

**Gustavo Katsuragi**

**Influência do método de cálculo da área de contato e módulo de  
elasticidade na medida de tensões residuais pela técnica de indentaçāo  
instrumentada**

Trabalho de conclusão do curso de graduação do  
Departamento de Engenharia Mecânica da Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Martins de Souza

**São Paulo**

**2006**

**Gustavo Katsuragi**

**Influência do método de cálculo da área de contato e módulo de  
elasticidade na medida de tensões residuais pela técnica de indentação  
instrumentada**

**São Paulo  
2006**

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Katsuragi, Gustavo**  
**Influência do método de cálculo da área de contato e**

**módulo**  
**de elasticidade na medida de tensões residuais pela técnica de**

**indentação instrumentada / G. Katsuragi.-- São Paulo, 2006.**

**34 p.**

**Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade**  
**de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

**1.Tensão residual 2.Filmes finos I.Universidade de São Pau-**  
**lo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica**  
**II.t.**

## **RESUMO**

A presença de tensões residuais é um fator de relevada importância para o desgaste, especialmente no caso de ferramentas revestidas com filmes finos, onde freqüentemente as tensões atingem valores compressivos elevados. Sendo assim, faz-se necessária uma análise mais detalhada destas tensões e dos métodos utilizados para medi-las.

Um método muito utilizado para medir as propriedades dos materiais, especialmente de filmes finos depositados sobre substratos, é o da indentação instrumentada. Usualmente, em ensaios de indentação instrumentada, as propriedades medidas são a dureza (H) e o módulo de elasticidade (E), no entanto, existe na literatura uma metodologia proposta por Suresh e Giannakopoulos segundo o qual seria possível obter valores de tensões residuais através destes ensaios, no entanto pouco sucesso tem sido obtido na aplicação direta desse método.

Neste trabalho aprofundou-se no estudo da medida de tensões residuais pela técnica de indentações instrumentadas bem como os fatores que a influenciam, como a medida da área de contato entre o penetrador e a amostra.

## **ABSTRACT**

Residual stress is an issue of great importance in many industrial and engineering applications. For example, the presence of residual stress affects the wear resistance of materials, especially in the case of tools coated with thin films, where frequently the tensions reach high compressive values, thus, a detailed analysis of these stresses and their measuring methods is necessary.

A method commonly used to measure materials properties, especially of thin films on substrates, is the instrumented indentation. The properties measured in instrumented indentation are usually the hardness (H) and the modulus of elasticity (E). However, the literature presents a methodology proposed by Suresh and Giannakopoulos, according to which it would be possible to get values of residual stresses through these assays. However, little success has been achieved in the application of this method. This work studies the measure of residual stresses by instrumented indentation technique as well as the important factors with that respect, such as the measure of the contact area between the indenter and the specimen.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. TENSÕES RESIDUAIS .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. DIFRAÇÃO DE RAIOS-X .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3. INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA .....</b>	<b>6</b>
<b>2.4. METODOLOGIA DE OLIVER E PHARR PARA CÁLCULO DA ÁREA DE CONTATO (AC), DUREZA (H) E MÓDULO DE ELASTICIDADE (E) .....</b>	<b>7</b>
<b>2.5. METODOLOGIA DE SURESH E GIANNAKOPOULOS PARA CÁLCULO DAS TENSÕES RESIDUAIS .....</b>	<b>9</b>
<b>2.6. MÉTODO PARA EXTRAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS USANDO INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA VICKERS PROPOSTO POR PINTAÚDE ET AL .....</b>	<b>11</b>
<b>2.7. TRABALHOS RECENTES RELACIONADOS À DETERMINAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS PELA TÉCNICA DE INDENTAÇÃO INSTRUMENTADA .....</b>	<b>12</b>
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>15</b>
<b>4.1. MATERIAIS .....</b>	<b>15</b>
<b>4.2. METODOLOGIA PROPOSTA .....</b>	<b>17</b>
<b>4.2.1. Método I – método de Suresh e Giannakopoulos sem modificações .....</b>	<b>18</b>
<b>4.2.2. Método II – método de Suresh e Giannakopoulos com cálculo da área de contato (Ac) segundo correções propostas por Pintaúde et al .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2.3. Método III – método de Suresh e Giannakopoulos com cálculo da área de contato (Ac) e módulo de elasticidade (E) segundo teoria de Oliver e Pharr... </b>	<b>20</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>21</b>
<b>5.1. TENSÃO RESIDUAL CALCULADA PELO MÉTODO DE SURESH E GIANNAKOPOULOS E VERIFICAÇÃO QUANTO À REPRODUTIBILIDADE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>21</b>
<b>5.2. EFEITO DA METODOLOGIA DE CÁLCULO DA ÁREA DE CONTATO E PROPRIEDADES DO MATERIAL NA MEDIDA DE TENSÕES RESIDUAIS. .....</b>	<b>26</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>33</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Tensão residual é um tópico de grande interesse para muitas aplicações de engenharia, podendo ser um fator desejável ou não dependendo da aplicação. Encontramos tensões residuais nas mais diversas situações, podendo citar como exemplo: (i) materiais que foram submetidos ao processo de soldagem, (ii) materiais com tratamento superficial de jateamento, (iii) materiais recobertos com filme ou filmes finos, dentre outros.

Para ferramentas de corte recobertas com um ou mais filmes, a literatura [1,2,3,4] mostra que a presença de tensões residuais afeta consideravelmente o comportamento tribológico do sistema revestido, e que tensões residuais de compressão aumentam o desempenho do filme com relação à resistência ao desgaste, até um certo valor a partir do qual a aderência do filme ao substrato fica comprometida.

Tendo em vista esse cenário, podemos inferir facilmente que os métodos utilizados para medir as tensões residuais são de grande importância. Dentre esses métodos podemos citar:

- Difração por raios-X;
- Espectroscopia de *Raman*;
- Métodos baseados na medida de deformações macroscópicas devido às tensões residuais;
- Extensometria (método do furo).

Recentemente, um outro método para a medida de tensões residuais foi proposto por Suresh e Giannakopoulos [5,6]. Este método consiste em se medir as tensões através de curvas de indentação instrumentada, como mostrada na Figura 1.1, nas quais se monitora a carga aplicada em função da profundidade de penetração de um indentador com geometria conhecida. Este ensaio permite obter as propriedades mecânicas dos materiais, incluindo filmes finos. Existe também a possibilidade de

que as indentações sejam realizadas em diferentes pontos da amostra, possibilitando assim, um mapeamento das tensões ao longo da superfície.

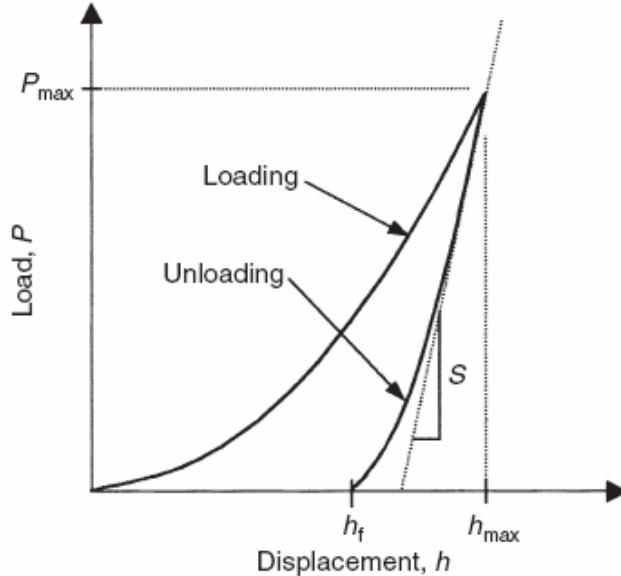


Figura 1.1 – Curva típica obtida em ensaio de indentação instrumentada

Embora o método de indentação seja promissor, até o momento pouco sucesso tem sido obtido na sua aplicação. Os valores de tensão residual calculados por indentação, além de apresentarem grande dispersão, não coincidem com valores calculados através de métodos mais convencionais e confiáveis como o da difração de raios-X, por exemplo. Dentre os fatores apontados como possíveis causadores destes problemas, dois deles são: (i) para sistemas revestidos, a condição superficial do filme indentado e (ii) o método para se calcular a área de contato entre o penetrador e a amostra [7].

Com relação à condição superficial do filme indentado, a rugosidade é um fator extremamente importante. A norma ISO 14577-1, que normatiza ensaios de indentação instrumentada, prevê que, para se obter resultados confiáveis, a relação entre a máxima profundidade de penetração ( $h_{máx}$ ) e a rugosidade absoluta ( $Ra$ ) deva ser maior ou igual a 20 ( $h_{máx}/Ra \geq 20$ ). Caso contrário, um grande número de medidas deve ser efetuado.

Quanto ao cálculo da área de contato, a metodologia de Suresh e Giannakopoulos [5,6] é baseada em modelagem por elementos finitos e considera que durante a indentaçāo ocorra o fenômeno do pile-up, que é um fenômeno onde o material plasticamente se levanta ao redor da impressão de contato. Já no contato predominantemente elástico, o fenômeno que ocorre é o do sink-in, onde o material ensaiado sofre um “afundamento” ao redor da impressão de contato. Ambos os fenômenos estão mostrados esquematicamente na Figura 1.2.

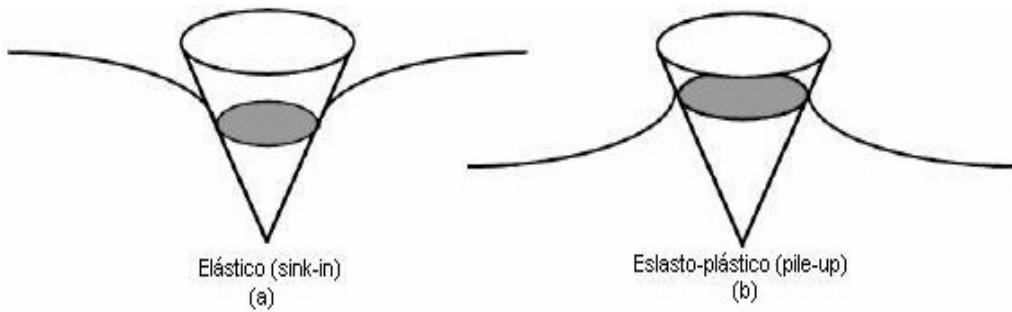


Figura 1.2 – Morfologias de indentaçāo: (a) Sink-in e (b) Pile-up.

Durante a ocorrência do pile-up, a área de contato é maior do que a prevista na teoria do contato elástico [8]. Com isso, a dureza (H) e o módulo de elasticidade (E) são superestimados quando não se considera esse aumento de área. Nesses casos o erro é em torno de 60% para H e 30% para E, conforme descrito no trabalho de Oliver e Pharr [8], que apresentaram um procedimento para avaliar estas propriedades pela técnica da indentaçāo instrumentada.

As principais características que influenciam a ocorrência de pile-up são a relação entre tensão de escoamento e módulo de elasticidade ( $\sigma_y/E$ ) e o encruamento do material. Geralmente o pile-up ocorre em materiais com baixa relação  $\sigma_y/E$  ou baixa ou não capacidade de encruamento. No mesmo trabalho citado anteriormente [8], Oliver e Pharr indicam que para  $\sigma_y/E > 0,03$  o pile-up não é significativo. Geralmente não conhecemos  $\sigma_y/E$ , no entanto, trabalhos com elementos finitos têm mostrado que existe grande correlaçāo entre  $\sigma_y/E$  e a relação entre a profundidade final e máxima de indentaçāo ( $h_f/h_{\max}$ ). Segundo Oliver e Pharr [8], o pile-up é

insignificante para  $h_f / h_{\max} < 0.7$ , caso contrário, o pile-up pode ou não ser significante dependendo do encruamento. Materiais típicos que possuem  $h_f / h_{\max} < 0.7$  são cerâmicas e metais duros.

Neste trabalho foram feitas análises de tensão residual em filmes finos de nitreto de titânio (TiN) depositados por diferentes processos PVD. Os cálculos de tensão residual foram feitos com a metodologia proposta por Suresh e Giannakopoulos [5,6] e, alternativamente, foram feitas modificações do método no que diz respeito ao cálculo da área de contato entre o penetrador e a amostra, como também quanto à obtenção das propriedades do material ensaiado. Todos os valores foram comparados com valores de tensão medidos por difração de raios-X

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Tensões residuais

Segundo Withers, P. J. e Bhadeshia [9,10], tensões residuais são tensões que atuam em um material quando o mesmo não se encontra solicitado por carregamentos externos. Usualmente se originam durante a manufatura ou processamento do material devido a deformações plásticas heterogêneas, contração térmica ou transformações de fase.

As tensões residuais são classificadas de acordo com a maneira que elas atuam no volume do material [9,10]. Existem as tensões macroscópicas, que são distribuídas sobre toda a área do material, e tensões microscópicas, que podem estar distribuídas em torno de grãos do material, de um precipitado ou em torno de defeitos cristalinos como discordâncias ou lacunas. No caso de filmes depositados sobre substratos, as tensões residuais se dividem em: (i) epitaxiais, que surgem quando a estrutura do filme tenta se ajustar à estrutura do substrato e, segundo *Oettel e Wiedemann* [1], são desprezíveis em filmes com espessura da ordem de micrômetros; (ii) tensões térmicas, que são geradas durante o processo de resfriamento do conjunto filme / substrato e se desenvolvem devido à diferença entre os coeficientes de dilatação térmica do filme e do substrato [11] e (iii) tensões intrínsecas, que podem ser definidas como tensões que surgem durante o processo de deposição do revestimento. A magnitude das tensões intrínsecas está associada à energia de impacto ou cinética das partículas que incidem sobre o filme em deposição [11]. As tensões intrínsecas compressivas são o fator mais relevante de tensões residuais em filmes depositados por PVD, podendo chegar a valores maiores que 5 GPa [1].

*Gunnars e Alahelisten* [3] propuseram um modelo para explicar porque as tensões residuais compressivas podem ser benéficas para a resistência ao desgaste do filme, até um determinado valor. Segundo os autores [3], o desgaste de uma superfície revestida submetida a tensões residuais de compressão ocorre em três etapas (Fig. 2.1). Na etapa I, a existência de asperezas na superfície leva à concentração de

tensões que nucleiam trincas; essas trincas se propagam (II) até alcançarem a região onde atuam as tensões residuais compressivas e, nessa região as trincas passam a se propagar paralelamente à superfície (III), gerando uma superfície cada vez mais lisa e sem concentradores de tensão capazes de gerar novas trincas, o que diminui o desgaste da superfície.

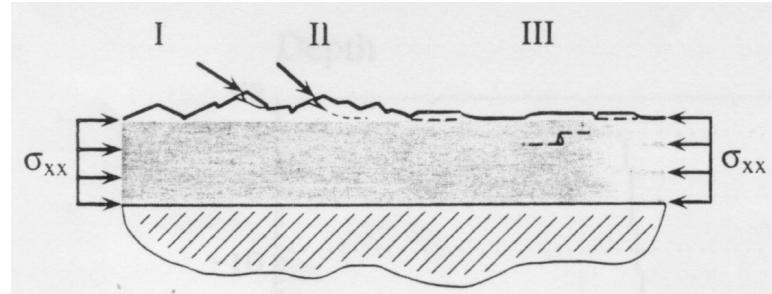


Figura 2.1 – Desgaste e tensões residuais compressivas segundo modelo proposto por Gunnars e Alahelisten [3].

## 2.2. Difração de raios-X

A análise de materiais por difração de raios-X fornece um resultado preciso e o método é bastante eficiente e largamente utilizado para se medir tensões residuais em materiais cristalinos. Este método tem a vantagem de ser não destrutivo e de fornecer dados sobre as fases presentes no material e sua orientação cristalina [12]. Para cálculo de tensões residuais, aplicam-se as técnicas conhecidas por  $\text{sen}^2\psi$ , nas quais se altera a inclinação da amostra em relação ao feixe de raios-X que incide sobre a mesma, de forma que a difração passa a ser obtida a partir de planos cristalinos que não estão paralelos à superfície da amostra [13].

## 2.3. Indentação instrumentada

O ensaio de indentação instrumentada consiste em um ensaio de dureza em que a carga e a profundidade de penetração são monitoradas. A indentação é feita tanto aplicando-se uma carga máxima conhecida como controlando a profundidade máxima de penetração. Através dos gráficos de carga vs profundidade de penetração

(Figura 1.1) pode-se extrair propriedades do material, como módulo de elasticidade e dureza [8], além de, como recentemente proposto [5,6], tensões residuais.

#### **2.4. Metodologia de Oliver e Pharr para cálculo da área de contato (Ac), dureza (H) e módulo de elasticidade (E)**

A metodologia de Oliver e Pharr [8] é largamente empregada para se medir as propriedades de materiais através de ensaios de indentação instrumentada. As propriedades avaliadas através desse método são a dureza e o módulo de elasticidade. Oliver e Pharr [8] partem do pressuposto de que entre o material ensaiado e o indentador não há atrito, a indentação é quase estática, o material ensaiado é isotrópico, o indentador é elástico e que ocorre o fenômeno do sink-in (fig. 1.2a) durante a indentação.

A seguir será feita uma descrição passo a passo para implementação do método de Oliver e Pharr [8]:

1º Passo - Obter a curva de Carga vs Profundidade como mostra a Figura 1.1.

2º Passo - Interpolar a parte superior da curva de descarregamento (entre 25-50% da parte superior) através da equação eq. (1), onde  $P$  é a carga,  $h$  e  $h_f$  são a profundidade de penetração instantânea e final respectivamente,  $m$  e  $\alpha$  são constantes.

$$P = \alpha(h - h_f)^m \quad (1)$$

3º Passo - Através da eq. (1), calcular a rigidez de contato ( $S$ ) conforme mostra a eq.(2).

$$S = \frac{dP}{dh} = m\alpha(h - h_f)^{m-1} \quad (2)$$

4º Passo - Calcular a profundidade de contato  $h_c$ , Figura 2.2, pelas eqs. (3) e (4),

onde

$\varepsilon = 0.72$  para indentadores cônicos e

$\varepsilon = 0.75$  para parabolóide de revolução;

$$h_c = h_{\max} - h_s \quad (3)$$

$$h_s = \varepsilon \frac{P_{\max}}{S} \quad (4)$$

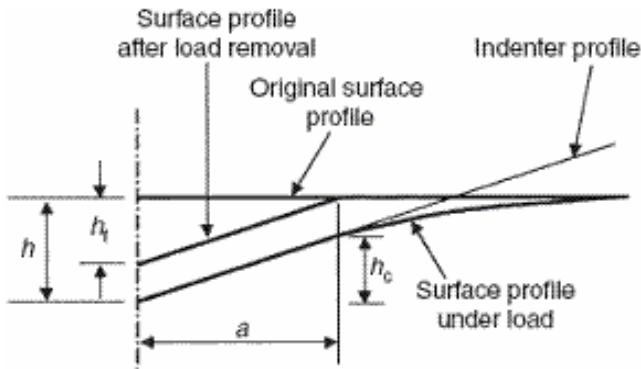


Figura 2.2 - Representação esquemática da seção de indentação.

5º Passo - Realizar várias indentações desde a mínima até a máxima carga para o equipamento.

6º Passo - Para as maiores indentações, calcular a área de contato através da função de forma de um indentador perfeito, dada pela eq. (5).

$$A(h_c) = 24.5h_c^2 \quad (5)$$

7º Passo - Com base nessas áreas de contato, construir um gráfico de  $C \times A^{-1/2}$ , sendo  $C$  a *deflexão elástica* definida nas eqs. (6) e (7), onde  $C_f$  é a flexibilidade do equipamento,  $C_s$  a *compliance* da amostra e  $E_r$  é o módulo de elasticidade reduzido, dado pela eq. (8).

$$C = C_s + C_f \quad (6)$$

$$C = C_f + \frac{\sqrt{\pi}}{2E_r} \frac{1}{\sqrt{A}} \quad (7)$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu^2)}{E} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \quad (8)$$

Na eq. (8) o índice  $i$  se refere às propriedades do indentador.

8º Passo - Com o procedimento anterior podemos obter uma primeira estimativa de  $C_f$  e  $E_r$ . Com esses valores, calcular a área para todas as demais indentações através da eq. (9).

$$A = \frac{\pi}{4E_r^2} \frac{1}{(C - C_f)^2} \quad (9)$$

9º Passo - De posse desses dados, uma estimativa inicial da função de área pode ser feita pela interpolação dos dados através da relação dada pela eq. (10).

$$A(h_c) = 24.5h_c^2 + C_1h_c^1 + C_2h_c^{1/2} + C_3h_c^{1/4} + \dots + C_8h_c^{1/128} \quad (10)$$

10º Passo - Com essa nova função de área, itera-se os passos de 7 em diante até se conseguir convergência dos valores.

## 2.5. Metodologia de Suresh e Giannakopoulos para Cálculo das Tensões Residuais

Suresh e Giannakopoulos [5,6] partem das mesmas hipóteses iniciais de Oliver e Pharr [8] no equacionamento de seu método (não há atrito, a indentação é quase estática, o material ensaiado é isotrópico, o indentador é elástico).

A seguir será apresentado passo a passo o método para cálculo das tensões residuais por indentação instrumentada para materiais com tensão ou deformação residual e propriedades desconhecidas:

1º Passo - Determine a curva de indentação conforme Figura 1.1;

2º Passo - Meça a área de contato através da eq. (11) onde  $T = \left(1 - \frac{h_r}{h_{\max}}\right) \cdot \frac{1}{d^*}$ , onde  $d^*$  é igual a 5 para Vickers e 4,678 para Berkovich.

$$\frac{A_{\max}}{h_{\max}^2} = 9,96 - 12,64(1-T) + 105,42(1-T)^2 - 229,57(1-T)^3 + 157,67(1-T)^4 \quad (11)$$

3º Passo - Através da parte do descarregamento (entre 25-50% da parte superior) da curva indicada na Figura 1.1, calcule E (assumindo  $\nu$ ) com o auxílio das eqs. (11) e (12), onde  $C^*$  é uma constante que assume o valor de 1,142 para indentadores Vickers e 1,167 para Berkovich;

$$E^* = \frac{1}{C^* \sqrt{A_{\max}}} \frac{dP}{dh} \quad (12)$$

$$E = \frac{(1-\nu^2)E^*E_i}{E_i - (1-\nu^2)E^*} \quad (13)$$

4º Passo - Calcule a relação de Suresh dada pela eq. (14), onde  $\alpha$  é um ângulo dependente da forma do indentador ( $\alpha = 22^\circ$  para Vickers);

$$P_{\max}/(A_{\max}E \tan \alpha) \quad (14)$$

Se  $P_{\max}/(A_{\max}E \tan \alpha) \leq 0.1$ , utilize a eq. (15) para calcular a tensão residual equibiaxial ( $\sigma_y^R$ ).

$$\sigma_y \sim \sigma_u \sim \sigma_y^R = P_{\max} / (2,80 \cdot A_{\max}) \quad (15)$$

onde

$\sigma_u$  é a tensão de escoamento com deformação plástica de aproximadamente 0,29 e  $\sigma_y$  é a tensão de escoamento.

Mas se  $P_{\max} / (A_{\max} E \tan \alpha) > 0.1$ , utilize as eqs. (16) e (17) para avaliar  $\sigma_y^R$ .

$$\frac{\sigma_u - \sigma_y^R}{0.29E} = 1.0 - 0.1419 \left( \frac{h_f}{h_{\max}} \right) - 0.9568 \left( \frac{h_f}{h_{\max}} \right)^2 \quad (16)$$

$$\frac{P_{\max}}{h_{\max}^2} = \frac{c^*}{(\tan \alpha)^2} \left( \sigma_u + \sigma_y^R \right) \left( 1 + \ln \frac{E \tan \alpha}{3\sigma_y^R} \right) \quad (17)$$

## 2.6. Método para extração de propriedades mecânicas usando indentação instrumentada Vickers proposto por Pintaúde *et al*

Pintaúde et al [14] apresentaram uma revisão das recentes metodologias [5,6] para analisar dados obtidos através de testes de indentação instrumentada. Testes experimentais foram realizados utilizando indentador Vickers e as dimensões das crateras de indentação foram analisadas com um interferômetro a laser. Os resultados foram utilizados para verificar a acurácia dos métodos propostos para prever a morfologia de indentação, pile-up ou sink-in, bem como a precisão das rotinas propostas para extrair propriedades mecânicas dos materiais indentados. A ocorrência de pile-up em todos os materiais testados indicou que o modelo para prever este comportamento pode falhar e, consequentemente falhar na determinação de deformações e tensões residuais. Nesse trabalho [14] foi sugerida uma correção na eq. (11) para cálculo da área de contato; correção que leva em consideração de maneira mais precisa os fenômenos de pile-up e sink-in. Esta correção é mostrada na eq. (18).

$$\frac{A_{\max}}{h_{\max}^2} = 11.622274 \left[ \left( h_r / h_{\max} \right)^{2.1358683} \cdot \exp \left( \left( h_r / h_{\max} \right)^{6.2703695} \right) \right] + 9.791936 \quad (18)$$

## 2.7. Trabalhos recentes relacionados à determinação de tensões residuais pela técnica de indentação instrumentada

No trabalho de Q. Wang *et al* [15] um sistema de indentação instrumentada foi utilizado para se medir tensões residuais em uma placa de aço inoxidável implantada com íons  $Fe^{2+}$  com energia de 3MeV para cada  $3 \times 10^{16} cm^2$ . A análise teórica da indentação instrumentada foi realizada com base na premissa de que no descarregamento, o comportamento elástico é completamente independente de qualquer tensão residual pré-existente na superfície. Essa premissa foi verificada por simulação através do método dos elementos finitos. Foi encontrado que o nível de tensão na superfície é proporcional ao deslocamento da carga induzido pela tensão superficial. Baseado no método da energia, uma fórmula foi sugerida para determinar a tensão residual por indentação instrumentada. As tensões residuais induzidas por implantação de íons foram determinadas utilizando-se esta fórmula - eq. (19).

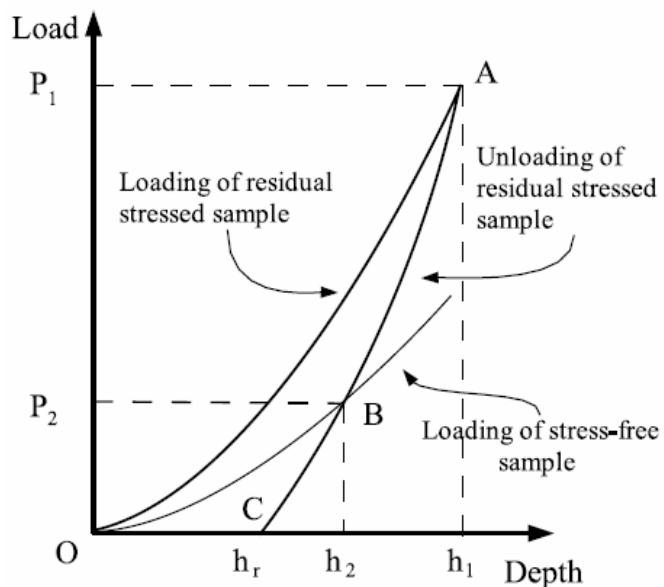


Figura 2.3 – Curvas de indentação para superfícies com e sem tensão residual utilizadas para avaliar a tensão residual pelo método da energia [15].

$$\sigma_{\text{residual}} = \frac{P_1 - P_2}{2\pi \tan^2 \alpha h_r^2} \quad (19)$$

onde  $\alpha$  é o semi-ângulo da impressão residual de indentaçāo e pode ser considerado com um fator de correção geométrico para indentadores com geometrias variadas.

Xi Chen, Jin Yan e Anette M. Karlsson [16] utilizaram o método dos elementos finitos para analisar o efeito de tensões residuais equi-biaxiais planas na medida de dureza e rigidez realizadas por indentaçāo instrumentada em materiais volumétricos ou filmes espessos. Segundo os autores [16], através da variação dos parâmetros dos materiais e tensão residual em uma grande faixa, observou-se que tanto a dureza como a rigidez variam com a tensão residual. Adicionalmente, tanto a morfologia de indentaçāo plástica e elástica (pile-up e sink-in), assim como o trabalho de indentaçāo se mostraram muito sensíveis aos níveis de tensão residual, o que, segundo os autores, torna possível a medida de tensão residual através de indentaçāo instrumentada. Os autores apresentaram um algorítimo reverso para medir o módulo de elasticidade e tensão residual através de um simples teste de indentaçāo instrumentada. As análises por indentaçāo e as feitas numericamente mostraram grande concordância. Os autores também afirmam que, diferentemente de outros métodos, dentre eles o método de Suresh e Giannakopoulos [5,6], o método proposto não requer um material livre de tensões como referência, o que faz com que o método tenha grande potencial para efetivamente e rapidamente mapear as tensões residuais no material.

### **3. OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é propor uma modificação no método de medidas das tensões residuais por indentação instrumentada, no que diz respeito ao cálculo da área de contato e propriedades do material. Para verificação do método, amostras de metal duro (WC-Co) recobertas com um filme de nitreto de titânio (TiN) serão analisadas pela nova metodologia, os valores calculados serão comparados com valores obtidos pela aplicação direta do método de Suresh, ambos tendo como base valores de tensão calculados por difração de raios-X.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Materiais

As amostras para análise são compostas de 15 insertos de metal duro (WC-Co) da classe ISO P20 (Cobalto entre 8 a 10% e Carboneto de Tungstênio entre 85 a 90%) com geometria triangular positiva de arestas de 16 mm, espessura de 3 mm e raio de ponta de 0,8 mm (geometria TPGN 160308). Os insertos foram revestidos com um filme fino de nitreto de titânio (TiN) por processos PVD e com parâmetros de deposição diferenciados. As amostras foram numeradas de 1 a 15, sendo as de número 1 a 9 revestidas por processos comercialmente disponíveis, que foram realizados pela empresa *Brasimet S.A. Indústria e Comércio*. Já as amostras de números 10 a 15 foram revestidas na *Colorado School of Mines*.

Nas tabelas (4.1) e (4.2) são indicadas as amostras e seus respectivos parâmetros de deposição.

As medidas e análises de difração por raios-X foram feitas na *Comisión Nacional de Energia Atómica (Argentina)* e as tensões residuais foram determinadas com base no método do ângulo rasante.

Todas as amostras utilizadas no presente trabalho já foram analisadas em outros estudos previamente realizados por pesquisadores do Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) [7,17,18] do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP. Os resultados das análises de tensão residual por difração de raios-X das amostras numeradas de 1 a 9 estão na referência [7]. Na referência [7] encontram-se os resultados das análises de tensão residual por difração de raios-X e por indentação instrumentada das amostras numeradas de 1 a 12, e na referência [18] estão os resultados das análises de tensão residual por difração de raios-X das amostras de 10 a 15.

Tabela (4.1) – Parâmetros de deposição das amostras revestidas na Brasimet S.A. [7].

Amostras Revestidas pela Brasimet S.A.		
Processo A Amostras 1,2,3	Processo B Amostras 4,5,6	Processo C Amostras 7,8,9
Evaporação por feixe de elétrons	Arco catódico a baixa temperatura	Arco catódico a alta temperatura
Pressão $\approx$ 1,5 mTorr	Pressão $\approx$ 15 mTorr	Pressão $\approx$ 15 mTorr
Temperatura $\approx$ 480°C	Temperatura $\approx$ 250°C	Temperatura $\approx$ 450°C
Tensão Bias $\approx$ -50V	Tensão Bias $\approx$ -100V	Tensão Bias $\approx$ -250V
Espessura do filme $\approx$ 3 $\mu m$	Espessura do filme $\approx$ 3 $\mu m$	Espessura do filme $\approx$ 3 $\mu m$

Tabela (4.2) – Parâmetros de deposição das amostras revestidas na *Colorado School of Mines* [7].

Amostras Revestidas na <i>Colorado School of Mines</i>					
Amostra 10 DC	Amostra 11 DC	Amostra 12 DC	Amostra 13 Alvo Pulsado	Amostra 14 Alvo Pulsado	Amostra 15 Alvo Pulsado
Bias = 0V	Bias = -50V	Bias = -100V	Bias = 0V Substrato aterrado	Bias = 0V Substrato isolado	Bias = -50V
Espessura $\approx$ 1,20 $\mu m$	Espessura $\approx$ 1,21 $\mu m$	Espessura $\approx$ 0,33 $\mu m$	Espessura $\approx$ 0,95 $\mu m$	Espessura $\approx$ 1,23 $\mu m$	Espessura $\approx$ 0,87 $\mu m$

O equipamento utilizado para realização dos testes de indentação instrumentada foi o *Fisherscope* modelo *H100V* (Fig. 4.1).



Figura 4.1 - Equipamento para medidas de indentação instrumentada.

## 4.2. Metodologia Proposta

No trabalho de Suresh e Giannakopoulos [5,6] é apresentada uma correlação para cálculo da área de contato, que tem origem na modelagem da indentação pelo método dos elementos finitos. No entanto, essa correlação considera que durante a indentação ocorra o fenômeno do pile-up entre o penetrador e a amostra, o que acontece quando se indenta metais de baixa dureza, como o alumínio, e materiais com comportamento predominantemente plástico.

Já no trabalho de Oliver e Pharr [8], é apresentada uma metodologia para cálculo da área de contato e avaliação das propriedades da amostra (dureza e módulo) que considera que ocorra o fenômeno do sink-in durante a indentação. Tal fenômeno ocorre em metais duros e cerâmicas, que é o caso do material analisado no presente trabalho, onde amostras de metal duro foram revestidas com um filme fino de Nitreto de Titânio.

Tendo em vista esse cenário, supõe-se que o método de Suresh não é adequado para calcular a área de contato das amostras em questão. Já o método de Oliver e Pharr [8] se mostra mais apropriado para este fim e, ao analisarmos os dois métodos descritos, vemos que não existem restrições de ordem teórica ou prática para que se utilize o método de Oliver e Pharr [8] para calcular a área de contato e as propriedades do material ensaiado e, de posse desses dados, se utilize o método de Suresh e Giannakopoulos [5,6] para avaliar as tensões residuais.

Assim, analisaremos todas as amostras através da aplicação direta do método de Suresh e Giannakopoulos [5,6], bem como utilizaremos a correção proposta por Pintaúde et al [14] para avaliar as propriedades do material ensaiado e, adicionalmente, faremos uso da metodologia de Oliver e Pharr [8] para calcular as propriedades do material bem como a área de contato. Essas três metodologias serão daqui em diante referidas como método I, II e III respectivamente. Os valores de tensão residual calculados pela aplicação direta de Suresh e Giannakopoulos [5,6] [5,6] serão comparados com trabalhos anteriores [7,18], que utilizaram os mesmos

dados experimentais e mesma metodologia, isso possibilitará avaliar a reproduzibilidade dos resultados.

#### 4.2.1. Método I – método de Suresh e Giannakopoulos sem modificações

A Fig. (4.2) apresenta o fluxograma correspondente à aplicação do Método I, que é o método descrito no item 2.5.

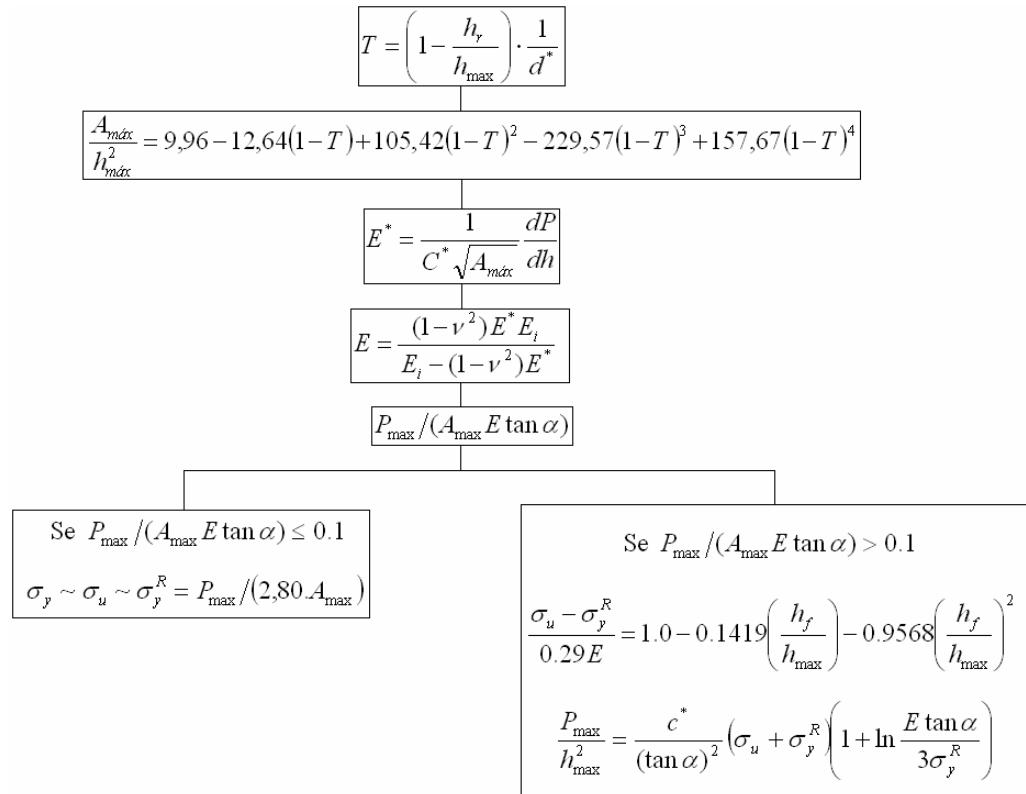


Figura 4.2 - Esquema de rotina de cálculo de tensões residuais pelo método direto de Suresh e Giannakopoulos [5,6].

#### 4.2.2. Método II – método de Suresh e Giannakopoulos com cálculo da área de contato (Ac) segundo correções propostas por Pintaúde et al

A Fig. 4.3 apresenta o fluxograma correspondente à aplicação do Método II. Essa metodologia é essencialmente igual à anterior, exceto pela equação utilizada para cálculo do valor de  $A_{máx}/h_{máx}^2$ .

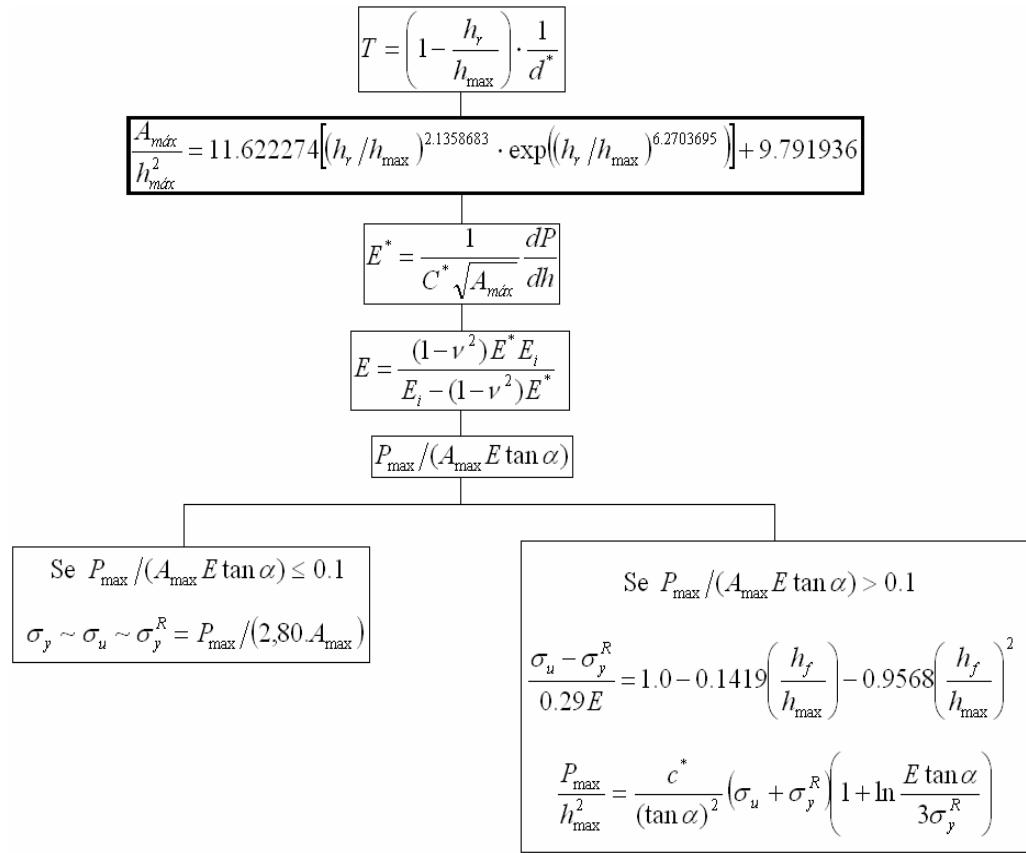


Figura 4.3. Esquema de rotina de avaliação de tensões residuais pelo método de Suresh e Giannakopoulos [5,6] com modificações propostas por Pintaúde et al [14].

#### 4.2.3. Método III – método de Suresh e Giannakopoulos com cálculo da área de contato (Ac) e módulo de elasticidade (E) segundo teoria de Oliver e Pharr

A Fig. 4.4 apresenta o fluxograma correspondente à aplicação do Método III. Por esse método, a área de contato é calculada ela metodologia de Oliver & Pharr [8] e as tensões residuais pelo método de Suresh & Giannakopoulos [5].

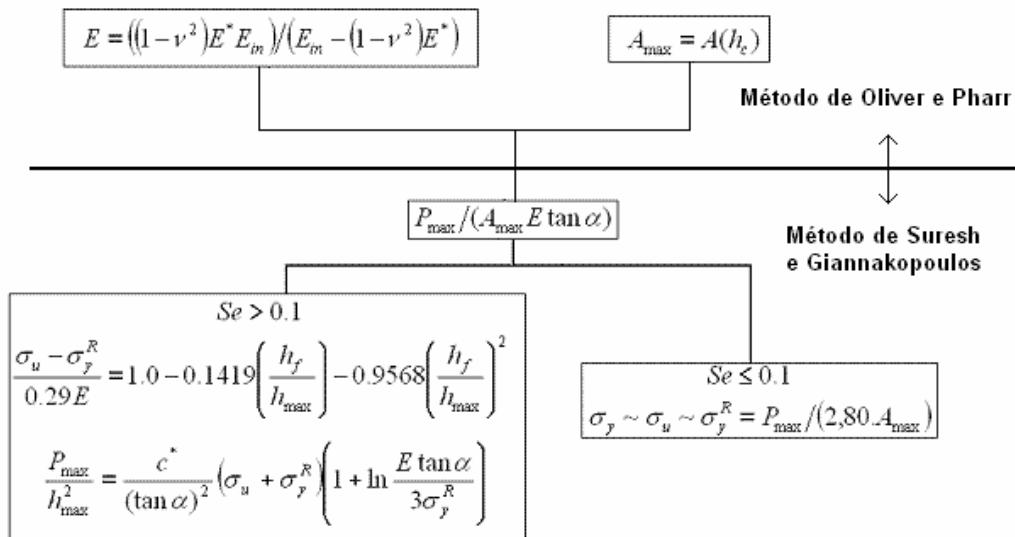


Figura 4.4. Esquema de rotina de cálculo de tensões residuais pela metodologia proposta.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Tensão residual calculada pelo método de Suresh e Giannakopoulos e verificação quanto à reproduzibilidade dos resultados

A seguir (Tabelas 5.1 e 5.2), apresenta-se as características das amostras analisadas nesse trabalho e o resultado das análises de tensão residual efetuadas por outros autores [7], assim como o resultado das medidas realizadas no presente trabalho. Os resultados das Tabelas 5.1 e 5.2 foram obtidos seguindo-se o Método I.

Tabela 5.1 – Propriedades das amostras e valores de tensão residual calculados na referência [7] utilizando difração de raios-X e o método proposto por Suresh e Giannakopoulos [5,6]

Amostra	Força [mN]	Espessura do Filme [nm]	$h_{máx}$ [nm]	$A_{máx}$ [ $\mu m^2$ ]	E [GPa]	"Relação de Suresh"	$\sigma_{R-1}$ [GPa]	$\sigma_{R-2}$ [GPa]	$\sigma_{R-3}$ [GPa]
1	30	3000	185	0,616	1000	0,12	7,08	10	321
1	50	3000	257	1,420	679	0,13	7,08	8	208
2	30	3000	206	0,767	588	0,16	7,79	9	178
2	50	3000	284	1,500	631	0,13	7,79	7	199
3	30	3000	228	0,996	723	0,10	-	7	235
3	50	3000	373	3,070	293	0,14	-	4	87
4	30	3000	277	1,540	527	0,09	10,17	4	-
4	50	3000	427	3,780	451	0,07	10,17	3	-
5	30	3000	224	0,944	737	0,11	8,26	7	239
5	50	3000	308	1,860	728	0,09	8,26	6	-
6	30	3000	311	1,940	402	0,09	-	3	-
6	50	3000	371	2,590	563	0,08	-	4	-
7	30	3000	229	0,970	668	0,11	7,76	7	215
7	50	3000	340	2,200	751	0,07	7,76	5	-
8	30	3000	218	0,863	663	0,13	-	7	210
8	50	3000	313	1,750	668	0,11	-	6	219
9	30	3000	217	1,250	580	0,10	6,35	5	179
9	50	3000	265	1,340	880	0,11	6,35	8	285
10	10	1180	95	0,159	844	0,18	3,69	1	251
10	20	1180	260	1,420	396	0,09	3,69	3	-
11	10	1170	129	0,296	494	0,17	6,61	7	150
11	20	1170	182	0,591	535	0,16	6,61	7	165
12	10	330	217	0,922	294	0,09	10,29	-	-
12	20	330	285	1,740	392	0,07	10,29	-	-

Onde:

$\sigma_{R-1}$  - Tensão residual calculada por difração de raios-X;

$\sigma_{R-2}$  - Tensão residual calculada considerando a “relação de Suresh” menor ou igual a 0,1;

$\sigma_{R-3}$  - Tensão residual calculada considerando a “relação de Suresh” maior que 0,1.

Tabela 5.2 - Propriedades das amostras, valores de tensão residual calculados por difração de raios-X e pelo método proposto por Suresh e Giannakopoulos [5,6] realizados nesse trabalho.

Amostra	Força [mN]	Espessura do Filme [nm]	$h_{máx}$ [nm]	$A_{máx}$ [ $\mu m^2$ ]	E [GPa]	"Relação de Suresh"	$\sigma_{R-1}$ [GPa]	$\sigma_{R-2}$ [GPa]	$\sigma_{R-3}$ [GPa]
1	30	3000	193	0,74	645	0,16	7,08	15,0	191
1	50	3000	274	1,54	582	1,16	7,08	13,3	174
2	30	3000	-	-	-	-	7,79	-	-
2	50	3000	219	0,85	750	0,20	7,79	22,5	218
3	30	3000	204	0,83	588	0,16	-	13,3	174
3	50	3000	-	-	-	-	-	-	-
4	30	3000	197	0,78	792	0,13	10,17	13,9	247
4	50	3000	433	4,22	291	0,10	10,17	4,3	91
5	30	3000	194	0,75	938	0,13	8,26	16,1	298
5	50	3000	304	1,87	616	0,12	8,26	10,4	195
6	30	3000	344	2,58	259	0,11	-	6,2	207
6	50	3000	369	2,82	323	0,14	-	6,4	97
7	30	3000	173	0,56	727	0,18	7,76	19,2	212
7	50	3000	274	1,47	677	0,13	7,76	12,6	210
8	30	3000	170	0,54	810	0,18	-	21,0	239
8	50	3000	256	1,20	629	0,17	-	15,2	189
9	30	3000	208	0,84	586	0,16	6,35	13,4	175
9	50	3000	292	1,72	507	0,15	6,35	10,7	153
10	10	1180	87	0,14	1017	0,19	3,69	27,2	301
10	20	1180	95	0,17	1013	0,34	3,69	49,7	232
11	10	1170	116	0,24	446	0,25	6,61	16,0	123
11	20	1170	156	0,45	590	0,21	6,61	18,5	168
12	10	330	106	0,21	680	0,19	10,29	19,1	198
12	20	330	159	0,32	1926	0,15	10,29	19,2	287

Os valores de  $h_{máx}$  que estão em vermelho nas Tabelas 5.1 e 5.2 indicam que estes valores ultrapassaram o valor máximo recomendado, de 10% a espessura do filme.

A “relação de Suresh”, dada pela eq. (14), indica se o material está no regime plástico ou no regime elasto-plástico [5], sendo regime plástico quando a “relação de Suresh” assume valores maiores que 0,1 e regime elasto-plástico quando a “relação de Suresh” assume valores menores ou iguais a 0,1. Para todas as amostras, os valores da “relação de Suresh” oscilaram em torno de 0,1. Pode-se observar, também, que existe um grande salto nos valores de tensão residual calculados quando a “relação de Suresh” é maior que 0,1 e que, nesse caso, os valores se afastam muito dos valores calculados por difração de raios-X. Tais fatos indicam que esse parâmetro ainda requer revisão para ser utilizado, pois pode acarretar em resultados não condizentes com a tensão existente no material.

As Figuras 5.1 a 5.5 fazem uma comparação entre os valores das Tabelas 5.1 e 5.2.

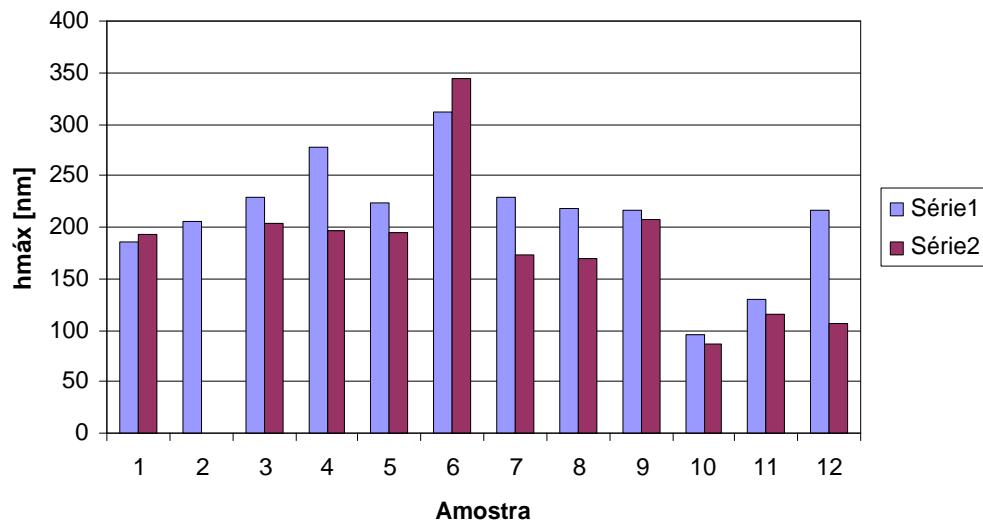


Figura 5.1 – Valores de hmáx por amostra. Série1 – valores calculados na referência [7]. Série2 – valores calculados no presente trabalho. Amostra de 1 a 9 carregadas com 30 mN e de 10 a 12 com 10 mN.

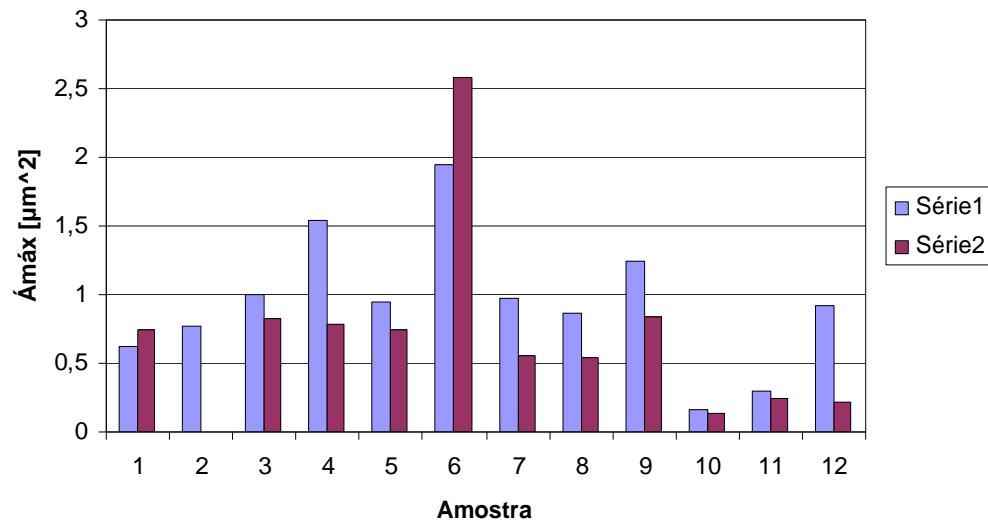


Figura 5.2 – Valores de área máxima de contato (Amax) por amostra. Série1 – valores calculados na referência [7]. Série2 – valores calculados no presente trabalho. Amostra de 1 a 9 carregadas com 30 mN e de 10 a 12 com 10 mN.

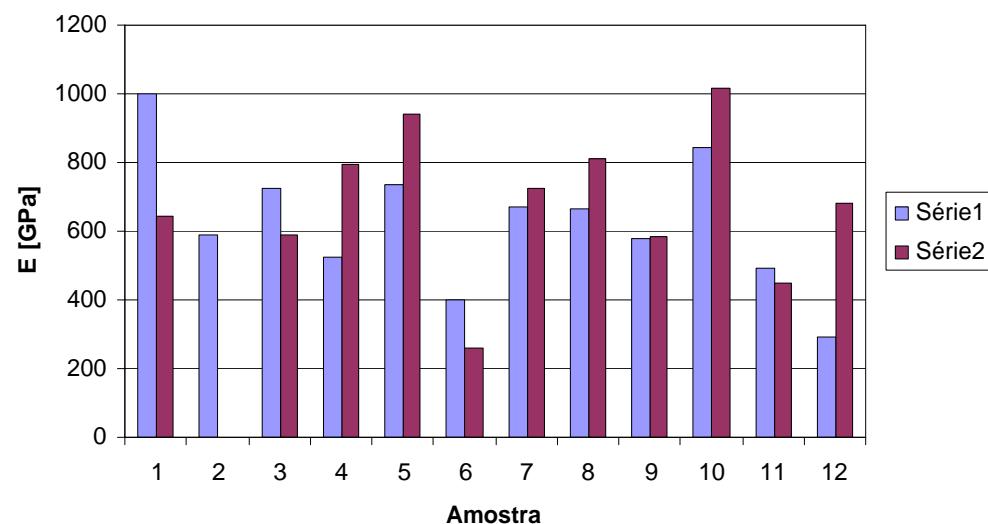


Figura 5.3 – Valores de módulo de elasticidade (E) por amostra. Série1 – valores calculados na referência [7]. Série2 – valores calculados no presente trabalho. Amostra de 1 a 9 carregadas com 30 mN e de 10 a 12 com 10 mN.

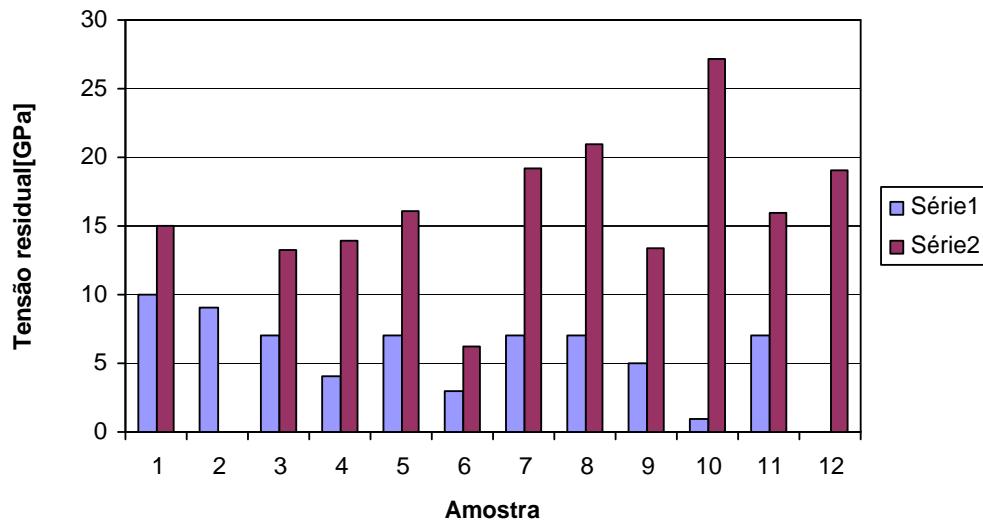


Figura 5.4 – Valores tensão residual considerando a “relação de Suresh” menor que 0,1. Série1 – valores calculados na referência [7]. Série2 – valores calculados no presente trabalho. Amostra de 1 a 9 carregadas com 30 mN e de 10 a 12 com 10 mN.

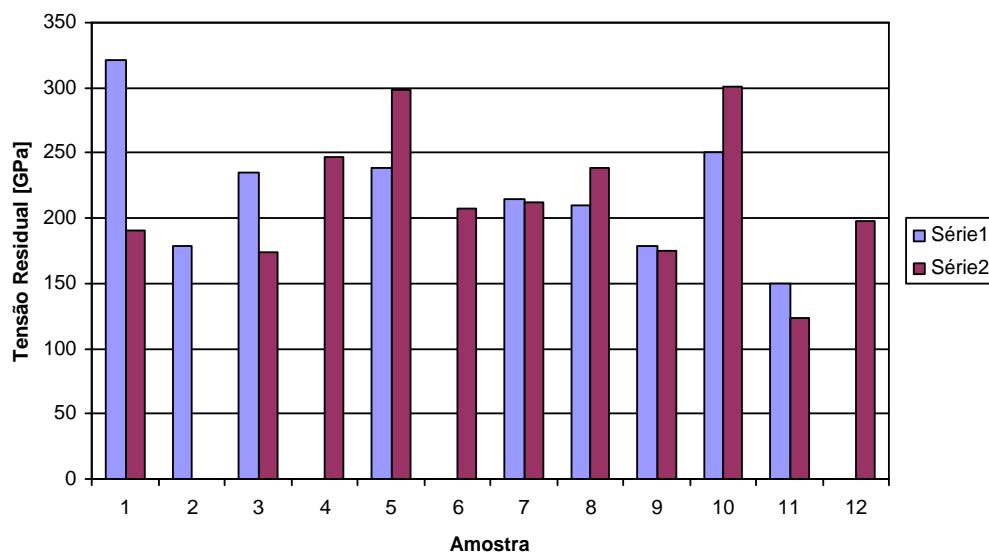


Figura 5.5 – Valores tensão residual considerando a “relação de Suresh” maior que 0,1. Série1 – valores calculados na referência [7]. Série2 – valores calculados no presente trabalho. Amostra de 1 a 9 carregadas com 30 mN e de 10 a 12 com 10 mN.

Podemos observar que as duas análises de tensão residual, embora utilizem os mesmos dados experimentais e o mesmo método (método I), apresentam diferenças

consideráveis. No caso da amostra 10 o valor de tensão residual chega a ser 27 vezes diferente (Figura 5.4).

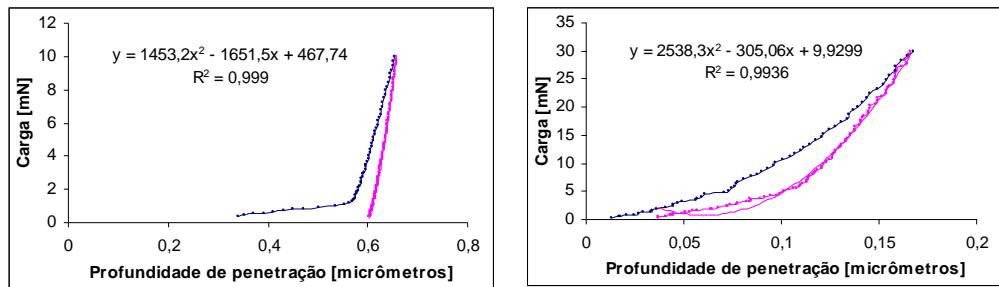


Figura 5.6 – Exemplo de curvas de indentação não conformes.

As grandes variações entre as curvas de indentação para uma mesma amostra se devem às baixas cargas utilizadas na indentação para que a profundidade máxima não ultrapasse 10% da espessura do filme e, devido à rugosidade elevada do filme indentado [7].

### 5.2. Efeito da metodologia de cálculo da área de contato e propriedades do material na medida de tensões residuais.

Neste item apresenta-se o resultado da análise de tensões residuais para as 14 amostras (não foi possível efetuar medidas na amostra 15 devido ao filme ter descolado do substrato e o mesmo apresentar muitas descontinuidades) segundo os métodos I, II e III. Esses resultados estão apresentados nas Tabelas 5.3 a 5.5. É importante observar que a tabela 5.3 é semelhante à Tabela 5.2.

Como em todos os cálculos para os quais a “relação de Suresh” é maior que 0,1 a tensão residual é da ordem de  $10^2$  e os valores calculados por difração de raios-X são em geral menores que a dezena, serão analisados somente os valores de tensão residual calculados considerando a “relação de Suresh” menor que 0,1.

Tabela 5.3 – Valores de tensão residual calculados pelo método-I considerando a “relação de Suresh” menor que 0,1.

Amost.	Força [mN]	hmáx [nm]	Amax [ $\mu\text{m}^2$ ]	E [GPa]	Rel. de Suresh	$\sigma_{R-1}$	$\sigma_{R-2}$
1	30	193	0,74	645	0,160	7,08	15,0
1	50	273	1,541	582	0,156	7,08	13,3
2	30	-	-	-	-	7,79	-
2	50	219	0,85	750	0,204	7,79	22,5
3	30	204	0,83	588	0,157	-	13,3
3	50	-	-	-	-	-	-
4	30	197	0,78	792	0,13	10,17	13,9
4	50	433	4,23	291	0,102	10,17	4,3
5	30	194	0,75	938	0,13	8,26	16,1
5	50	304	1,9	616	0,12	8,26	10,4
6	30	344	2,58	259	0,111	-	4,2
6	50	369	2,8	322	0,14	-	6,4
7	30	172,8	0,557	727	0,183	7,76	19,2
7	50	274	1,5	677	0,13	7,76	12,6
8	30	170	0,54	810	0,18	-	21,0
8	50	256	1,2	629	0,17	-	15,2
9	30	208	0,84	586	0,16	6,35	13,4
9	50	292	1,7	507	0,150	6,35	10,7
10	10	87	0,14	1017	0,19	3,69	27,2
10	20	95	0,17	1013	0,34	3,69	50
11	10	116	0,24	446	0,25	6,61	16
11	20	156	0,45	590	0,21	6,61	18
12	10	106	0,21	680	0,19	10,29	19
12	20	159	0,52	920	0,15	10,29	19
13	10	79	0,11	1370	0,18	5,65	34
13	15	109	0,201	1017	0,19	5,65	28
13	20	124	0,28	1033	0,19	5,65	27
14	10	81	0,11	1138	0,21	5,15	33
14	15	105	0,20	1067	0,19	5,15	28
14	20	132	0,32	804	0,20	5,15	23

Tabela 5.4 – Valores de tensão residual calculados pelo método II, considerando a “relação de Suresh” menor que 0,1.

Amost.	Força [mN]	hmáx [nm]	Amax [ $\mu\text{m}^2$ ]	E [GPa]	Rel. de Suresh	$\sigma_{R-1}$	$\sigma_{R-2}$
1	30	193	0,46	974	0,17	7,08	24
1	50	273	0,96	879	0,17	7,08	21
2	30	-	-	-	-	7,79	-
2	50	219	0,53	1170	0,21	7,79	36
3	30	204	0,51	875	0,17	-	21
3	50	-	-	-	-	-	-
4	30	197	0,48	1248	0,13	10,17	22
4	50	433	2,73	387	0,12	10,17	6,6
5	30	194	0,47	1654	0,12	8,26	26
5	50	304	1,16	929	0,13	8,26	16,7
6	30	344	1,65	344	0,13	-	6,5
6	50	369	1,76	441	0,16	-	10
7	30	172,8	0,343	1131	0,191	7,76	31,2
7	50	274	0,91	1044	0,14	7,76	20
8	30	170	0,33	1301	0,18	-	34
8	50	256	0,74	951	0,18	-	24,6
9	30	208	0,52	876	0,17	6,35	21,7
9	50	292	1,07	738	0,16	6,35	17,3
10	10	87	0,085	1902	0,17	3,69	44
10	20	95	0,106	1889	0,3	3,69	80
11	10	116	0,15	652	0,28	6,61	26
11	20	156	0,28	912	0,22	6,61	30
12	10	106	0,13	1087	0,19	10,29	31
12	20	159	0,32	1926	0,15	10,29	31
13	10	79	0,073	2727	0,16	5,65	54
13	15	109	0,12	1846	0,17	5,65	45
13	20	124	0,17	2031	0,17	5,65	43
14	10	81	0,07	2209	0,18	5,15	53
14	15	105	0,13	2044	0,17	5,15	46
14	20	132	0,19	1325	0,19	5,15	37

Tabela 5.5 - Valores de tensão residual calculados pelo método III, considerando a “relação de Suresh” menor que 0,1.

Amost.	Força [mN]	hmáx [nm]	Amax [ $\mu\text{m}^2$ ]	E [GPa]	Rel. de Suresh	$\sigma_{R-1}$	$\sigma_{R-2}$
1	30	193	1,33	421	0,13	7,08	8,2
1	50	273	2,24	434	0,13	7,08	8,8
2	30	-	-	-	-	7,79	-
2	50	219	1,37	520	0,18	7,79	13,8
3	30	204	1,45	395	0,13	-	7,5
3	50	-	-	-	-	-	-
4	30	197	1,46	490	0,11	10,17	7,4
4	50	433	5,32	254	0,092	10,17	3,3
5	30	194	1,43	510	0,11	8,26	7,8
5	50	304	2,88	448	0,10	8,26	6,2
6	30	344	3,66	212	0,095	-	2,93
6	50	369	3,78	272	0,12	-	4,7
7	30	172,8	1,063	453	0,154	7,76	10,07
7	50	274	2,29	481	0,12	7,76	7,9
8	30	170	1,05	479	0,15	-	10,5
8	50	256	1,91	451	0,15	-	9,5
9	30	208	1,51	386	0,13	6,35	7,4
9	50	292	2,48	394	0,129	6,35	7,3
10	10	87	0,53	372	0,13	3,69	6,8
10	20	95	0,58	391	0,13	3,69	7,3
11	10	116	0,70	237	0,15	6,61	5,2
11	20	156	1,02	351	0,15	6,61	7,8
12	10	106	0,67	310	0,12	10,29	5,5
12	20	159	0,12	380	0,118	10,29	7,4
13	10	79	0,48	398	0,13	5,65	7,7
13	15	109	0,61	439	0,14	5,65	8,9
13	20	124	0,72	488	0,14	5,65	10,0
14	10	81	0,47	379	0,14	5,15	7,6
14	15	105	0,61	444	0,14	5,15	8,9
14	20	132	0,78	441	0,15	5,15	9,2

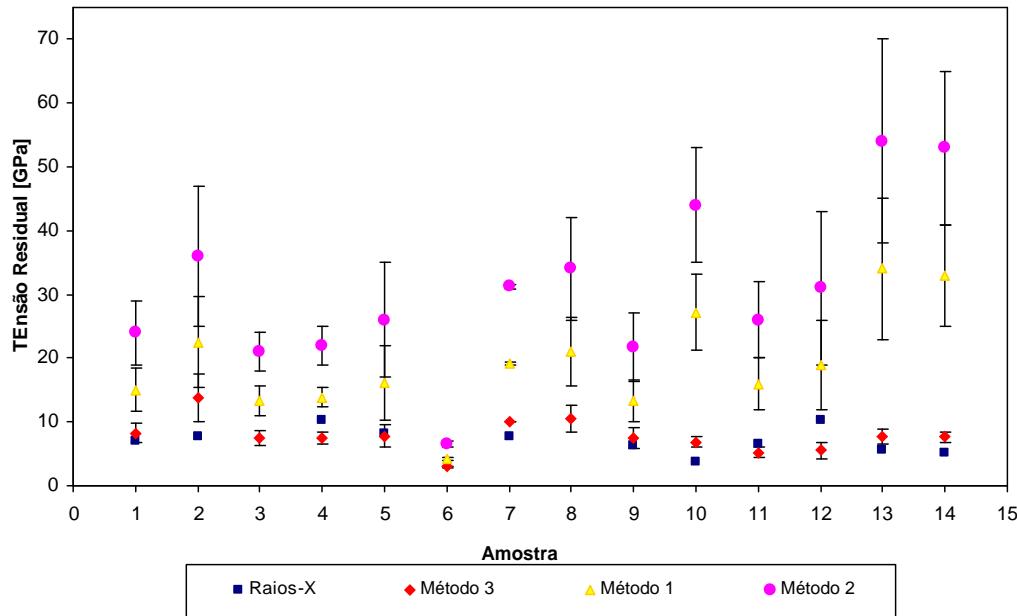


Figura 5.7 – Valores de tensão calculados por difração de raios-X e pelas rotinas indicadas nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4.

A Figura 5.7 indica que o método cujos valores de tensão residual calculados mais se aproximam dos valores calculados por difração de raios-X é o III, ou seja, o método com cálculo da área de contato e propriedades segundo a teoria de Oliver e Pharr [8], seguido pelo método I, e o que mais se distanciou do cálculo por difração de raios-X foi o método II. A média dos módulos das diferenças entre os valores calculados por cada método comparado com os valores calculados por difração de raios-X é 13,7 para o método I; 26,4 para o método II; e para o método III este valor é de 2,5; o que confirma a maior proximidade dos valores do método III com os valores da difração de raios-X. Estes valores são apresentados na Tabela 5.6.

O método II apresentou a menor área de contato ( $Ac$ ) (Figura 5.8) superestimando assim, o módulo de elasticidade e as tensões residuais.

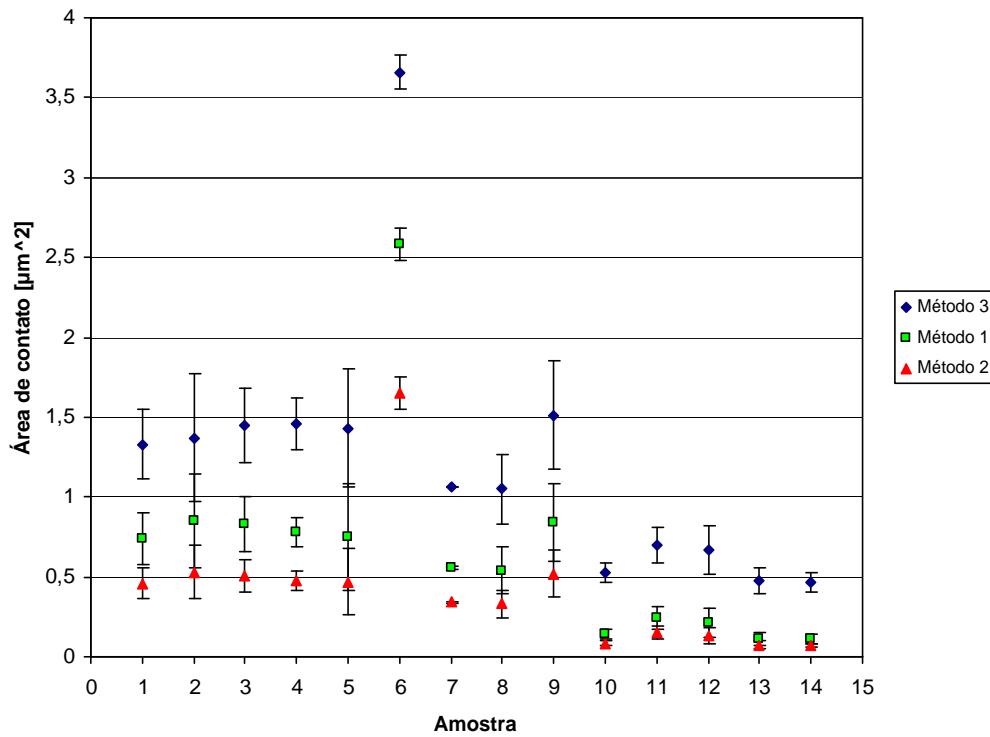


Figura 5.8 – Área de contato ( $Ac$ ) calculada pelas três metodologias. Método I – Suresh, método II – Pintaúde et al [14] e método III – Oliver e Pharr [8].

Tabela 5.6 – Média do módulo das diferenças entre os valores de tensão residual de cada método com relação aos valores calculados por difração de raios-X.

$\sigma_{R-0}$ Raio-X [GPa]	$\sigma^{R-I}$ - Método I [GPa]	$\sigma^{R-II}$ - Método II [GPa]	$\sigma^{R-III}$ - Método III [GPa]
7,08	15	24	8,2
7,79	22,5	36	13,8
10,17	13,9	22	7,4
8,26	16,1	26	7,8
7,76	19,2	31,2	10,07
6,35	13,4	21,7	7,4
3,69	27,2	44	6,8
6,61	16	26	5,2
10,29	19	31	5,5
5,65	34	54	7,7
	$\frac{\sum_{i=1}^n  \sigma_i^{R-I} - \sigma_i^{R-0} }{n} = 13,7$	$\frac{\sum_{i=1}^n  \sigma_i^{R-II} - \sigma_i^{R-0} }{n} = 26,4$	$\frac{\sum_{i=1}^n  \sigma_i^{R-III} - \sigma_i^{R-0} }{n} = 2,5$

## 6. CONCLUSÃO

- ✓ O método de Suresh e Giannakopoulos [8,9] para calcular tensões residuais em filmes finos mostrou-se pouco confiável, uma vez que valores diferentes foram obtidos utilizando-se as mesmas amostras e o mesmo conjunto de medidas. O elevado erro associado às medidas efetuadas em uma mesma amostra se deve, muito provavelmente, à baixa carga de indentação, já que as medidas feitas com cargas maiores apresentaram menor dispersão dos resultados, embora o valor de  $h_{\max}$  tenha ultrapassado o máximo recomendado de 10% a espessura do filme.
- ✓ Dentre os métodos utilizados para se medir as tensões residuais via indentação instrumentada, a modificação proposta neste trabalho, que consiste no cálculo da área de contato e módulo de elasticidade segundo teoria de Oliver e Pharr [8] (método III), mostrou-se o mais coerente com os valores de tensão residual calculados por difração de raios-X. O método que utiliza área de contato calculada pela equação proposta por Pintaúde et al [14] (método II) mostrou-se o menos indicado para este material, uma vez que a área de contato calculada foi subestimada, o que elevou muito os valores de módulo de elasticidade e tensão residual.

## REFERÊNCIAS

- [1] H. Oettel e R. Wiedemann; *Surface and Coatings Technology*, 76-77 (1995) 265-273.
- [2] T.Z. Kattamis, M. Chen, S. Skolianos e B.V. Chambers; *Surface and Coatings Technology*, 70 (1994) 43-48.
- [3] J. Gunnars e A. Alahelisten; *Surface and Coatings Technology*, 80 (1996) 303-312.
- [4] Z. Lin, Z. Wang e X. Sun; *Wear*, 138 (1990) 285-294.
- [5] S. Suresh e A.E. Giannakopoulos; *Acta Materialia*, 46 (1998) 5755-5767.
- [6] A.E. Giannakopoulos e S. Suresh; *Scripta Materialia*, 40 (1999) 1191-1198.
- [7] Benegra, M. Viabilidade do Cálculo das Tensões Residuais Pela Técnica de Indentação Instrumentada em Filmes Finos de Nitreto de Titânio, Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia, 2005.
- [8] W.C. Oliver e G.M. Pharr; *Journal of Materials Research*, 7 (1992) 1564-1583.
- [9] Withers, P. J. and Bhadeshia, H. K. D. H .“Overview- Residual Stress Part 1- Measurement techniques”, *Materials Science and Technology*, 17, 355 (2001)
- [10] Withers, P. J. and Bhadeshia, H. K. D. H. “Overview- Residual Stress Part 2- Nature and origins”, *Materials Science and Technology*, 17, 366 (2001).
- [11] PAULEAU, Y. Generation and evolution of residual estress in physical vapour deposited thin films, *VACUUM*, vol. 61, p. 175-181, 2001.
- [12] CARRASCO, C. A., V. VERGARA S., R. BENAVENTE G., MINGOLO, N., RÍOS J. C. The relationship between residual stress and processes parameters in TiN coatings on copper alloy substrates, *MATER. CHARACTER*, Vol. 48, p.81-8, 2002.
- [13] A.J. Perry, J.A. Sue e P.J. Martin; *Surface and Coatings Technology*, 81 (1994) 17-28.
- [14] PINTAÚDE, G., CUPPARI, M.G. DI V., SCHON, C.G., SINATORA, A., SOUZA, R. M. A review os reverse analysis for mechanical properties extraction using instrumented Vickers indentation, *Zeitschrift für Metallkunde*, v. 2005/11, p. 1252-5, 2005.

[15] Q. Wang, K. Ozaki, H. Ishikawa, S. Nakano, H. Ogiso. Indentation method to measure the residual stress induced by ion implantation, *Beam Interactions with Materials & Atoms*, v. 2005/09, p. 88-92, 2005.

[16] Xi Chen, Jin Yan, Anette M. Karlsson. On the determination of residual stress and mechanical properties by indentation, *Material Science & Engineering*, v. 2005/10, p. 139–149, 2005.

[17] Katsuragi, G. Mapeamento de Tensões Residuais em Ferramentas de Corte Utilizando Método de Indentação, Iniciação Científica, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2003

[18] M. Benegra, D.G. Lamas, M.E. Fernández de Rapp, N. Mingolo, A.O. Kunrath, R.M. Souza; *Thin Solid Films*; 494 (2006) 146-150.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.  
This page will not be added after purchasing Win2PDF.