

# ANÁLISE NUMÉRICA DAS TENSÕES DESENVOLVIDAS EM SISTEMAS REVESTIDOS COM FILMES FINOS SOB AÇÃO DE ESFORÇOS DE TRAÇÃO

**Cristiane Martins Angelo**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Av. Prof. Luciano Gualberto, travessa 3 n° 380 - CEP - 05508-900 - São Paulo - SP

cristiane\_cma@yahoo.com.br

**Resumo.** Existem muitas técnicas para a caracterização das propriedades mecânicas de filmes finos e revestimentos. Entre essas técnicas, a realização de ensaios de tração em sistemas revestidos é capaz de fornecer não somente as propriedades do filme, mas também as da interface entre filme e substrato. Neste trabalho, análises bidimensionais por elementos finitos foram feitas para caracterizar a distribuição de tensões em sistemas revestidos. Tais sistemas foram submetidos a carregamentos trativos e à inclusão de duas, três e quatro trincas perpendiculares à interface filme/substrato. Os materiais usados foram definidos como elástico-linear para o filme e elástico perfeitamente plástico para o substrato. As análises compreenderam a variação da distância entre trincas. Foi estudado também um modelo analítico para o caso de duas trincas, cujos resultados foram comparados aos do modelo numérico. Os resultados, que apresentaram boa correlação com os dados da literatura, demonstraram a existência de um valor de espaçamento entre trincas crítico, a partir do qual não há a formação de novas trincas entre as já existentes.

**Palavras chave:** trinca; filme fino; elementos finitos; comprimento crítico.

## 1. Introdução

A deposição de filmes com espessura da ordem de micrometros é uma prática comumente usada a fim de promover o aperfeiçoamento das propriedades superficiais e, conseqüentemente, do desempenho de materiais sujeitos aos fenômenos tribológicos.

Vários métodos têm sido desenvolvidos para determinar as propriedades mecânicas dos filmes finos, dentre estes, inclui-se o ensaio de tração no sistema filme/substrato, como publicado por Ignat (2001). Nestes casos, quando tensões de tração são aplicadas no corpo-de-prova, trincas primárias propagam-se perpendicularmente à tensão aplicada e à superfície do filme. A presença de tais trincas primárias no filme impede a transmissão direta dos esforços de tração a regiões do filme entre duas trincas paralelas. Entretanto, nessa região o filme permanece sob esforços, uma vez que tensões de cisalhamento transferem tensões do substrato para o filme, gerando pontos de concentração de tensão próximo à ponta da trinca na região da interface filme/substrato. De acordo com Latella et. al. (2007), Harry et. al. (1998), Yanaka et. al. (1998) e Hu e Evans (1989), quanto maior o espaço entre duas trincas, maior é a tensão na superfície do filme. Além disso, a máxima tensão ocorre no ponto médio entre as trincas. O aumento da tensão aplicada resulta em uma maior propagação de trincas e na diminuição gradual da distância entre duas trincas consecutivas, até o ponto em que não há nucleação nem propagação de novas trincas. Esta distância crítica entre trincas consecutivas é chamada de comprimento de saturação. Tal fenômeno ocorre porque a tensão existente na superfície do filme é menor do que o valor crítico ( $\sigma_c$ ) necessário para nuclear novas trincas. A Figura (1) mostra uma distribuição periódica de trincas em um filme, como apresentado por Yanaka et. al. (1998) e a Fig. (2) mostra uma camada trincada onde foi atingida a saturação.

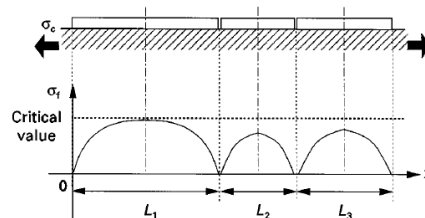


Figura 1. Distribuição de tensões em filme solicitado por esforços de tração. A máxima tensão entre trincas ocorre no ponto médio [Yanaka et. al. (1998)]

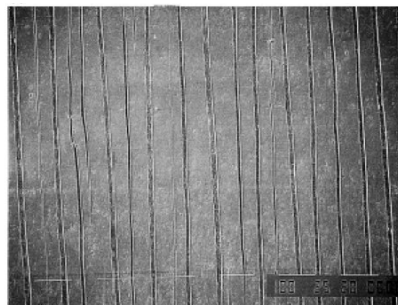


Figura 2. Camada trincada onde foi atingida a saturação [Harry et. al. (1998)]

Hsueh e Yanaka (2003) desenvolveram um modelo analítico para o cálculo da distribuição de tensões trativas entre duas trincas presentes em um filme fino recobrendo um substrato. A geometria estudada por eles está representada na Fig. (3).

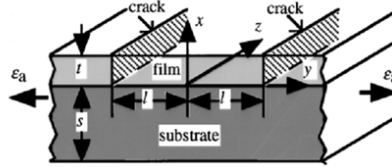


Figura 3. Geometria usada por Hsueh e Yanaka (2003) para o desenvolvimento de seu modelo analítico.

Para tal desenvolvimento, foram consideradas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Não há variação de tensões na direção  $z$ .
- Ignora-se a variação de  $\sigma_y$  com a espessura.
- A variação de  $\sigma_y$  é uma função da coordenada  $y$ , ou seja:  $\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = f(y)$ .
- A tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) varia linearmente com  $x$ , sendo igual a 0 em  $x = t$ .

Dessa forma, a equação para a distribuição média de tensões de tração no filme é:

$$\sigma_f = \frac{E_f}{1 - \nu_f} \cdot \left[ \frac{(1 - \nu_f \nu_s) \varepsilon_a}{1 + \nu_f} - \frac{\Delta \varepsilon}{1 + \frac{t(1 - \nu_f \nu_s) E_f}{s(1 - \nu_f^2) E_s}} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{\cosh(\alpha y)}{\cosh(\alpha l)} \right]$$

**Equação 1**

Onde:

$\sigma_f$  é a tensão trativa no filme;

$E_f$  e  $E_s$  são, respectivamente, os módulos de elasticidade do filme e do substrato;

$\nu_f$  e  $\nu_s$  são, respectivamente, os coeficientes de Poisson do filme e do substrato;

$\varepsilon_a$  é a deformação aplicada ao sistema filme/substrato;

$\Delta \varepsilon$  é a deformação devida às tensões residuais no sistema;

$t$  é a espessura do filme;

$s$  é a espessura do substrato

$l$  é o espaçamento entre trincas e

$$\alpha = \left[ \frac{3}{2st(1 + \nu_s)} \left( \frac{t}{s} + \frac{(1 - \nu_f^2) E_s}{(1 - \nu_f \nu_s) E_f} \right) \right]^{1/2}$$

Neste trabalho, o Método dos Elementos Finitos foi usado para simular sistemas filme/substrato submetidos a tensões de tração, com a presença de duas, três e quatro trincas que sejam no filme e perpendiculares à interface filme/substrato, a fim de estudar o efeito da distância entre trincas no surgimento de novas trincas. Foi feito também um estudo analítico, usando o modelo de Hsueh e Yanaka (2003) para o caso com duas trincas, a fim de comparar a distribuição de tensões de tração entre trincas calculada pelo método analítico com aquela calculada pelo método numérico.

## 2. Descrição do modelo

### 2.1. Geometria

A geometria do modelo 2D com duas trincas estudada neste trabalho está apresentada na Fig. (4). As dimensões principais são a espessura do filme ( $e$ ), a altura total ( $h$ ), o comprimento ( $L$ ) e a distância entre trincas perpendiculares ao carregamento ( $d$ ). A Tabela (1) apresenta os valores utilizados nas análises para esses parâmetros. O comprimento das trincas foi definido como a espessura do filme.

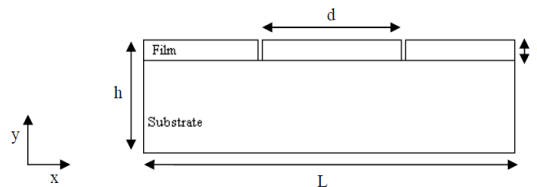


Figura 4. Geometria do modelo 2D com duas trincas

Tabela 1. Valores dos parâmetros utilizados nas análises

Parâmetro/Caso	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>d/e</b>	0,5	1	2	3	4	5	10	20	40
<b>E</b>	0,0046 mm								
<b>H</b>	0,1 mm								
<b>L</b>	0,38 mm								

Para o modelo 2D com três e quatro trincas, as geometrias são apresentadas na Fig. (5).

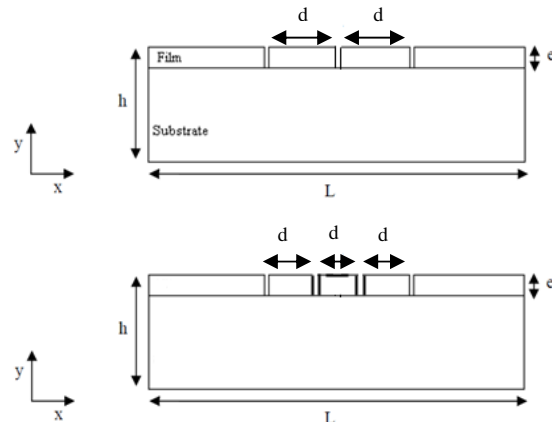


Figura 5. Geometrias dos modelos 2D com três e quatro trincas.

Para estes modelos, foram feitas análises com relações  $d/e$  de 3, 10 e 20 para o caso com três trincas e 3 e 10 para o caso com quatro trincas. Os valores de espessura do filme ( $e$ ), altura total ( $h$ ) e comprimento ( $L$ ) foram mantidos.

## 2.2. Materiais

Os materiais empregados foram baseados em valores da literatura [Souza, (1999)]. As propriedades mecânicas do substrato correspondem à liga de alumínio AA 6061-T6 e as do filme são típicas de materiais cerâmicos aplicados como revestimentos. Essas propriedades estão apresentadas na Tab. (2). O substrato foi considerado elasto-plástico perfeito.

Tabela 2. Propriedades mecânicas dos materiais utilizados

Propriedade	Substrato	Filme
Módulo de Elasticidade ( $E$ ) [GPa]	68,9	280,0
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,3	0,3
Tensão de Escoamento ( $\sigma_y$ ) [MPa]	295,0	-

## 2.3. Modelo das Trincas

As trincas foram modeladas como superfícies livres, de forma a não considerar propriedades de nucleação e propagação das mesmas. Considerou-se como restrição à abertura da trinca que sua ponta (“crack tip”) esteja em um único nó da malha, localizado ao longo da interface filme/substrato.

## 2.4. Simulações

As simulações foram realizadas utilizando o software de elementos finitos ABAQUS®, no qual a geometria estudada foi discretizada, em média, por 400.000 elementos retangulares, dos quais cerca de 70% foram concentrados ao redor das trincas, por se tratar de uma região de concentração de tensões. A Figura (6) mostra, em detalhe, a malha utilizada na região próxima à trinca. Foi utilizado o estado plano de deformações para melhor representar as condições devido ao uso de uma geometria bidimensional.

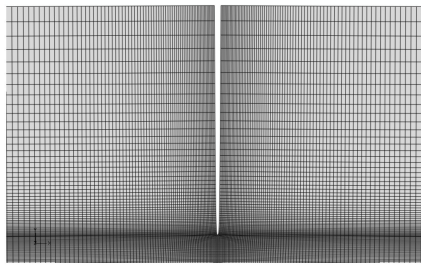


Figura 6. Detalhe da malha na região próxima à trinca

As condições de contorno empregadas foram:

- Deslocamento efetivo de  $1\mu\text{m}$  aplicado nas faces laterais do sistema filme/substrato, a fim de deformá-lo uniaxial e horizontalmente;
- Restrição do movimento vertical e de rotação na base do substrato, para que só haja movimento horizontal.

### 3. Resultados

#### 3.1. Modelo 2D de duas trincas

Na Figura (7) é apresentada a distribuição de tensões horizontais ( $\sigma_{11}$ ) para os casos analisados. De acordo com essa figura, verificou-se que a superfície do filme na região entre trincas apresenta tensões trativas para espaçamentos a partir de valores entre 4 e 5 vezes a espessura do filme. Para valores abaixo, as tensões são compressivas.

Na Figura (8) é apresentada a distribuição dessas tensões na superfície do filme na região entre as trincas. Essa figura possui formato semelhante ao apresentado na Fig. (9) por Harry et. al. (1998) para valores maiores que  $d/e$  igual a 10. Entretanto, deve-se observar que os resultados normalmente apresentados na literatura referem-se às tensões no filme, mas imediatamente acima da interface filme/substrato e não na superfície do filme, como na Fig. (8). Provavelmente, esta diferença de local de análise explica as tensões compressivas nas regiões próximas às superfícies da trinca na Fig. (8), que não são observadas na literatura. Ainda da Fig. (8), notou-se que o máximo valor de compressão alcançado na superfície do filme ocorre para a razão  $d/e$  igual a 2. Abaixo desse valor, a curva da tensão  $\sigma_{11}$  tende a zero devido à proximidade entre as superfícies descarregadas das trincas.

Na Figura (10) são apresentados os valores máximos da tensão  $\sigma_{11}$  em função da razão  $d/e$ , válida apenas para os valores positivos. Nota-se, analisando a Fig. (10) e a Fig. (11), apresentada por Harry (1998), que o formato da curva encontrada neste trabalho é compatível com o presente na literatura.

Pela Figura (10), verificou-se que para valores da razão  $d/e$  acima de 10, a curva das máximas tensões  $\sigma_{11}$  tende assintoticamente a um valor máximo, o que implica na nucleação de novas trincas. Para valores abaixo deste, notou-se que a curva apresenta rápida queda das tensões  $\sigma_{11}$ , de forma que diminui a probabilidade de propagação de novas trincas.

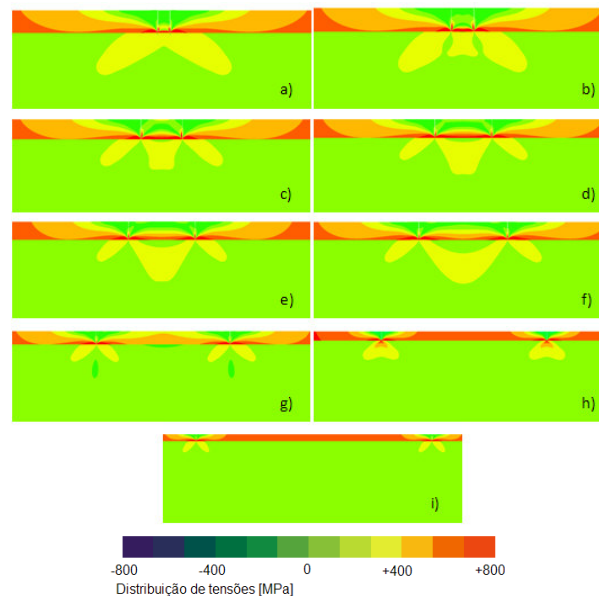


Figura 7. Distribuição de tensões  $\sigma_{11}$  na região entre as trincas para a razão  $d/e$  igual a: (a) 0,5; (b) 1,0; (c) 2,0; (d) 3,0; (e) 4,0; (f) 5,0; (g) 10,0; (h) 20,0; (i) 40,0

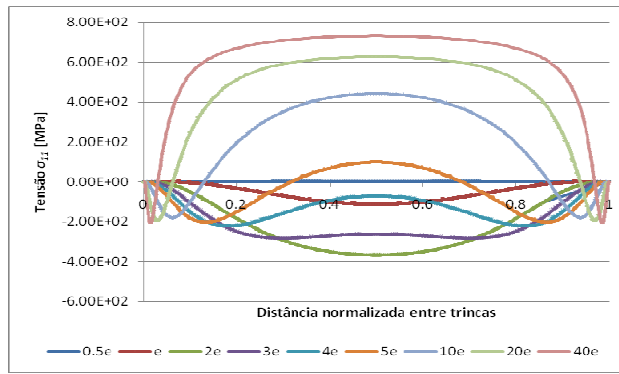


Figura 8. Distribuição das tensões  $\sigma_{11}$  na superfície do filme para a região entre trincas

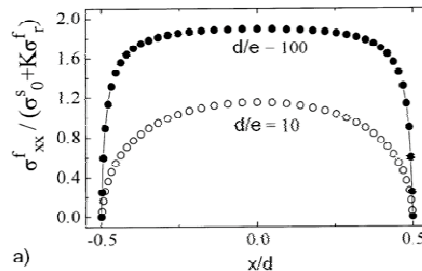


Figura 9. Distribuição das tensões  $\sigma_{11}$  na superfície do filme para a região entre trincas de acordo com Harry (1998).

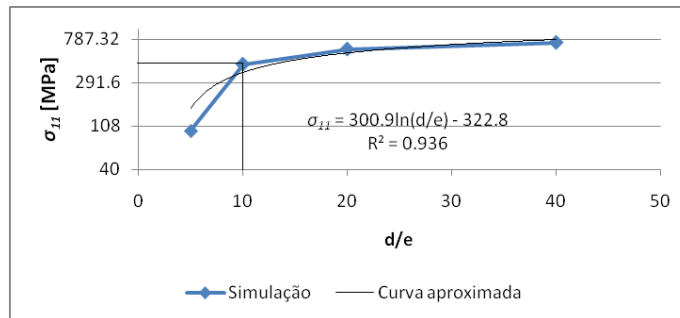


Figura 10. Gráfico dos valores máximos da tensão  $\sigma_{11}$  em função da razão  $d/e$

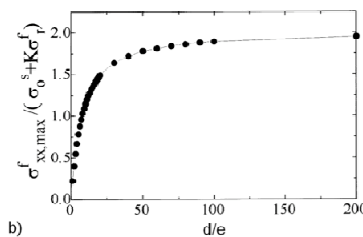


Figura 11. Valores máximos da tensão  $\sigma_{11}$  em função da razão  $d/e$  de acordo com Harry (1998)

### 3.2. Modelo 2D de três trincas

Na Figura (12), é apresentada a distribuição de tensões horizontais ( $\sigma_{11}$ ) para o modelo com três trincas, para os espaçamentos entre trincas de 3, 10 e 20 vezes a espessura do filme. É possível verificar que, para espaçamentos entre trincas de 10 e 20 vezes a espessura do filme, a superfície do filme na região entre trincas apresenta tensões trativas. Já para o espaçamento entre trincas de 3 vezes a espessura do filme, as tensões são compressivas. Esses resultados estão de acordo com os apresentados na Fig. (7).

Ainda da Figura (12), para os casos onde  $d/e$  é igual a 10 e 20, é possível verificar que a distribuição de tensões nas regiões próximas às duas trincas exteriores não é simétrica como a distribuição existente na região próxima à trinca central. Tal fato pode ser melhor observado na Fig. (13), que mostra em detalhe a região da trinca mais à esquerda do caso em que  $d/e$  é igual a 10. Esse fenômeno explica-se pelo fato de a tensão ser maior nas regiões próximas às extremidades do sistema filme/substrato, já que a existência de uma trinca entre as duas exteriores faz o nível de tensão ser menor entre tais trincas.

Na Figura (14) é apresentada a distribuição dessas tensões  $\sigma_{11}$  na superfície do filme na região entre as trincas. Esse gráfico está de acordo com a literatura e também com a tendência demonstrada na Fig. (8) (para o caso de duas trincas), sendo que o valor máximo de tensão encontra-se no ponto médio entre duas trincas consecutivas. Novamente, vale ressaltar que os resultados normalmente apresentados na literatura referem-se às tensões no filme, mas imediatamente acima da interface filme/substrato e não na superfície do filme, como na Fig. (9), o que, por hipótese, explica as tensões compressivas nas regiões próximas às superfícies da trinca (Fig. 14), que não são observadas na literatura. Observando-se a Fig. (14) nota-se que para a razão  $d/e$  igual a 3, as tensões entre trincas sempre são compressivas, não havendo probabilidade do surgimento de novas trincas. Já para as razões  $d/e$  iguais a 10 e 20, as tensões entre trincas são trativas (exceto pela compressão próxima da superfície da trinca, já explicada anteriormente), o que indica a possibilidade de surgimento de novas trincas.

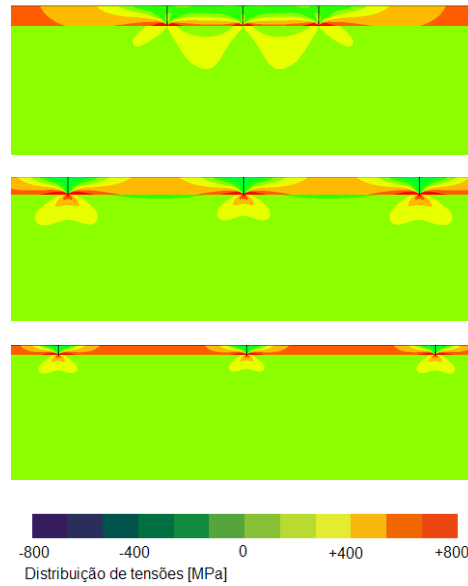


Figura 12. Distribuição de tensões  $\sigma_{11}$  na região entre as trincas para a razão  $d/e$  de 3, 10 e 20, respectivamente

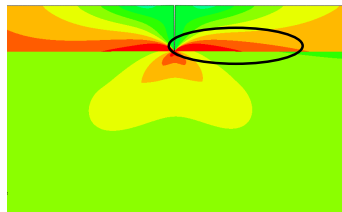


Figura 13. Detalhe da região próxima à trinca mais à esquerda para o caso em que  $d/e$  é igual a 10

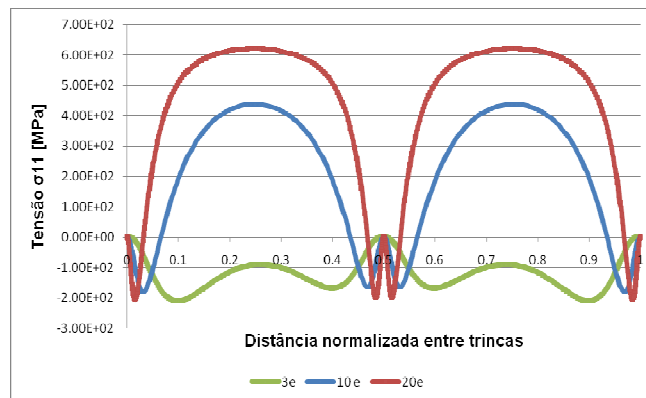


Figura 14. Distribuição das tensões  $\sigma_{11}$  na superfície do filme para a região entre trincas

### 3.3. Modelo 2D de quatro trincas

Neste caso, não foi feita a análise para o caso de espaçamento igual a 20 vezes a espessura do filme, pois, para tal espaçamento, as trincas exteriores ficariam muito próximas das extremidades do sistema filme/substrato, o que geraria efeitos de borda que prejudicariam os resultados.

A Figura (15) apresenta a distribuição de tensões horizontais ( $\sigma_{11}$ ) para o modelo com quatro trincas, para os espaçamentos entre trincas de 3 e 10 vezes a espessura do filme. Assim como nos modelos de duas e três trincas, para o espaçamento entre trincas de 10 vezes a espessura do filme a superfície do filme na região entre trincas apresenta tensões trativas, enquanto que o espaçamento entre trincas de 3 vezes a espessura do filme, as tensões são compressivas.

Na Figura (15), também é possível observar que a distribuição de tensões nas regiões próximas às duas trincas exteriores não é simétrica, enquanto a simetria ocorre nas regiões próximas às duas trincas centrais, como ocorria para o modelo de três trincas. Tal assimetria pode ser melhor observada na Fig. (16), que mostra em detalhe a região da trinca mais à esquerda para o caso em que  $d/e$  é igual a 10. Assim como ocorre para o modelo com três trincas, tal fenômeno explica-se pelo fato da tensão ser maior nas regiões próximas às extremidades do sistema filme/substrato, já que a existência de trincas entre as duas exteriores faz o nível de tensão ser menor entre estas últimas.

A Figura (17) apresenta a distribuição da tensão trativa na superfície do filme na região entre as trincas. Esse gráfico está de acordo com a literatura e também com a tendência demonstrada na Fig. (8) (para o caso de duas trincas) e na Fig. (14) (para o caso de três trincas), sendo que o valor máximo de tensão encontra-se no ponto médio entre duas trincas consecutivas. Mais uma vez vale lembrar que os resultados normalmente apresentados na literatura referem-se às tensões no filme, mas imediatamente acima da interface filme/substrato e não na superfície do filme, como na Fig. (15), o que, por hipótese, explica as tensões compressivas nas regiões próximas às superfícies da trinca (Fig. (17)), que não são observadas na literatura.

Pela Figura (17) vê-se que para a razão  $d/e$  igual a 3, as tensões entre trincas sempre são compressivas, não havendo probabilidade do surgimento de novas trincas. Já para a razão  $d/e$  igual a 10, as tensões entre trincas são trativas (exceto pela compressão próxima da superfície da trinca), o que indica a possibilidade de surgimento de novas trincas.

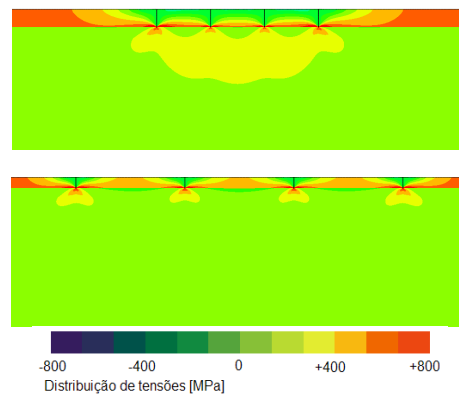


Figura 15: Distribuição de tensões  $\sigma_{11}$  na região entre as trincas para a razão  $d/e$  de 3 e 10, respectivamente.

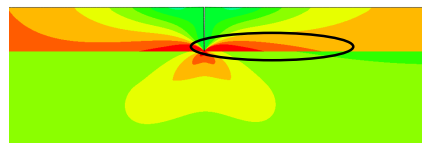


Figura 16: Detalhe da região próxima à trinca mais à esquerda para o caso em que  $d/e$  é igual a 10.

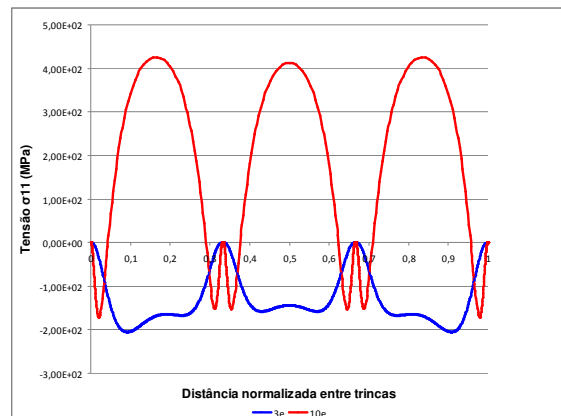


Figura 17: Distribuição das tensões  $\sigma_{11}$  na superfície do filme para a região entre trincas.

### 3.4. Tensão de cisalhamento na interface filme/substrato

A distribuição da tensão de cisalhamento na interface filme/substrato na região entre duas trincas adjacentes é mostrada nas Fig. (18), (19) e (20) para os casos com duas trincas e  $d/e$  igual a 20, três trincas e  $d/e$  igual a 20 e quatro trincas e  $d/e$  igual a 10, respectivamente. Os pontos onde  $x$  é igual a zero e  $x$  é igual ao espaçamento entre trincas são pontos de singularidade, por isso não foram consideradas as regiões ao seu redor para a plotagem dos gráficos. Pelas Figuras, vê-se que a tensão de cisalhamento tende a seu valor máximo em  $x$  igual a zero e tende a seu valor mínimo para  $x$  igual ao espaçamento entre trincas, sendo que tal tração é nula no ponto médio entre as duas trincas. Tal comportamento é compatível com a distribuição de tensões trativas, mostrada nos itens 3.1, 3.2 e 3.3, já que estas se relacionam pela equação de equilíbrio dada abaixo:

$$\sigma(x) = \frac{1}{d} \int_0^x \tau dx'$$

Tais resultados são compatíveis ao apresentado por Yanaka et al, como mostrado na Fig. (21).

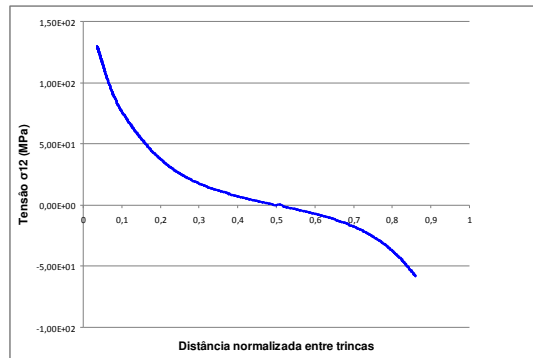


Figura 18: Distribuição das tensões  $\sigma_{12}$  na interface entre filme e substrato na região entre trincas para o modelo de duas trincas no caso em que  $d/e$  é igual a 20.

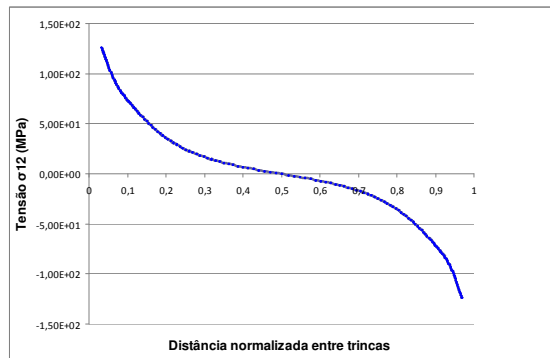


Figura 19: Distribuição das tensões  $\sigma_{12}$  na interface entre filme e substrato na região entre as duas trincas da esquerda para o modelo de três trincas no caso em que  $d/e$  é igual a 20.

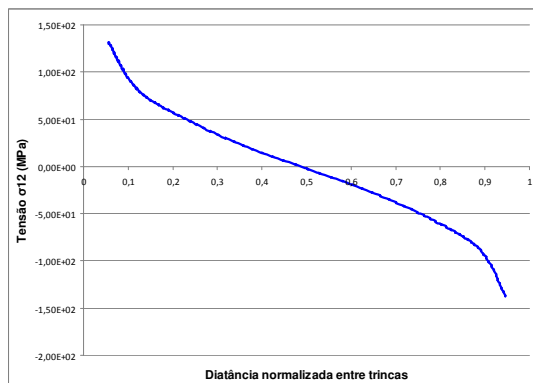


Figura 20: Distribuição das tensões  $\sigma_{12}$  na interface entre filme e substrato na região entre as duas trincas da esquerda para o modelo de quatro trincas no caso em que  $d/e$  é igual a 10.



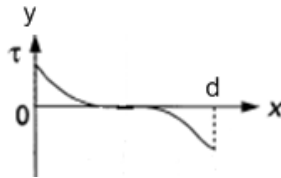


Figura 21: Distribuição da tensão de cisalhamento na interface entre filme e substrato na região entre duas trincas consecutivas de acordo com Yanaka et al.

### 3.4. Resultados do modelo analítico

Os dados usados para o cálculo da tensão trativa entre trincas pelo modelo de Hsueh são apresentados na Tab. (3).

Tabela 3: Dados de entrada do modelo analítico

Módulo de elasticidade do filme	$E_f$	280000 MPa
Módulo de elasticidade do substrato	$E_s$	68900 Mpa
Coefficiente do Poisson do filme	$\nu_f$	0,3
Coefficiente do Poisson do substrato	$\nu_s$	0,3
Deformação aplicada	$\varepsilon_a$	0,00263
Espessura do substrato	$s$	0,0954 mm
Espessura do filme	$t$	0,0046 mm
Metade da distância entre trincas 1	$l_1$	0,01725 mm
Metade da distância entre trincas 2	$l_2$	0,0345 mm
Metade da distância entre trincas 3	$l_3$	0,069 mm

Foi considerado sistema filme/substrato de duas trincas com espaçamentos entre trincas de 7,5, 15 e 30 vezes o espaçamento entre trincas. Os resultados obtidos pelo modelo analítico são mostrados na Fig. (22) a seguir.

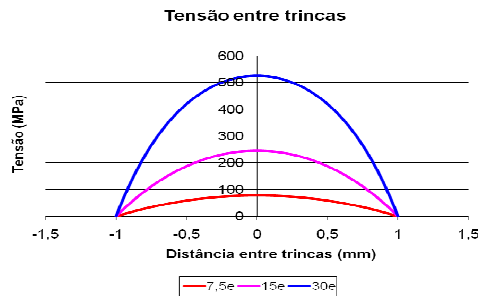


Figura 22: Distribuição de tensões trativas entre duas trincas de acordo com o modelo analítico de Hsueh.

Para os mesmos espaçamentos entre trincas, o modelo numérico apresentou os resultados mostrados na Fig. (23).

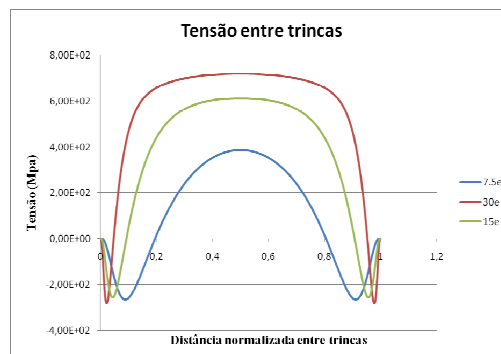


Figura 23: Tensão trativa entre trincas resultante do modelo numérico.

Pela observação das Fig. (22) e (23), pode-se concluir que ambas as curvas apresentam o mesmo comportamento. Porém, para o modelo analítico, os resultados encontrados para os espaçamentos entre trincas de 15 e 30 vezes a espessura do filme não atingem um patamar como no modelo numérico. Além disso, os valores máximos de tensão são menores para o caso do modelo analítico para todos os espaçamentos considerados. Também não se observa no modelo analítico uma região de compressão próxima as trincas, como observado no modelo numérico.

Tais fatos podem ser explicados pelo fato de, no modelo numérico, a tensão de tração se refere à região da superfície do filme, enquanto no modelo analítico, a tensão de tração se refere à região da interface filme/substrato, sendo considerada uniforme em todo o filme. Além disso, o modelo analítico considera o comportamento da tensão entre trincas como uma função do cosseno hiperbólico, não sendo prevista a região de compressão existente no modelo numérico.

#### 4. Conclusões

Os resultados obtidos se mostraram compatíveis aos apresentados na literatura em relação à distribuição das tensões de cisalhamento e de tração, que são relacionadas pela condição de equilíbrio na região entre trincas.

Tal fato indica a existência de uma razão  $d/e$  a partir da qual não ocorrem novas trincas, o que se deve ao fato de a tensão crítica para tal ocorrência não ser atingida, como demonstrado em trabalhos da literatura. Conclui-se também que, a partir de uma certa razão  $d/e$ , a tensão entre trincas limita-se a um certo valor. Tal valor é a tensão crítica.

O valor máximo de tensão trativa foi muito semelhante nos casos analisados (duas, três e quatro trincas para os espaçamentos considerados). As diferenças ficaram por conta da assimetria observada nos casos com três e quatro trincas.

Viu-se também que há boa correlação entre as curvas de tensão de cisalhamento encontradas na literatura e as obtidas numericamente neste trabalho.

Por último, constatou-se que a curva numérica e a analítica da tensão trativa entre trincas são semelhantes, apresentando diferenças atribuídas às hipóteses adotadas no modelo analítico, como a diferença no local de análise da tensão de cisalhamento.

#### 5. Referências

- Harry, E., Rouzaud, A., Ignat, M., Juliet, P. (1998) Mechanical properties of W and W(C) thin films: Young's modulus, fracture toughness and adhesion. *Thin Solid Films*, 195-201.
- Hsueh, C. H., Yanaka (2003), M., *Journal of Materials Science* 38, 1809-1817.
- Hu, M.S., Evans, A.G. (1989) The cracking and decohesion of thin films on ductile substrates. *Acta Metall*, 37, 917-925.
- Ignat, M. (2001), *Chemical Vapor Deposition, Chapter 3 (Stresses and Mechanical Stability of CVD Thin Films)*, ASM International, Vol. 2, 45-80.
- Latella, B.A., Triani, G., Zhang, Z., Short, K.T., Bartlett, J.R., Ignat, M. (2007) Enhanced adhesion of atomic layer deposited titania on polycarbonate substrates. *Thin Solid Films*, 3138-3145.
- Souza, R.M. (1999) Finite element modeling of contact stresses during indentation of wear resistant coatings on soft substrates. Tese de doutorado, Escola de Minas do Colorado, EUA.
- Yanaka, M., Tsukahara, Y., Nakaso, N., Takeda, N. (1998) Cracking phenomena of brittle films in nanostructure composites analysed by a modified shear lag model with residual strain. *Journal of Materials Science*, 33, 2111-2119.

#### 6. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste artigo.

### NUMERICAL ANALYSES ON THE STRESS DISTRIBUTION IN COATED SYSTEMS WITH PERPENDICULAR CRACKS UNDER TENSILE LOADS

#### Cristiane Martins Angelo

Polytechnic School of the University of Sao Paulo

Av. Prof. Luciano Gualberto, travessa 3 n° 380 - CEP - 05508-900 - São Paulo - SP

cristiane\_cma@yahoo.com.br

**Abstract.** *Many techniques exist to characterize the mechanical properties of thin films and coatings. Among these techniques, the conduction of tensile tests on coated specimens is able to provide not only the properties of the film, but also of the film/substrate interface. In this work, a two-dimensional Finite Element Modeling (FEM) analysis was conducted to analyze the stress distribution in coated systems under tensile load, with the presence of two, three and four cracks perpendicular to the film/substrate interface. The system was composed of an elastic thin film and of an elastic-plastic substrate and the analysis simulated systems varying the distance between the two cracks along the entire film thickness. An analytical model was also studied for the case with two cracks, and the results were compared with those of the numerical model. Results were analyzed in terms of the distribution of the normal stresses parallel to the loading direction, which confirmed the models available in the literature, including the identification of the sites prone for the occurrence of further film fracture.*

**Keywords:** *crack; thin film; finite element modeling; critical length.*