

DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO ALUMÍNIO 6061 UTILIZANDO ENSAIOS DE PENETRAÇÃO INSTRUMENTADA COM PENETRADOR ESFÉRICO

*Cristiano Brunetti¹
Mario Vitor Leite²
Giuseppe Pintaude³*

Resumo

O objetivo do presente trabalho é determinar o módulo de elasticidade (E) de uma liga de alumínio 6061, nas condições envelhecida (T6) e em solução sólida supersaturada (SSS), por meio de ensaios de penetração instrumentada utilizando penetrador esférico (EPI-PE). Os valores de módulo de elasticidade foram calculados por duas metodologias, uma seguindo a curva de aplicação da força, e outra seguindo a curva de remoção. A qualidade dos pontos experimentais foi também avaliada com o uso das rotinas de cálculo propostas por esses modelos. Os resultados obtidos foram mais próximos aos valores da literatura para a amostra SSS do que para a amostra T6, o que ocorreu devido à sensibilidade do sistema em relação à dureza da amostra T6.

Palavras-chave: Módulo de elasticidade; Penetração instrumentada; Penetrador esférico.

¹ Aluno de Iniciação Científica, bolsista PIBIC, curso Tecnologia Mecânica – CEFET-PR.

² Tecnólogo em Mecânica, aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais - PPGEM-CEFET-PR.

³ Eng. Metalúrgico, Prof. Dr. CEFET-PR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais - PPGEM.

1. Introdução

Os ensaios de penetração instrumentada (EPI) vêm sendo amplamente utilizados, pois permitem a obtenção de uma maior quantidade de informações dos materiais em relação aos ensaios convencionais de dureza, em particular o módulo de elasticidade, e que podem ser obtidas através da curva Força (F) vs profundidade de penetração (h), Figura 1, obtida durante um ciclo completo de aplicação e remoção da força.

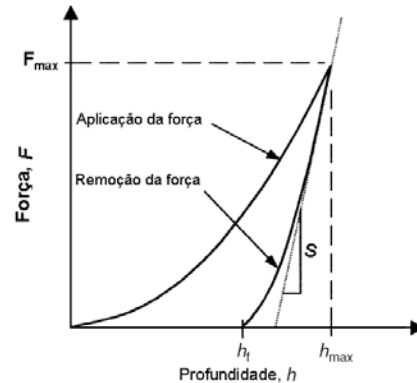


Figura 1. Curva típica de ensaios de penetração instrumentada obtida durante um ciclo completo de aplicação e remoção da força [1].

As quantidades importantes para o cálculo das propriedades mecânicas são a força máxima (F_{max}), a profundidade máxima (h_{max}), a profundidade final após a remoção da força (h_f) e a inclinação na parte superior da curva de remoção da força, ($S=dF/dh$). O parâmetro S é conhecido como rigidez do contato elástico e tem uma dimensão de força por unidade de distância [2].

A Figura 2 mostra a representação esquemática da secção de uma penetração com uma esfera, mostrando as quantidades utilizadas na análise, onde h_c é a profundidade de contato e a é o raio de contato.

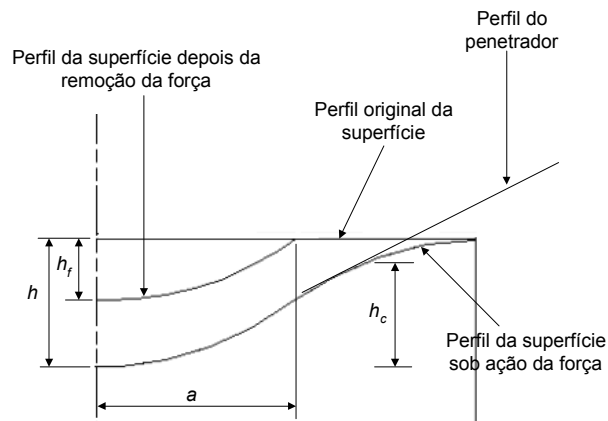


Figura 2. Representação esquemática de penetração com penetrador esférico evidenciando as quantidades utilizadas para obtenção do módulo de elasticidade.

2. Teoria para obtenção do Módulo de Elasticidade segundo geometria esférica

Utilizando análises de Hertz para um contato elástico, no limite de pequenos deslocamentos ($2h_c \gg h_c^2$), serão consideradas três expressões. A primeira é a

relação entre a profundidade máxima, $h_{máx.}$, e a profundidade de contato, h_c , equação 1.

$$h_{máx.} = 2h_c \quad (1)$$

A segunda é a relação entre a força (F) e raio de contato, (a), equação 2.

$$F = \frac{4E^* a^3}{3r} \quad (2)$$

onde r é o raio do penetrador e E^* é o módulo de elasticidade combinado.

A terceira é a relação entre a profundidade máxima, $h_{máx.}$, e o raio de contato, a , equação 3.

$$h_{máx.} = a^2 / r \quad (3)$$

Combinando as equações de 1 a 3 é obtida uma relação entre força, F , e profundidade de contato h_c , equação 4.

$$F = \frac{8\sqrt{2}}{3} E^* \sqrt{r} h_c^{3/2} \quad (4)$$

Onde E^* é o módulo de elasticidade combinado, definido na equação 5. O índice i nesta equação refere-se às propriedades do penetrador (módulo elástico e coeficiente de Poisson) e o índice s às propriedades da amostra ensaiada.

$$E^* = \left[\frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_s^2}{E_s} \right]^{-1} \quad (5)$$

O método de OLIVER-PHARR (apud PHARR e HAY [2]) utilizado por HERBERT et al.[3], estabelece que para muitos materiais a curva de remoção da força pode ser ajustada conforme a expressão 6:

$$F = BA(h - h_f)^m \quad (6)$$

onde B e m são constantes dependentes da geometria do penetrador e do tipo de material ensaiado, sendo então a rigidez do contato elástico, S , obtida pela inclinação na parte superior da curva de remoção da força sendo definida pela equação 7.

$$S = \left(\frac{dF}{dh} \right)_{h=h_{max}} = Bm(h_{max} - h_f)^{m-1} \quad (7)$$

A relação entre a área real de contato, A , o módulo combinado E^* e a rigidez do contato elástico, S , é dada pela equação 8. Este modelo ainda estabelece a profundidade de contato, h_c , segundo a equação 9, onde ε é igual a 0,75 e β é igual a 1 para um penetrador esférico.

$$E^* = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A}} \quad (8)$$

$$h_c = h_{m\acute{a}x.} - \varepsilon.F/S \quad (9)$$

Neste caso, a \u00e1rea de contato \u00e9 obtida pelo raio de contato a , conforme a equa\u00e7\u00e3o 10,

$$A = \pi h_c (2r - h_c) \approx \pi a^2 \quad (10)$$

e o raio de contato, a , por sua vez \u00e9 obtido pela equa\u00e7\u00e3o 11.

$$a = \sqrt{2h_c r - h_c^2} \quad (11)$$

FERRANTI et al.[4] determinaram atrav\u00e9s de um EPI-PE o m\u00f3dulo de elasticidade da liga de alum\u00ednio 2024. Estes pesquisadores identificaram a regi\u00e3o el\u00e1stica na curva de aplica\u00e7\u00e3o de for\u00e7a, obtendo o m\u00f3dulo de elasticidade por meio das equa\u00e7\u00f5es apresentadas. Durante o contato el\u00e1stico pode ser assumido que para cada incremento na for\u00e7a sobre o penetrador, este ir\u00e1 se deslocar no material sem causar deforma\u00e7\u00f5es pl\u00e1sticas a este. Seguindo an\u00e1lises de Hertz esta fun\u00e7\u00e3o pode ser descrita pela equa\u00e7\u00e3o 12.

$$F = \frac{4}{3} E^* \sqrt{r} \cdot (2h_c)^{3/2} \quad (12)$$

Alternativamente, o modelo de Oliver-Pharr foi utilizado neste trabalho e novamente s\u00e3o feitas as considera\u00e7\u00f5es do contato el\u00e1stico de Hertz.

O objetivo do presente trabalho \u00e9 determinar o m\u00f3dulo de elasticidade de uma liga de Al 6061 atrav\u00e9s de ensaio de penetra\u00e7\u00e3o instrumentada (EPI-PE), utilizando os modelos descritos [3, 4]. Al\u00e9m disso, a qualidade dos pontos experimentais estar\u00e1 sendo avaliada tamb\u00e9m com o uso das rotinas de c\u00e1lculo propostas por esses modelos.

3. Metodologia

O material utilizado para realiza\u00e7\u00e3o dos ensaios foi uma liga de Al 6061. Duas amostras foram retiradas de uma barra extrudada e foram solubilizadas a 530 \u00b0C por 2 horas, sendo que uma das amostras sofreu tratamento de envelhecimento a 160 \u00b0C durante 8 horas (T6). A amostra solubilizada (SSS), apresentou dureza HV 72 \u00b1 2 e foi armazenada em freezer a uma temperatura de - 8 \u00b0C at\u00e9 o momento da realiza\u00e7\u00e3o dos ensaios. A dureza medida da amostra T6 foi HV 104 \u00b1 4. A norma ISO/FDIS 14577-1 [5] estabelece os par\u00e2metros para que a rugosidade da superf\u00edcie n\u00e3o influencie os ensaios. No caso do alum\u00ednio, para ensaios at\u00e9 100 N, os mesmos poderiam ser realizados para superf\u00edcies com rugosidade Ra de at\u00e9 4 \u00b5m. Este dado mostra que para o experimento deste trabalho a rugosidade inicial pode ser considerada como irrelevante, porque as amostras foram ensaiadas com a superf\u00edcie em 0,3 \u00b5m de Ra e a for\u00e7a aplicada nos ensaios foi tr\u00eas vezes maior (300N).

O equipamento utilizado foi uma m\u00e1quina universal de ensaios mec\u00e2nicos EMIC, modelo DL-10000, a qual recebeu a adapta\u00e7\u00e3o de um porta penetrador, bem

como o software para aquisição dos dados, de modo que apenas o canal de comunicação relativo ao extensômetro (deflectômetro) fosse responsável pela medida de profundidade de penetração, evitando incorporar as deformações elásticas do sistema como um todo. Este extensômetro possui capacidade para medir até 12,5 mm de deformação com resolução de 0,001 mm. A força aplicada foi medida por meio de uma célula de carga com capacidade para 50 kgf e resolução de 0,01 N. A força foi aplicada a uma taxa constante de 0,005 mm/s, até se atingir a força máxima de 300 N. Nesse ponto, a força foi mantida durante 100 segundos para a completa acomodação das deformações, e, em seguida o penetrador foi removido da amostra com uma taxa de remoção também de 0,005 mm/s. O ciclo de aplicação de força foi baseado no trabalho de CHUDOKA [6], que fez um estudo detalhado sobre o efeito destas variáveis nos valores das propriedades extraídas, inclusive para as ligas de alumínio. Os valores médios correspondem a uma série de cinco impressões realizadas em cada amostra.

Foi utilizado um penetrador esférico de aço temperado de diâmetro nominal 1,5875 mm. Na Tabela 1 são apresentados os módulos de elasticidade e os coeficientes de Poisson adotados para o penetrador e para a liga 6061.

Tabela 1. Módulo de elasticidade e coeficientes de Poisson para o penetrador e para a liga 6061

	Módulo de Elasticidade, E	Coefficiente de Poisson, ν
Penetrador de Aço	200 GPa ^a	0,28 ^a
Alumínio 6061	70,1 GPa ^b	0,33 ^c

a. Ref. [4], b .Ref. [3], c. Ref. [7].

Duas metodologias de cálculo foram utilizadas para determinar os valores de módulo de elasticidade das amostras ensaiadas, a de FERRANTI et al., [4] com base na curva de aplicação de força, e a de HERBERT et al. [3], que se baseia na curva de remoção de força. Neste último caso, variou-se a quantidade de pontos da curva de remoção (50, 60, 70 e 80%), de modo a verificar o efeito desta variável nos valores calculados. O método aplicado seguiu a rotina aplicada por FRANCO JR. et al.[1], adaptando-a para a geometria de penetrador esférico [2], no que se refere a constantes geométricas e de rigidez de contato.

4. Resultados e Discussões

A Figura 3 mostra as curvas experimentais $F \times h$ obtidas no ensaio. Esta figura mostra que as curvas apresentaram deslocamento mínimo umas em relação às outras, o que mostra a boa repetibilidade dos ensaios. A Figura 4 apresenta apenas a parcela de aplicação de força para a curva média dos cinco ensaios para as amostras T6 e SSS, mostradas na Figura 3, incluindo uma curva que expressa o modelo de Hertz.

Com base nesta Figura, identificou-se o número de pontos equivalentes à região puramente elástica. A Figura 5 mostra uma ampliação desta região.

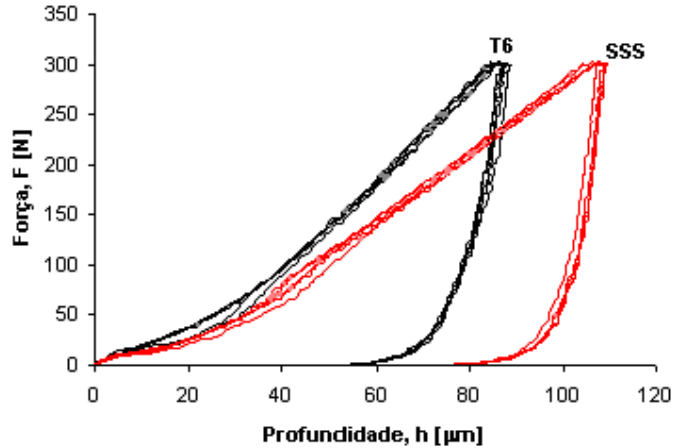


Figura 3. Curvas experimentais obtidas do EPI – PE para a amostra T6 e SSS.

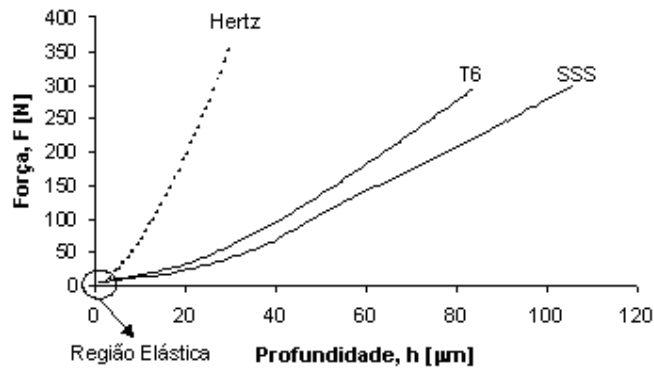


Figura 4. Curvas médias de força-profundidade obtidas do EPI-PE para as amostras T6 e SSS mostrando a sobreposição da região elástica da curva de Hertz.

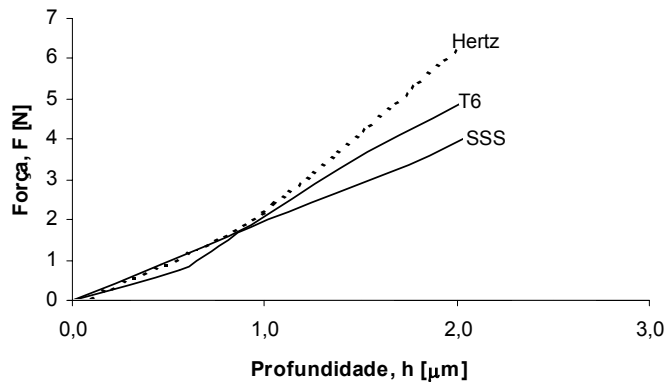


Figura 5 Ampliação da região elástica mostrada na Figura 4 para as amostras T6 e SSS.

A Figura 5 evidencia que as curvas de aplicação de força obtidas para as amostras ensaiadas acompanham a curva relativa ao modelo de Hertz até uma força de aproximadamente 2 N e uma profundidade de 1 μm . Após este ponto, as mesmas se afastam da curva de Hertz. Estes resultados estão compatíveis com os obtidos por FERRANTI et al. [4] para a liga 2024-T6, ou seja, os valores limites da região elástica foram da mesma ordem de grandeza.

Devido à velocidade de aplicação da força, o número de pontos relativos à faixa que corresponde à região elástica é muito pequeno (total de 4 pontos), insuficientes para que fosse calculado com precisão os valores de módulo elástico. Portanto, não foi possível calcular o módulo de elasticidade pelo modelo apresentado por FERRANTI et al.[4], porque as curvas experimentais não apresentaram qualidade suficiente para a obtenção da curva de ajuste, escrita por uma função do tipo $F=\alpha h^m$, onde α é uma constante que depende do tipo de material ensaiado e para um contato elástico $m=1,5$ [4].

Utilizando as curvas de remoção de força, foram calculados os módulos de elasticidade segundo o trabalho de HERBERT et al. [3]. De modo a analisar a dispersão dos resultados das curvas apresentadas na Figura 3, apresentam-se nas Figuras 6 e 7 o módulo de elasticidade calculado para as amostras T6 e SSS, respectivamente, para os cinco ensaios e para diferentes quantidades de pontos da curva de ajuste de remoção da força.

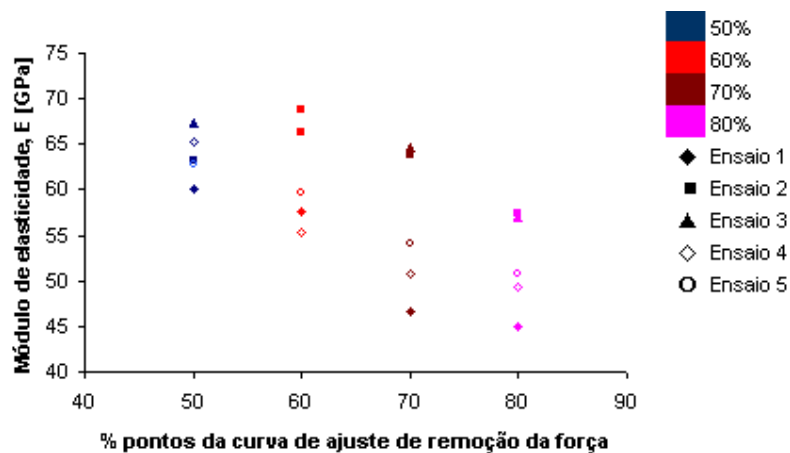


Figura 6. Módulo de elasticidade da amostra T6 calculado de 50% a 80% dos pontos da curva de ajuste de remoção da força.

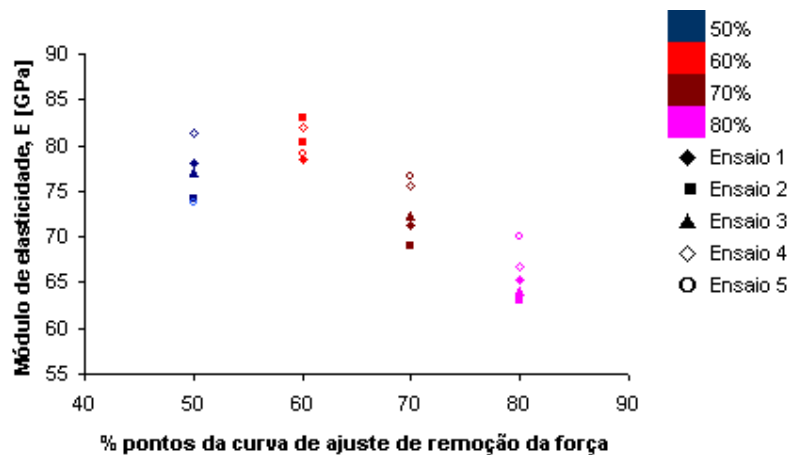


Figura 7. Módulo de elasticidade da amostra SSS calculado de 50% a 80% dos pontos da curva de ajuste de remoção da força.

Verifica-se que a amostra T6, Figura 6, a qual tem maior valor de dureza, apresenta uma maior dispersão nos valores do módulo do que a amostra SSS, para quaisquer cálculos de ajuste das curvas de remoção de força. Como mostra a

Tabela 2, o coeficiente de variação nunca ultrapassou o valor de 5% para a amostra SSS, enquanto que no caso da amostra T6 estes valores chegaram a 10%, mostrando que os ensaios na amostra SSS podem ser considerados como mais estáveis.

O que pode explicar estas diferenças é o fato que a área gerada durante a penetração é maior para a amostra de menor dureza, SSS. Neste caso, a diferença entre a rigidez da amostra e dos demais elementos do sistema de ensaio é grande suficiente, fazendo com que a rigidez do sistema seja aproximadamente a mesma que a rigidez da própria amostra. Esta consideração é feita supondo-se que os elementos do sistema de ensaio são molas em série (Fig.8) [2]. No caso dos ensaios com a amostra T6, esta diferença cai, e a rigidez do sistema passa a influenciar os valores de rigidez da amostra, subestimando-os, e como consequência, os valores de módulo de elasticidade diminuem.

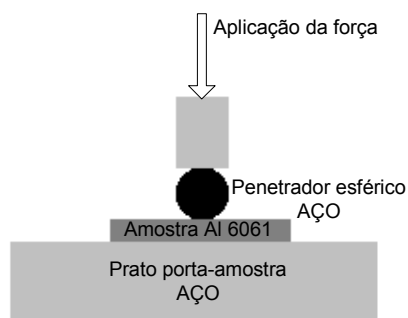


Figura 8. Representação esquemática dos elementos do sistema de ensaio.

Diversos fatores podem influenciar a rigidez do contato, por estarem influenciando a área de contato ou mesmo o sistema de operação do ensaio. Distinguindo estas influências em dois grupos (área de contato e sistema de ensaio), pode-se citar que a formação de bordas (“pile-up”) ao longo da impressão de dureza modifica em muito a área real de contato, e portanto, modifica o módulo de elasticidade. No caso do alumínio e suas ligas, muitos trabalhos [8, 9, 10, 11] demonstraram este efeito, independentemente da faixa de força aplicada e da geometria do penetrador (piramidais ou esféricos). Por exemplo, STRANGE e VARSHNEYA [8] mostraram para a liga 6061-T6 um “pile-up” de aproximadamente 20%, em ensaios conduzidos na escala Vickers com 4,6 N de força. Estes autores verificaram que isto afetou os valores de módulo de elasticidade em até 74%. PHARR e HAY [2] citam que a existência do “pile-up” pode superestimar os valores de módulo de elasticidade em até 30%.

No que se refere ao sistema de ensaio, a rigidez do contato pode ser influenciada pelo tipo de material de ensaio, como por exemplo, o material do penetrador. Neste trabalho, foi utilizada uma esfera de aço temperado, mas ensaios serão conduzidos futuramente com penetrador de metal duro, para verificar este efeito em particular. Além disso, a espessura das amostras pode afetar o sistema de medição, ampliando ou reduzindo a faixa de aplicação do ensaio para materiais com diferentes níveis de dureza. Além disso, as constantes de rigidez utilizadas para cálculo do módulo de elasticidade podem ser refinadas, mediante análise de deformações do sistema de medição.

A Tabela 2 apresenta os valores médios de módulo de elasticidade, considerando-se diferentes quantidades de pontos da curva de remoção de força.

A Tabela 2 mostra que os valores de módulo de elasticidade tendem a cair com o aumento da quantidade de pontos utilizados para o cálculo da rigidez de contato, sendo este efeito mais pronunciado para a amostra T6. Este resultado está de acordo com o obtido por FRANCO JR. et al. [1], que ensaiaram diversos materiais num equipamento que opera com carga microscópicas e penetrador Vickers.

Tabela 2. Valores médios do módulo de elasticidade, E, para as amostras T6 e SSS [GPa]

% pontos	50	60	70	80
6061 – T6	64 ± 3	62 ± 6	56 ± 8	52 ± 5
6061 – SSS	77 ± 3	81 ± 2	73 ± 3	66 ± 3

O efeito desta variável nos valores de módulo permanece dúvida. A ISO 14577-1 [5] recomenda o uso de pelo menos 80% dos pontos, e que havendo necessidade de uso de 50% ou menos dos pontos, a “qualidade” das curvas pode ser duvidosa. Por outro lado e mais recentemente, PHARR e HAY [2] salientam que um total de 25 a 50% dos pontos é suficiente para obtenção do módulo de elasticidade.

A aplicação de um teste de hipóteses, com 99% de significância, aos resultados da Tabela 2 mostrou que:

- Os valores de módulo de elasticidade das amostras T6 e SSS são significativamente diferentes, embora o efeito esperado fosse o contrário, ou seja, a priori, o tratamento térmico de metais não modifica o valor desta propriedade, e esta diferença está relacionada com os motivos expostos anteriormente sobre rigidez do sistema de ensaio;
- Os valores obtidos para a amostra T6 são significativamente semelhantes, ou seja, a quantidade de pontos não foi uma variável determinante para os valores de módulo de elasticidade neste caso, embora os valores médios apresentassem queda com o aumento da quantidade de pontos;
- Como observado para a amostra T6; a quantidade de pontos utilizada para o cálculo do módulo de elasticidade não afetou os valores calculados para a amostra SSS, embora não se tenha podido considerar que todos são significativamente semelhantes, por causa do valor médio obtido para o caso em que 60% dos pontos da curva de remoção da força.

O valor do módulo para a liga 6061 encontrado na literatura foi 68,9 GPa [7], sendo que valores entre 67 a 75 GPa [3] foram obtidos a partir de EPI-PE. No caso dos valores apresentados na Tabela 2, verificou-se que a amostra SSS apresentou valores mais próximos aos da literatura [3, 7] do que a amostra T6, em especial para os casos em que foram utilizados 70 ou 80% dos pontos da curva de remoção de força, concordando com a indicação feita pela ISO 14577-1 [5], que recomenda o uso de 80% dos pontos para o cálculo da rigidez de contato.

5. Conclusões

1. Não foi possível calcular o módulo de elasticidade utilizando o modelo de FERRANTI et al. [4], porque as curvas experimentais não apresentaram qualidade suficiente para a obtenção da curva de ajuste, devido à pequena quantidade de pontos gerados na região elástica.
2. O módulo calculado pelo modelo apresentado por HERBERT et al. [3] apresentou valores próximos aos valores encontrados na literatura, no

entanto, a dispersão encontrada nos valores entre as amostras SSS e T6 é bastante significativa e é um indicativo que o sistema de ensaio é sensível às diferenças de dureza das amostras e que considerações sobre as constantes de rigidez do equipamento precisam ser levadas em conta no cálculo do módulo de elasticidade.

3. Para uma quantidade entre 70 e 80% dos pontos da curva de remoção da força, o módulo de elasticidade calculado para a amostra SSS apresentou valores mais próximos aos da literatura, concordando com a faixa de pontos recomendada pela ISO 14577-1 [5].

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, pela bolsa de mestrado concedida ao aluno Mario Vitor Leite, e ao CNPq, pela bolsa PIBIC concedida ao aluno Cristiano Brunetti e pelo financiamento do Projeto Universal, processo 4755472/03-9, o qual permitiu a construção do sistema de ensaio.

7. Referências bibliográficas

- [1] FRANCO JR., A. R., PINTAUDE, G., SINATORA, A., et al. **The use of a Vickers indenter in depth sensing indentation for measuring elastic modulus and Vickers hardness**. Mat. Res., July/Sept. 2004, vol.7, no.3, p.483-491.
- [2] ASM HANDBOOK - **Mechanical Testing and Evaluation**, ASM INTERNATIONAL, 2000, Vol. 8, p.1000.
- [3] HERBERT, E. G, PHARR, G. M., OLIVER, W. C., LUCAS, B. N., HAY, J. L., **On the Measurement of Stress–Strain curves by Spherical Indentation**, Thin Solid Films, V. 398 –399, 2001, pp. 331–335.
- [4] FERRANTI, L. J.; ARMSTRONG, R. W., THADHANI, N. N., **Elastic/plastic Deformation Behavior in a Continuous Ball Indentation Test**, Materials Science and Engineering A, V. 371, 2004, p.251-255.
- [5] ISO – International Organization for Standardization. **ISO/FDIS 14577-1 – Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and material parameter – Part 1: Test Method**. Geneva, Switzerland, 2002.
- [6] CHUDOBA, T., SCHWARZER, N., RICHTER, F., **New Possibilities of Mechanical Surface Characterization with Spherical Indenters by Comparison of Experimental and Theoretical Results**, Thin Solid Films, V. 355-356, 1999, p. 284-289.
- [7] MATWEB MATERIAL PROPERTY DATA, **Search**.
<<http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061T6>>
(último acesso em 11 de fevereiro de 2005).
- [8] STRANGE, D. J., VARSHNEYA, A. K., **Finite Element Simulation of Microindentation on Aluminum**, J. Mat. Sci., V. 36, 2001, p.1943-1949.
- [9] TALJAT, B., PHARR, G.M., **Development of Pile-up During Spherical Indentation of Elastic–Plastic Solids**, Int. J. of Solids and Structures, V. 41, 2004, p.3891-3904.
- [10] MANEIRO GARRIDO, M. A., RODRÍGUEZ J., **Pile-up Effect on Nanoindentation Tests with Spherical–Conical Tips**, Scripta Materialia, V. 52, 2005, p.593–598.
- [11] DE LAMADRID, PATRÍCIA B. G., PEREZ RUIZ, E. A., SOUZA, R. M., **Effect of Load and Indenter Diameter on the Amount of Film Cracks Developed During the Indentation of Coated Systems**, in Int. Congress of Mech. Eng., São Paulo, COBEM 2003.

DETERMINATION OF THE ELASTIC MODULUS OF ALUMINUM 6061 USING INSTRUMENTED INDENTATION TESTS WITH SPHERICAL INDENTER.

ABSTRACT

The aim of this work is to determine the elastic modulus (E) of Aluminum 6061 alloy, for aged (T6) and supersaturated solid solution (SSS) conditions, by means of instrumented indentation tests using a spherical indenter (IIT-SI). The values of elastic modulus were calculated using two methodologies, one following the loading curve and another the unloading curve. The quality of the experimental data points was also evaluated by routine calculations proposed by these models. The results obtained for the SSS specimen were closer to the literature values than those of the T6 specimen. This could be attributed to the test system being sensitive to the hardness of the T6 specimen.

Key-words: Elastic modulus; Instrumented indentation; Spherical indenter.