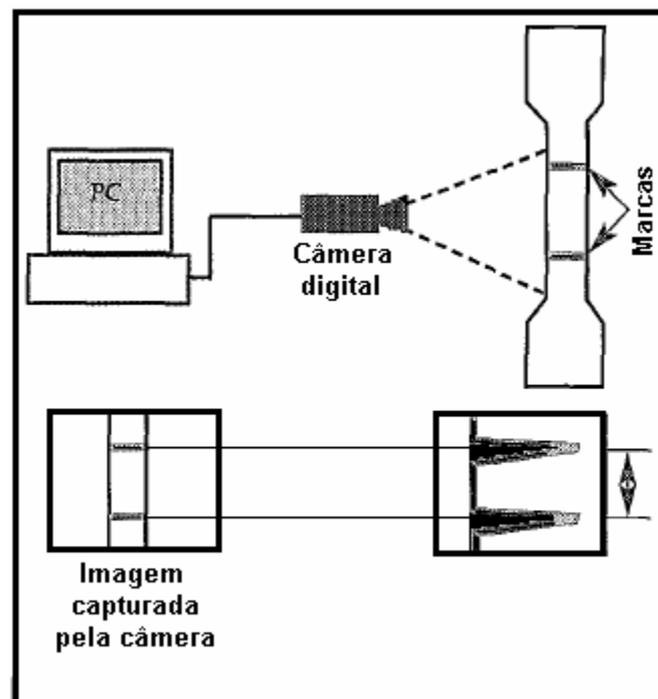


Figura 1. Montagem experimental proposta por Vial⁽⁴⁾ para medição de deformações durante o ensaio de tração, usando câmera digital.

2 METODOLOGIA

Para que fosse possível o uso do processamento de imagens para determinação da curva de Tensão x Deformação verdadeira em um ensaio de tração monotônico foram desenvolvidas três atividades distintas. Primeiro, o ajuste de um corpo-de-

prova, segundo, a captura e calibração dos dados de força e das imagens e, por fim, o desenvolvimento de um código que pudesse, a partir dos dados coletados, mostrar a curva desejada.

2.1 Materiais

Os corpos-de-prova usados na etapa experimental foram confeccionados em aço SAE 1020, em forma cilíndrica, como mostrado na Figura 2. De modo a possibilitar a medição por meio de tratamento de imagens, o corpo-de-prova foi coberto com tinta preta e marcas brancas foram feitas nas extremidades da região de menor seção reta.

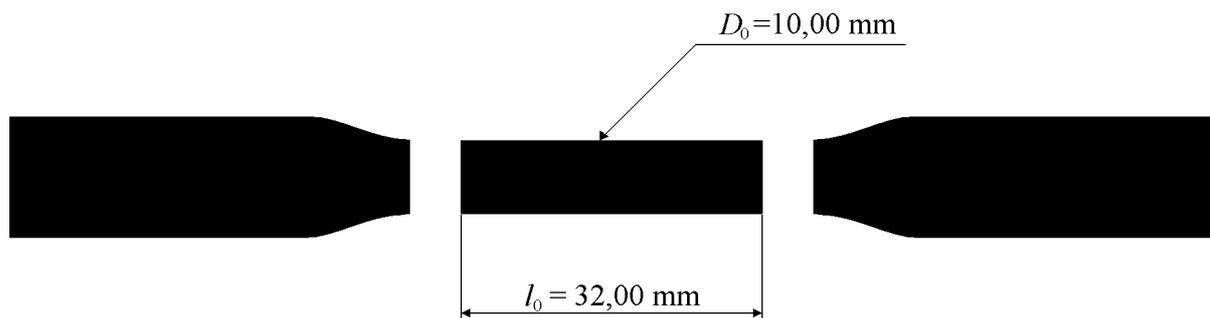


Figura 2. Dimensões do corpo-de-prova de aço SAE 1020 utilizado nos experimentos.

2.2 Equipamento

Para realização dos ensaios foi usada uma máquina de tração com capacidade máxima de 200 t. Para captura das imagens foi usada uma câmera digital instalada em um suporte de modo a permitir a visualização do corpo-de-prova durante o ensaio (em montagem similar à apresentada na Figura 1), como mostrado na Figura 3.



Figura 3. Suporte para a câmera na máquina de tração.

O sinal de vídeo gerado pela câmera foi capturado por um computador dotado de placa de captura de vídeo. As imagens foram adquiridas no formato de 320 x 240 pixels.

A força aplicada pela máquina de tração foi medida com uma célula de carga. O sinal gerado pela célula de carga (corrente entre 4 e 20mA) foi aplicado em um resistor de 220Ω e a queda de tensão resultante foi capturada em uma placa de aquisição de dados Advantech PCL18 de 12 bits, ligada ao computador, com frequência de 100Hz. Filtros capacitivos ($100\ \mu\text{F}$) foram instalados na entrada da placa de aquisição de dados para atenuação de ruídos. Na Figura 4 é mostrada a curva de calibração da célula de carga, que relaciona a tensão (em V) capturada no computador com a força (em kN) aplicada pela máquina de tração. O ajuste linear resultou em um coeficiente de determinação igual a 0,9994.

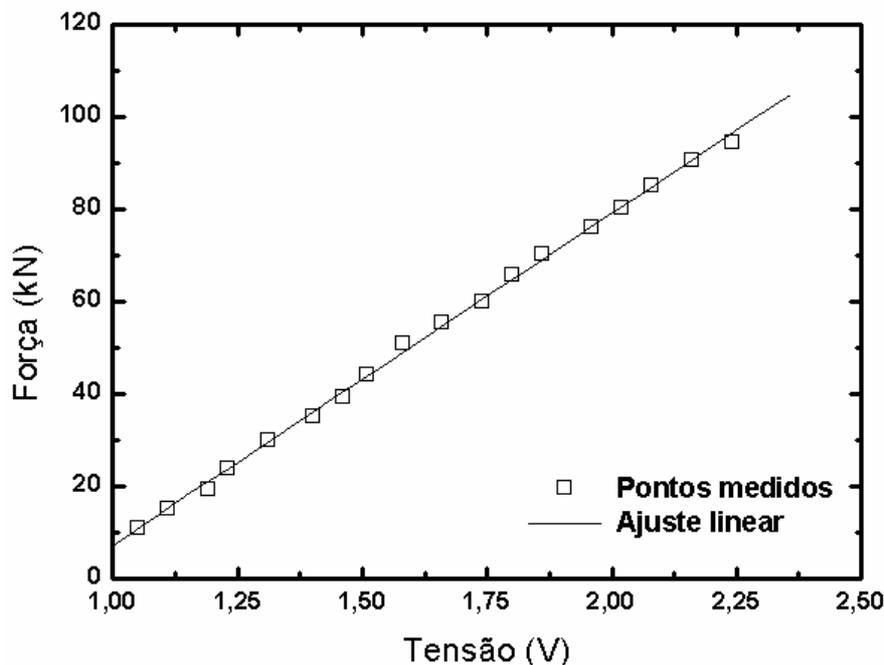


Figura 4. Curva de calibração da célula de carga utilizada nos experimentos.

2.3 Desenvolvimento do Programa

Para o processamento dos dados coletados foi desenvolvido um programa de computador que é responsável pelo tratamento das imagens e pela determinação da dimensão (em mm) representada. A linguagem de programação utilizada foi Delphi, e o programa funciona em ambiente Windows.

O programa é dividido em duas etapas. Uma de pré-processamento (antes do ensaio), onde são feitos testes de binarização e calibração da imagem, e uma etapa de pós-processamento (após o ensaio), onde o registro do ensaio é feito e um arquivo é gerado contendo os valores necessários para obtenção da curva de tensão versus deformação. A tela inicial do programa permite ao usuário realizar ajustes na montagem com vistas em se diminuir o efeito da presença de eventuais sombras, e testar a binarização resultante. É possível ainda definir a cor limite que separa o preto do branco. Na Figura 5 tem-se, à esquerda, a imagem capturada e à direita a imagem binarizada.

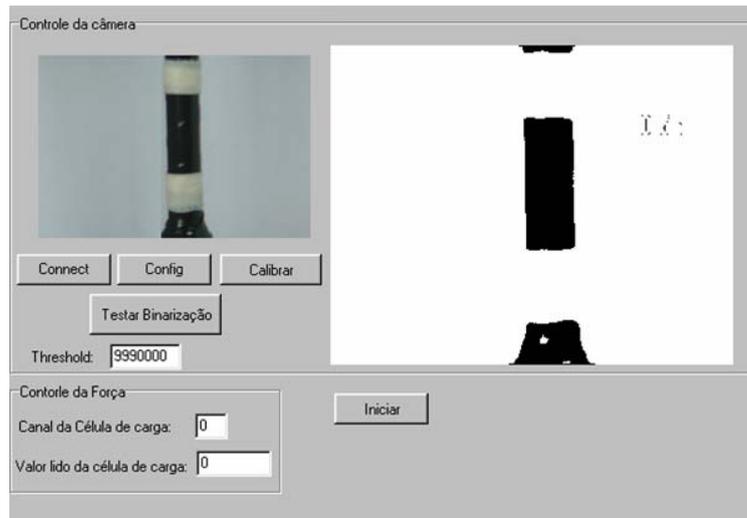


Figura 5. Binarização da imagem de um corpo-de-prova de ensaio de tração.

Em seguida, é feita a calibração da imagem, com o objetivo de determinar a relação entre o número de pixels presente nas direções vertical e horizontal da imagem. Esta etapa é mostrada na Figura 6. É selecionada uma região de interesse (região contida no retângulo vermelho na imagem da direita) e informa-se o diâmetro e o comprimento do objeto real. A imagem é binarizada e o programa identifica o número de pixels pretos contidos entre pixels brancos, o que resulta na determinação do diâmetro e do comprimento delimitado pelas marcas brancas. No caso da medição do diâmetro, o algoritmo procura sempre pelo menor valor contido entre as marcas brancas, o que resulta na determinação da área na seção onde ocorre estricção e rompimento do material. Por fim, o número de pixels resultantes é relacionado com a dimensão do objeto em milímetros. As relações obtidas são válidas desde que a distância e a orientação da câmera em relação ao objeto não se alterem.

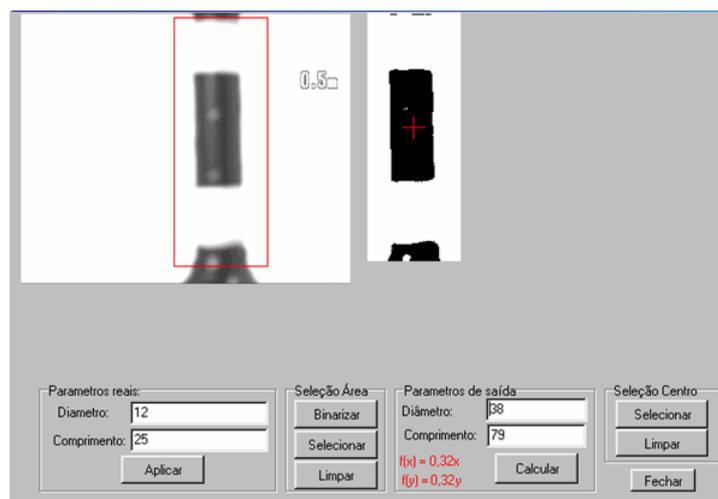


Figura 6. Etapa de calibração da imagem.

Uma vez que o ensaio foi gravado, devem-se selecionar, dentre os “frames” do registro de vídeo do ensaio, as imagens correspondentes ao início e final do teste de tração. Todas as imagens situadas entre a primeira e a última são analisadas pelo programa (Figura 7). Escolhidas as imagens, o programa gera um arquivo contendo os valores de diâmetro, alongamento e força em cada instante do ensaio.

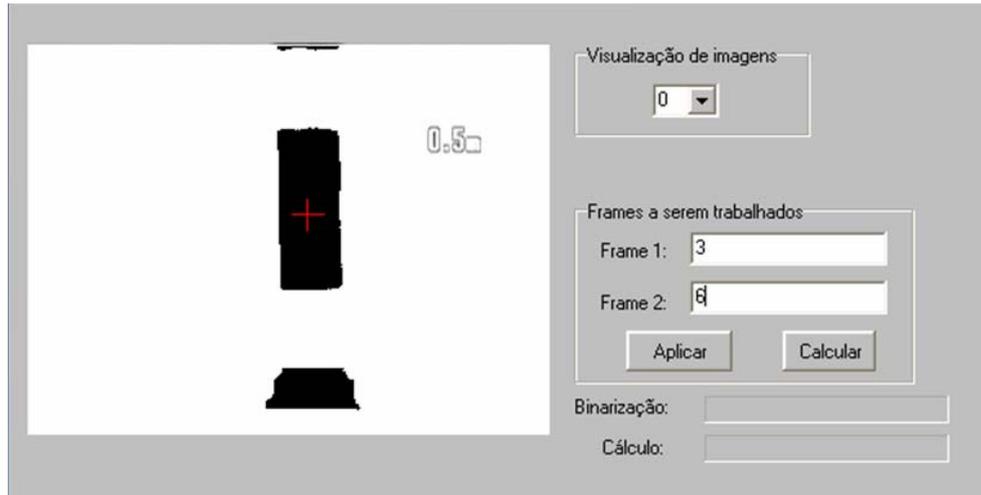


Figura 7. Etapa de seleção de imagens.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Determinação da Deformação

Nas Figuras 8 (a), (b), (c) e (d) são mostradas imagens registradas do ensaio de tração, onde se pode visualizar a deformação experimentada pelo corpo-de-prova.

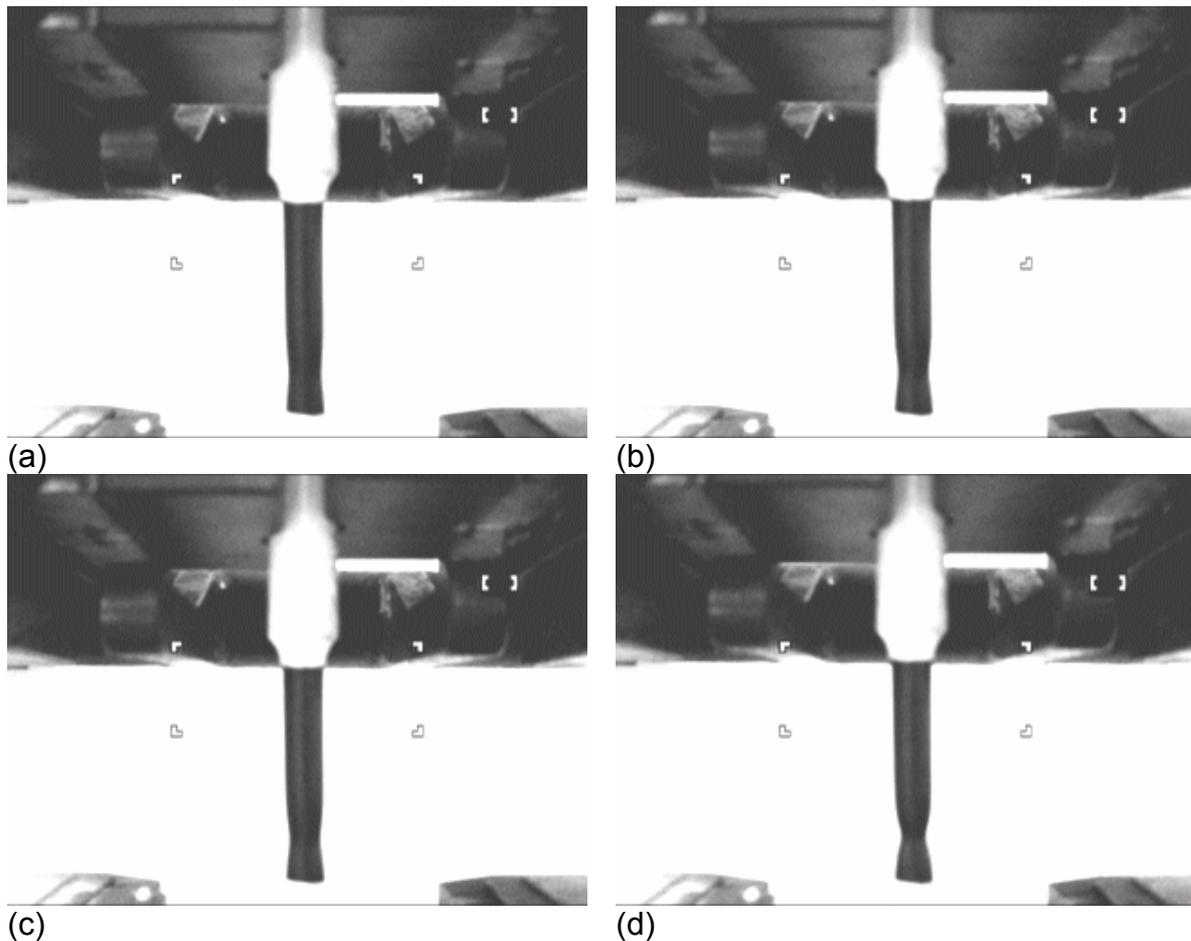


Figura 8. Imagens adquiridas durante o ensaio de tração.

Foram realizados dois ensaios. As Figuras 9 (a), (b) e 10 (a), (b) mostram, respectivamente, a evolução da deformação na direção longitudinal e a evolução da área dos corpos-de-prova de acordo com o número de imagens adquiridas. A deformação foi calculada de acordo com a Equação 1, abaixo:

$$\varepsilon_i = \frac{l_i - l_0}{l_0} \quad (1)$$

onde ε_i é a deformação instantânea, l_i é o comprimento instantâneo e l_0 , o comprimento inicial.

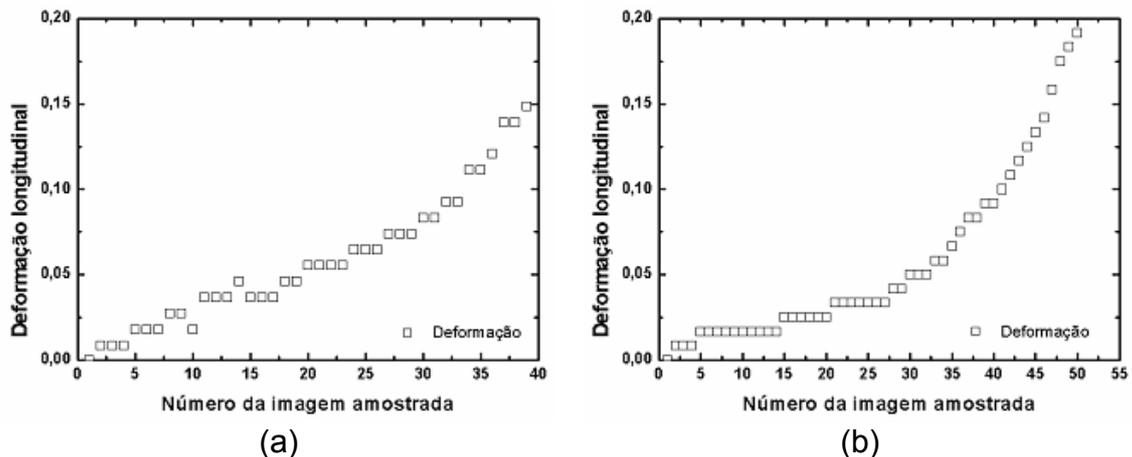


Figura 9. Evolução da deformação longitudinal do corpo-de-prova 1 durante o ensaio: (a) corpo-de-prova 1 e (b) corpo-de-prova 2.

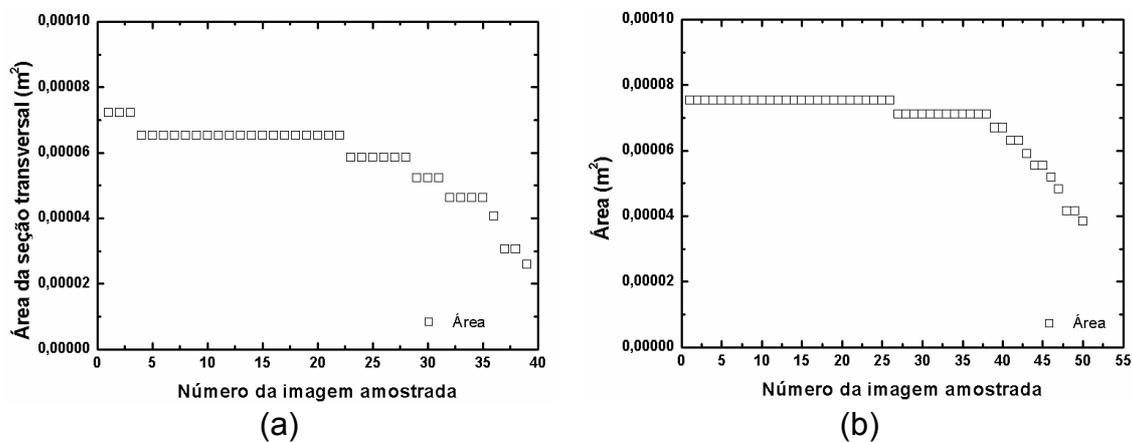


Figura 10. Variação de área do corpo-de-prova 1 durante o ensaio: (a) corpo-de-prova 1 e (b) corpo-de-prova 2.

3.2 Determinação da Tensão

As Figuras 11 (a) e (b) mostram o gráfico tensão-deformação real e de engenharia para os corpos-de-prova 1 e 2, respectivamente. De acordo com a Figura 11 (a), o limite de escoamento para o material é aproximadamente 450 MPa, com alongamento máximo de cerca de 16%. Na Figura 11 (b), tem-se um limite de escoamento de aproximadamente 600 MPa e alongamento máximo de 20%. Os erros associados a estes resultados se devem, em sua maior parte, ao elevado nível de ruído elétrico presente no sinal de força adquirido.

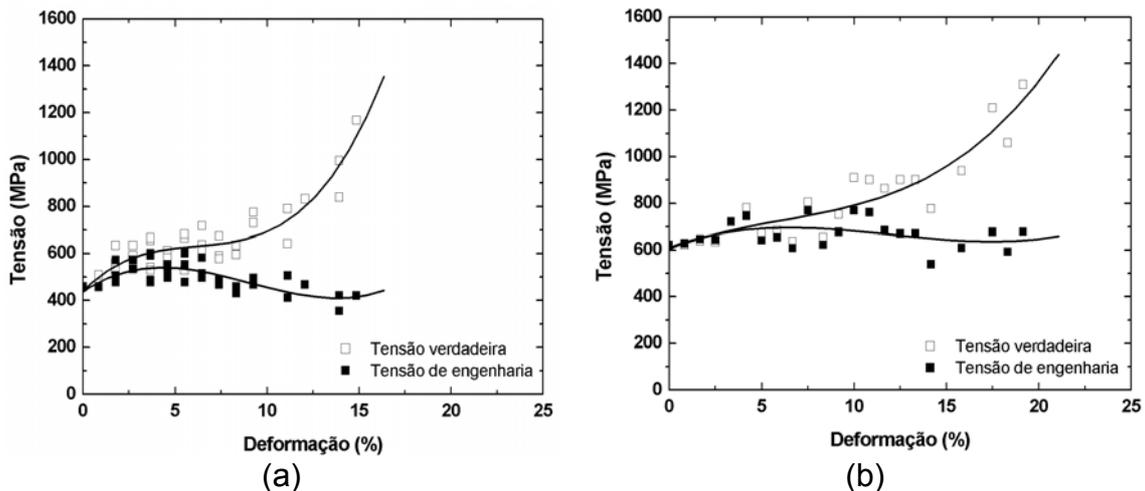


Figura 11. Curvas tensão-deformação reais e de engenharia: (a) corpo-de-prova 1 e (b) corpo-de-prova (2).

A resolução média obtida com a câmera na medição do diâmetro e comprimento foi de 0,35 mm de modo que o sistema não é capaz de perceber deformações menores que 0,1%. Essa limitação se deve à baixa resolução das imagens adquiridas (320 x 240 pixels) o que pode ser melhorado com a utilização de uma placa de aquisição de vídeo com capacidade para processar imagens de maior resolução.

Contudo, o erro médio observado na medição das dimensões inicial e final dos corpos-de-prova utilizando a metodologia proposta (em comparação com medições realizadas com paquímetro) foi de apenas 4,13%. Esse fato indica que as medições de deformação realizadas durante o ensaio, tanto de diâmetro como de comprimento, são coerentes.

4 CONCLUSÕES

A forte presença de ruídos no sinal de força adquirido pelo sistema, e a baixa resolução da câmera utilizada prejudicaram a determinação da tensão de escoamento do material. Contudo, isso não acarretou em erros significativos na determinação das dimensões inicial e final dos materiais testados.

Com a adoção da metodologia proposta foi possível obter a curva tensão-deformação real durante o ensaio de tração. A partir desse avanço inicial, espera-se que, com o refinamento do sistema de aquisição de imagens e do sistema de medição de força, seja possível melhorar os resultados obtidos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais pela concessão dos corpos-de-prova e empréstimo dos equipamentos.

REFERÊNCIAS

- 1 PÉRIÉ, J.N., CALLOCH, S., CLUZEL, C. e HILD, F., *Analysis of a Multiaxial Test on a C/C Composite by Using Digital Image Correlation and a Damage Model*, *Experimental Mechanics*, 42 (3), 322-328, (2002).
- 2 VERLEYSEN P. e DEGRIECK J., *Optical Measurement of the Specimen Deformation at High Strain Rate*, *Society for Experimental Mechanics*, 44 (3), 247-252, (2004).
- 3 SEPTANIKA, E. G., ERNST L. J e van den HOOFF, A.C.M., *An Automatic And Interactive Large-Deformation Measurement System Based on Image Processing*, *Society for Experimental Mechanics*, 38 (3), 181-186, (1998).
- 4 VIAL, G., *Video Extensometers*, *Advanced Material Processes*, 4, 162-164, (2004)
- 5 GAUDIG, W., BOTHE, K., BHADURI, A.K. e MAILE, K., *Determination of the Geometric Profile and Stress/Strain State in the Necked Region During Inelastic Deformation at Elevated Temperatures Using a Non-Contacting Measurement Technique*, *Journal of Testing and Evaluation*, 24 (3), 161–167 (1996).
- 6 LYONS, J. S., LIU, J. e SUTTON, M. A., *High-Temperature Deformation Measurements Using Digital-Image Correlation*, *Experimental Mechanics*, 36 (1), 64–70 (1996).
- 7 VÖLKL, R. e FISCHER, B., *Mechanical Testing of Ultra-High Temperature Alloys*, *Society for Experimental Mechanics*, 44 (2), 121-126, (2004).