

**THIAGO PACHLER**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO  
CONJUNTO FILME CERÂMICO-SUBSTRATO  
METÁLICO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS  
FINITOS**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Engenheiro

Orientador:  
Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin

**São Paulo  
2006**

**THIAGO PACHLER**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO  
CONJUNTO FILME CERÂMICO-SUBSTRATO  
METÁLICO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS  
FINITOS**

Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de engenheiro

Orientador:  
Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin

**São Paulo  
2006**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. André Paulo Tschiptschin, pela valiosa orientação.

Ao Prof. Dr. Roberto Martins de Souza, pelos conselhos e opiniões que permitiram direcionar esta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Ronald Lesley Plaut, pelos conselhos que permitiram aprimorar este trabalho.

Ao Ms. André Abel Cândido Recco, pelo auxílio na realização desta pesquisa.

Aos participantes do projeto PRONEX 03/10157-2, cujas valiosas discussões permitiram um bom andamento da pesquisa.

À minha família, pelo apoio que me fornecem em todas as minhas realizações.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela bolsa de iniciação científica que auxiliou o desenvolvimento deste projeto, processo 05/02160-9.

## RESUMO

A busca por uma maior eficiência do comportamento tribológico (atraito, desgaste) de superfícies de ferramentas de corte levou ao desenvolvimento de recobrimentos cerâmicos que são caracterizados por elevada dureza e elevada inércia química, propriedades que conferem baixo coeficiente de atrito, alta resistência ao desgaste e baixa interação química com a peça a ser trabalhada (Tschiptschin, 2004).

Neste trabalho, foram realizadas simulações de ensaios de indentação Rockwell pelo método dos elementos finitos e foram estudadas as intensidades dos picos de tensão formadores de trincas que aparecem nas bordas de indentação de sistemas filme cerâmico - substrato metálico.

As simulações consideraram filme e substrato com comportamento elasto-plástico, sendo que o limite de escoamento do substrato foi variado de 300 MPa a 2000 MPa, verificando a sua influência na intensidade dos picos de tensão. Nessas simulações foram utilizados penetradores Rockwell cônicoc e esférico.

Os resultados foram comparados com micrografias de ensaios de aderência obtidas por Franco Jr. (2003), e pôde-se concluir que as tensões tangenciais (formadoras de trincas radiais) evoluem de forma mais lenta e contínua, mesmo durante o descarregamento da carga aplicada ao indentador. O crescimento do pico dessa tensão durante o descarregamento faz com que essa ela alcance intensidades maiores que as da tensão radial, favorecendo a formação de trincas radiais apenas no descarregamento.

Concluiu-se também que simular filmes considerando que eles possuem propriedades elasto-plásticas, ao invés de somente elásticas, leva a um menor erro na diferença de intensidade entre as tensões radiais e tangenciais.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Modelo da organização dos átomos correspondente a valores baixos (i), médios (ii) e altos (iii) de energia cinética dos átomos (Hultman; Sundgren, 2001).</b>	<b>4</b>
<b>Figura 2 - Efeito da tensão elétrica negativa aplicada ao substrato, no parâmetro de rede de filme TiN depositado por processo PVD (Hultman; Sundgren, 2001).</b>	<b>4</b>
<b>Figura 3 - Efeito da temperatura do substrato sobre o nível de tensões compressivas em filmes depositados por PVD (Hultman; Sundgren, 2001).</b>	<b>4</b>
<b>Figura 4 - Suporte mecânico para o filme TiN conferido por uma camada de nitretação iônica intermediária, entre o filme e o substrato (Franco Jr, 2003)</b>	<b>5</b>
<b>Figura 5 – tensões Hertzianas: a) ao longo da superfície de contato (<math>z=0</math>); b) ao longo do eixo z (<math>r = 0</math>), (Pérez, 2005).</b>	<b>9</b>
<b>Figura 6 – Posição do modelo em relação ao sistema de coordenadas.</b>	<b>10</b>
<b>Figura 7 – análise de tensões em função da carga aplicada para um modelo com 28914 elementos.</b>	<b>11</b>
<b>Figura 8 – análise de tensões em função da carga aplicada para um modelo com 64904 elementos.</b>	<b>11</b>
<b>Figura 9 – malha do modelo.</b>	<b>12</b>
<b>Figura 10 – ampliação da região superficial.</b>	<b>12</b>
<b>Figura 11 – perfis de tensão para a superfície do filme com o substrato 1. Os gráficos de (a) a (d) foram obtidos durante o carregamento do sistema e as cargas que estavam sendo aplicadas eram: (a) 100 N, (b) 400 N, (c) 700 N e (d) 1100N. Já os gráficos (e) e (f) foram obtidos durante o descarregamento e as cargas que ainda eram aplicadas são respectivamente 482 N, 100 N. O gráfico (j) corresponde ao sistema totalmente descarregado.</b>	<b>16</b>
<b>Figura 12 – perfis de tensão para a superfície do filme com o substrato 3. Os gráficos de (a) a (d) foram obtidos durante o carregamento do sistema e as cargas que estavam sendo aplicadas eram: (a) 100 N, (b) 400 N, (c) 700 N e (d) 1100N. Já os gráficos (e) e (f) foram obtidos durante o descarregamento e as cargas que ainda eram aplicadas são respectivamente 482 N, 100 N. O gráfico (j) corresponde ao sistema totalmente descarregado.</b>	<b>18</b>
<b>Figura 15 – máximos de <math>\sigma_r</math> e <math>\sigma_\theta</math> durante o carregamento para o substrato 1.</b>	<b>20</b>
<b>Figura 16 – máximos de <math>\sigma_r</math> e <math>\sigma_\theta</math> durante o carregamento para o substrato 2.</b>	<b>20</b>
<b>Figura 17 – máximos de <math>\sigma_r</math> e <math>\sigma_\theta</math> durante o carregamento para o substrato 3.</b>	<b>20</b>
<b>Figura 18 – máximos de <math>\sigma_r</math> e <math>\sigma_\theta</math> durante o carregamento para o substrato 3 (simulação 7).</b>	<b>20</b>
<b>Figura 19 – máximos de <math>\sigma_r</math> e <math>\sigma_\theta</math> durante o descarregamento para o substrato 1.</b>	<b>20</b>
<b>Figura 20 – máximos de <math>\sigma_r</math> e <math>\sigma_\theta</math> durante o descarregamento para o substrato 2.</b>	<b>20</b>
<b>Figura 21 – máximos de <math>\sigma_r</math> e <math>\sigma_\theta</math> durante o descarregamento para o substrato 3.</b>	<b>20</b>
<b>Figura 22 – máximos de <math>\sigma_r</math> e <math>\sigma_\theta</math> durante o descarregamento para o substrato 3 (simulação 7).</b>	<b>20</b>
<b>Figura 23 – máximos de <math>\sigma_r</math> e <math>\sigma_\theta</math> durante o carregamento para todos os substratos.</b>	<b>21</b>
<b>Figura 24 – tensão circumferencial para carga de 1100 N, substrato 2.</b>	<b>22</b>
<b>Figura 25 – deslocamento radial para carga de 1100 N, substrato 2.</b>	<b>22</b>
<b>Figura 26 – perfis de tensão e deslocamento para a superfície do filme com o substrato 1. Os gráficos de (a) a (d) foram obtidos durante o carregamento do sistema e as cargas que estavam sendo aplicadas eram: (a) 100 N, (b) 400 N, (c) 700 N e (d) 1100N. Já o gráfico (e) corresponde ao sistema totalmente descarregado.</b>	<b>23</b>
<b>Figura 27 – perfis de tensão e deslocamento para a superfície do filme com o substrato 3. Os gráficos de (a) a (d) foram obtidos durante o carregamento do sistema e as cargas que estavam sendo aplicadas eram: (a) 100 N, (b) 400 N, (c) 700 N e (d) 1100N. Já o gráfico (e) corresponde ao sistema totalmente descarregado.</b>	<b>24</b>
<b>Figura 28 – perfis de tensão e deslocamento para a superfície do filme com o substrato 3. O gráfico (a) foi obtido no carregamento do sistema (simulação 7) e a cargas que estava sendo aplicada era: (a) 200 N. Os gráficos (b) a (d) são do sistema descarregando e as cargas aplicadas são: (b) 148 N (c) 100 N e (d) 51 N. Já o gráfico (e) corresponde ao sistema totalmente descarregado.</b>	<b>25</b>
<b>Figura 29 – máximos de levantamento da superfície do filme (por pile-ups) e deslocamento radial durante o carregamento. (a) substrato 1, (b) substrato 2 e (c) substrato 3.</b>	<b>26</b>
<b>Figura 30 – máximos de deslocamento radial durante o descarregamento.</b>	<b>26</b>
<b>Figura 31 – máximos de deslocamento radial durante o carregamento.</b>	<b>27</b>
<b>Figura 32.a - perfis do filme (no fim do contato indentador-amostra) para diferentes estágios do descarregamento (substrato 3).</b>	<b>28</b>
	<b>28</b>

<b>Figura 32.b - perfis do filme (no fim do contato indentador-amostra)</b>	<b>28</b>
<b>para o sistema carregado e descarregado (substrato 1).</b>	<b>28</b>
<b>Figura 33 – camada elástica (pelo critério de Mises) para os substratos 1, 2 e 3 (respectivamente da direita para a esquerda) mostrada pela zona colorida das imagens. As três imagens foram obtidas com os sistemas carregados com 1100 N (carga máxima). As zonas em vermelho possuem cargas entre 0 MPa e 17 MPa, ou seja deformação desprezível.</b>	<b>29</b>
<b>Figura 35 – máximos de <math>\sigma_r</math> e <math>\sigma_\theta</math> durante o carregamento para o substrato 1.</b>	<b>30</b>
<b>Figura 37 – máximos de <math>\sigma_r</math> e <math>\sigma_\theta</math> durante o carregamento para o substrato 2.</b>	<b>30</b>
<b>Figura 39 – máximos de <math>\sigma_r</math> e <math>\sigma_\theta</math> durante o carregamento para o substrato 3.</b>	<b>30</b>
<b>Figura 36 – máximos de <math>\sigma_r</math> e <math>\sigma_\theta</math> durante o descarregamento para o substrato 1.</b>	<b>30</b>
<b>Figura 38 – máximos de <math>\sigma_r</math> e <math>\sigma_\theta</math> durante o descarregamento para o substrato 2.</b>	<b>30</b>
<b>Figura 40 – máximos de <math>\sigma_r</math> e <math>\sigma_\theta</math> durante o descarregamento para o substrato 3.</b>	<b>30</b>
<b>Figura 42 – máximos de levantamento da superfície do filme (por pile-ups) e deslocamento radial durante o carregamento. (a) substrato 1, (b) substrato 2 e (c) substrato 3.</b>	<b>31</b>
<b>Figura 43 – máximos de deslocamento radial durante o carregamento.</b>	<b>32</b>
<b>Figura 44 – máximos de deslocamento radial durante o descarregamento</b>	<b>32</b>
<b>Figura 45 – Regiões sofrendo deformação plástica, segundo o critério de Mises, na simulação com o substrato 2.</b>	<b>32</b>
<b>Figura 46 – Regiões sofrendo deformação plástica, segundo o critério de Mises, na simulação com o substrato 2, com carga máxima.</b>	<b>33</b>
<b>Figura 47 – Análise de PEEQ na simulação com o substrato 2.</b>	<b>33</b>
<b>Figura 48 – Análise de PEEQ na simulação com o substrato 2, com carga máxima.</b>	<b>34</b>
<b>Figura 49 – Escala de adesão em ensaio Daimler-Benz (Heinke et al., 1995).</b>	<b>35</b>
<b>Figura 50 – Ensaio Daimler- Benz em Aço H13 recoberto por TiN. As setas vermelhas e amarelas indicam trincas radiais e as pretas indicam lascamentos do filme.</b>	<b>37</b>
<b>Figura 51 – Ensaio Daimler- Benz em Aço H13 nitretado por 42 minutos, com 5% de nitrogênio na atmosfera, recoberto por TiN. As setas vermelhas e rosas indicam trincas radiais e as pretas indicam lascamentos do filme.</b>	<b>38</b>
<b>Figura 52 – Ensaio Daimler- Benz em Aço H13 nitretado por 11 horas e recoberto por TiN. As setas vermelhas indicam trincas radiais e as azuis indicam trincas circulares.</b>	<b>40</b>
<b>Figura 53 – Ensaio Daimler- Benz em Aço H13 nitretado por 3 horas, com 10% de nitrogênio na atmosfera, recoberto por TiN. As setas vermelhas indicam trincas radiais e as azuis indicam trincas circulares.</b>	<b>42</b>
<b>Figura 54 – Ensaio Daimler- Benz em Aço H13 nitretado por 6 horas, com 20% de nitrogênio na atmosfera, recoberto por TiN. As setas vermelhas indicam trincas radiais e as pretas indicam lascamentos do filme.</b>	<b>44</b>
<b>Figura 55 – Ensaio Daimler- Benz em Aço D2 recoberto por TiN. As setas vermelhas indicam trincas radiais, as pretas indicam lascamentos do filme e a azul indica uma trinca circular.</b>	<b>46</b>
<b>Figura 56 – Ensaio Daimler- Benz em Aço D2 nitretado por 6 horas, com 20% de nitrogênio na atmosfera, recoberto por TiN. A seta vermelha indica uma trinca radial e a pretas indica um lascamento do filme.</b>	<b>48</b>
<b>Figura 57 – Ensaio Daimler- Benz em Aço D2 nitretado por 3 horas, com 10% de nitrogênio na atmosfera, recoberto por TiN. As setas vermelhas indicam trincas radiais e as pretas indicam lascamentos do filme</b>	<b>49</b>

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1 – Efeito do tamanho da amostra</b>	<b>11</b>
<b>Tabela 2 – Condições de contorno</b>	<b>12</b>
<b>Tabela 3 – Dimensões dos penetradores</b>	<b>13</b>
<b>Tabela 4 – Resumo das simulações</b>	<b>13</b>
<b>Tabela 5 – Propriedades dos materiais</b>	<b>14</b>

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO</b>	<b>2</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>3</b>
3.1 Características de sistemas revestidos	3
3.2 Falha de sistemas revestidos	6
3.3 Método analítico	7
<b>4 ESTUDO DE TENSÕES NO FILME PARA ENSAIOS COM INDENTADOR ROCKWELL</b>	<b>10</b>
4.1 Modelo	10
4.2 Simulações	13
4.3 Resultados e Discussão	15
4.3.1 - Comparação dos perfis de tensão para um mesmo substrato e diferentes cargas aplicadas	16
4.3.1.1 - Substrato 1	16
4.3.1.2 - Substrato 3	18
4.3.2 - Análise dos picos de tensão circunferencial e radial em função da carga	19
4.3.3 - Análise dos deslocamentos radiais e verticais da superfície do filme	22
4.3.3.1 - Análise dos perfis de tensão circunferencial e de deslocamento radial	22
4.3.3.2 - Análise dos máximos de deslocamento radial e circunferencial	25
4.3.3.3 - Análise dos perfis de deslocamento vertical	27
4.3.4 – Comparação com penetrador esférico	30
4.3.4.1 - Análise dos picos de tensão circunferencial e radial em função da carga para penetrador esférico	30
4.3.4.2 - Análise dos máximos de deslocamento radial e circunferencial	31
4.3.5 – Influências da plasticidade do filme nos resultados	32
4.4 - Análise experimental	35
4.5 Comparação com os resultados experimentais de Franco Jr (2003)	35
<b>5 CONCLUSÕES</b>	<b>51</b>
<b>6 BIBLIOGRAFIA</b>	<b>52</b>

## 1 Introdução

---

A busca por uma maior eficiência do comportamento tribológico (atrito, desgaste) de superfícies de ferramentas de corte levou ao desenvolvimento de recobrimentos cerâmicos que são caracterizados por elevada dureza e elevada inércia química, propriedades que conferem baixo coeficiente de atrito, alta resistência ao desgaste e baixa interação química com a peça a ser trabalhada (Tschiptschin, 2004).

O principal problema que surge ao usar esse sistema filme cerâmico-substrato metálico está relacionado com o diferente comportamento mecânico que esses componentes apresentam. Em geral, o substrato metálico possui maior facilidade de se deformar que o recubrimento, isso resulta em um suporte mecânico ineficiente, o que facilita a formação de trincas e descolamentos que inutilizam a ferramenta.

Baseado na importância da formação de trincas e descolamentos do filme, uma maneira de avaliar a eficiência do conjunto é o ensaio Daimler-Benz modificado. Realizado através de ensaios de indentação com penetrador Rockwell C, esse ensaio avalia as trincas e descolamentos que surgem em função da carga de ensaio. A sua simplicidade e baixo custo favorecem o seu uso para avaliação de recobrimentos produzidos industrialmente (Heinke et al, 1995).

Como o campo de tensões desenvolvido durante um ensaio de indentação de um sistema revestido não pode ser determinado analiticamente em toda sua complexidade, em geral usa-se o método dos elementos finitos para analisar a que tensões o filme está submetido. O estudo dessas simulações permite avaliar a causa do surgimento dessas tensões, quando elas surgem durante um ensaio, tornando mais simples a quantificação da influência da variação das propriedades mecânicas de cada componente do conjunto, estudando a influência de cada variável isoladamente.

Trabalhos experimentais (Franco Jr, 2003; Piana et al, 2005) que realizaram testes de aderência em filmes de nitreto de titânio (TiN) sobre diferentes aços mostraram em seus resultados a presença simultânea de trincas radiais e circulares em ensaios com penetrador Rockwell C. A disposição das trincas do trabalho de Franco Jr. (2003) indicou que elas foram formadas em instantes diferentes da análise. Já no trabalho de Piana et al. (2005) os resultados experimentais foram comparados com simulações e não se achou picos de tensão que justificassem as trincas radiais que foram observadas nas amostras.

## 2 Objetivo

---

Este estudo foi realizado para investigar como evoluem os picos de tensão (radial e tangencial) que aparecem nas bordas de indentação em função da carga aplicada ao penetrador, através do método dos elementos finitos, visando determinar o motivo do surgimento desses picos e analisar qual a influência do aumento do limite de escoamento do substrato na intensidade desses picos.

Uma análise complementar foi realizada para verificar a possibilidade de simular os filmes cerâmicos utilizando um modelo elasto-plástico e não somente um modelo elástico como usualmente é feito (Piana et al., 2005; Pérez, 2004; Fukumasu et Souza, 2005; Begley, Evans et Hutchinson, 1998). O motivo da utilização deste modelo elasto-plástico é que em simulações nas quais o filme possui apenas comportamento elástico, as tensões presentes nas bordas de indentação atingem valores muito altos (Piana et al., 2005, chegaram a valores de 70 GPa). A utilização do modelo elasto-plástico constitui uma tentativa de limitar as tensões que o filme apresenta.

### 3 Revisão bibliográfica

---

#### 3.1 Características de sistemas revestidos

A eficiência do conjunto substrato-revestimento é dependente das características do processo de deposição do filme. Dentre as variáveis que possuem significância na resistência do conjunto tem-se: o processo de deposição, a temperatura de deposição, estrutura da cerâmica obtida e topografia da superfície do substrato.

Dentre os processos de deposição usados para aplicar recobrimentos duros existem a deposição física a vapor (PVD) e a deposição química a vapor (CVD).

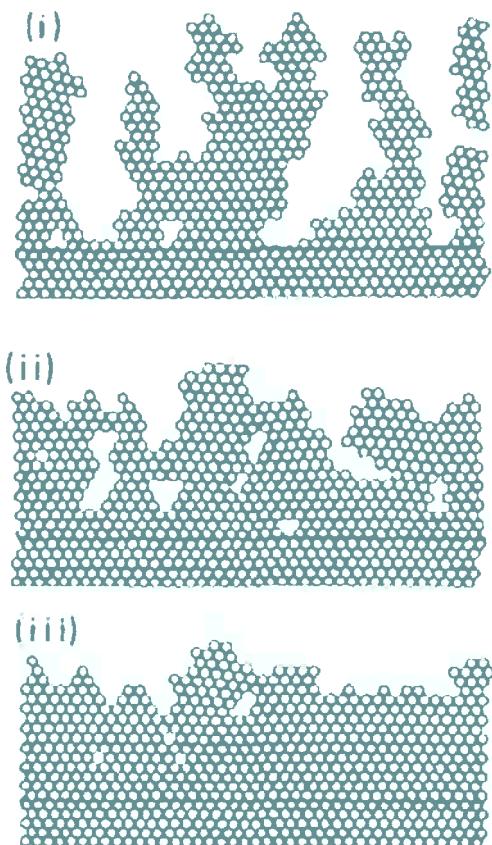
No processo PVD o material utilizado no recobrimento é vaporizado e a peça a ser recoberta é exposta a esse vapor. Em geral, a espessura obtida por meio de processos PVD está entre 3 e 8  $\mu\text{m}$ . Esse processo ocorre em temperaturas relativamente baixas, entre 150 e 550°C, tornando-o ideal para o recobrimento de aços ferramenta com materiais como TiN, TiCN e TiAlN (Tschiptschin, 2004).

A deposição química a vapor ocorre por meio de uma reação química entre gases em uma atmosfera a temperaturas bem mais elevadas (900 a 1000°C), não sendo aplicável aos aços ferramenta (Tschiptschin, 2004). Os processos CVD são usados para depositar não somente TiN e TiCN mas também, óxido de alumínio, cuja função é a de atuar como barreira térmica, podendo atingir espessuras de até 180  $\mu\text{m}$  (Tschiptschin, 2004).

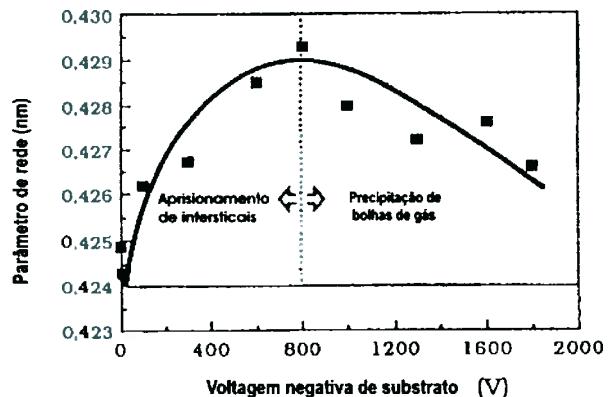
Os tratamentos de superfície provocam tensões residuais nos filmes por razões distintas; o nível e a natureza dessas tensões residuais afetam as tensões resultantes nos componentes e nas áreas reais de contato. No caso de processos a plasma, a tensão residual se desenvolve devido às variações de temperatura e/ou devido às diferenças de módulos de elasticidade do material base e da camada. Os filmes depositados sobre ferramentas apresentam, via de regra, tensões residuais, que podem ser originadas por efeitos térmicos, por epitaxia ou pela incorporação de defeitos durante seu crescimento.

Em razão dos diferentes coeficientes de expansão térmica do filme e do substrato, os efeitos térmicos resultam em tensões de tração no filme, se o coeficiente de expansão térmica do filme for maior que o do substrato, e de compressão no filme, caso o coeficiente de expansão térmica do filme seja menor que o do substrato. Assim, um filme de TiN depositado a 600°C e em seguida resfriado até a temperatura ambiente pode resultar em tensões de compressão de origem térmica, da ordem de 1 GPa (Hultman; Sundgren, 2001). No processo de deposição de átomos durante a formação de filmes, são incorporados

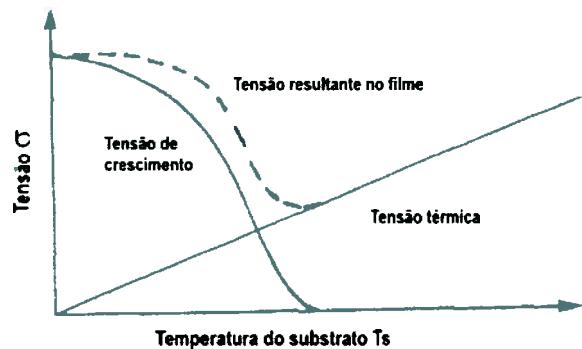
defeitos à estrutura do filme (figura 1), que promovem aumento do parâmetro de rede (figura 2) e geram tensões compressivas de crescimento que podem atingir valores de até 9 GPa (Hultman; Sundgren, 2001). As tensões resultantes no filme correspondem à soma das tensões de crescimento e das tensões térmicas, como mostra a figura 3.



**Figura 1 - Modelo da organização dos átomos correspondente a valores baixos (i), médios (ii) e altos (iii) de energia cinética dos átomos (Hultman; Sundgren, 2001).**



**Figura 2 - Efeito da tensão elétrica negativa aplicada ao substrato, no parâmetro de rede de filme TiN depositado por processo PVD (Hultman; Sundgren, 2001).**



**Figura 3 - Efeito da temperatura do substrato sobre o nível de tensões compressivas em filmes depositados por PVD (Hultman; Sundgren, 2001).**

Elevadas tensões de compressão contribuem para o aumento da dureza e da tenacidade do filme (aumento do trabalho elástico), tendo um efeito importante sobre as propriedades tribológicas do material. Entretanto, tensões compressivas muito elevadas podem promover destacamento do filme, caso a adesão deste ao substrato não seja suficiente.

Os problemas de adesão entre filme e substrato, que são de grande importância do ponto de vista funcional, englobam vários fatores e seu entendimento não é trivial. Em sentido stricto, a aderência é uma propriedade dependente de forças de natureza atômica, de forças mecânicas ou de ambas. Por meio do controle dos processos termoquímicos de

deposição (nitretação iônica, PVD, CVD e PAPVD), é possível condicionar tanto a topografia quanto o nível de tensões residuais das camadas depositadas. Sabe-se que em processos PVD a aderência é melhor quando o substrato e o filme apresentam a mesma estrutura cristalina.

No substrato, o principal gerador de problemas é a sua dureza menor que a do recobrimento, e que não fornece suporte mecânico para o filme fino, facilitando com que o filme trinque ou descole durante uma deformação do conjunto filme - substrato. Uma analogia que torna o problema mais claro é a da colocação de uma placa de vidro sobre um colchão: ao realizarmos forças sobre o filme aparecem trincas que prejudicam seu desempenho. Os caminhos encontrados para solucionar tal inconveniente são baseados no tratamento prévio da superfície do substrato, visando seu endurecimento, em uma região superficial, de forma a se obter uma transição mais suave entre a dureza do filme cerâmico  $H > 2000$  HV e a do substrato com aproximadamente 650 HV. Tais tratamentos, denominados tratamentos duplex ou híbridos, consistem em nitretar ionicamente uma camada superficial do aço de modo a se conseguir durezas superficiais da ordem de 1000 a 1200 HV. Sobre essa camada é então depositada o filme cerâmico, como mostra esquematicamente a figura 4 (Franco Jr, 2003)



**Figura 4 - Suporte mecânico para o filme TiN conferido por uma camada de nitretação iônica intermediária, entre o filme e o substrato (Franco Jr, 2003)**

### 3.2 Falha de sistemas revestidos

Nos ensaios de indentação realizados em sistemas revestidos podem ocorrer falhas coesivas (trincas no próprio filme) e falhas adesivas (descolamentos filme/substrato). Devido à importância do entendimento dessas falhas vários estudos buscaram determinar os mecanismos de falha (Karimi et al, 2002; Souza, Mustoe et Moore, 1999; Bhowmick et al, 2003).

Dentre as principais falhas coesivas encontradas em ensaios com penetradores cônicos e esféricos tem-se as trincas radiais e as trincas circulares que são causadas respectivamente pelas tensões tangenciais e tensões radiais.

As tensões radiais encontradas nas bordas de indentação são causadas pelo dobramento do filme pelo indentador, e possuem intensidades maiores para espessuras de filme maiores. Outro fator que leva ao aumento da tensão é o empilhamento do substrato nas bordas de indentação (que acarreta maior dobramento do filme).

Dependendo do substrato, para ensaios com indentadores Vickers formam-se trincas paralelas às bordas do indentador. No trabalho de Ma, Boyle et Bell (1995) foi determinado que em filmes de nitreto de titânio essas trincas possuem espaçamento constante que tende a aumentar com o aumento de dureza do substrato.

Neste mesmo trabalho foram realizados ensaios de riscamento notou-se a presença de cisalhamentos no filme antecedendo a ruptura dos grãos colunares de TiN. No estudo de Karimi et al. (2002) durante ensaios de indentação com penetrador Berkovich foi detectada a presença de micro-trincas que aliviavam as tensões presentes no filme e postergavam o aparecimento das rupturas no filme. Isso demonstra um relaxamento das tensões por outros mecanismos que não o alívio por trincas grandes em locais que apresentam picos de tensão que as favorecem.

O comportamento da formação de trincas radiais foi descrito para ensaios com penetradores Berkovich e Vickers e há uma tendência dessas trincas se formarem nos vértices desses penetradores. A nucleação destas trincas ocorre em locais diferentes e seu crescimento se dá com diferentes velocidades, dependendo da dutilidade e da resistência mecânica do substrato. O aparecimento de trincas que não seguem uma linha perfeitamente reta (o que indica propagação lenta) é favorecido em situações com substratos e filmes apresentando pequenas diferenças de módulo de elasticidade e uma boa adesão do filme ao substrato (Karimi et al, 2002).

### 3.3 Método analítico

Os modelos analíticos do contato entre dois corpos possuem limitações. Entretanto o seu entendimento é importante porque permite um pré-estudo do comportamento que será obtido nos resultados das análises por MEF (Método de Elementos Finitos). Podem servir também como referencial para a avaliação da qualidade dos resultados obtidos pelo MEF.

Segundo a literatura estudada a primeira análise satisfatória das tensões de contato entre dois corpos foi realizada por Hertz a partir do final de 1880 (Johnson, 1989). O seu estudo consistiu em achar a distribuição de pressões  $p(x,y)$  que atuam em corpos elásticos sob condições específicas.

Uma condição é que os corpos devem ser considerados semi-espaços. Isso acontece quando o contato dos mesmos ocorrer numa área muito menor que suas dimensões gerais (Pérez, 2004). Como consequência tem-se:

- as tensões de contato estarão concentradas em áreas próximas à região de contato;
- as tensões na região de contato não exerçerão efeito significativo fora da região de contato.

Outra condição é que não deve existir atrito entre os corpos, condição essa que na prática dificilmente será alcançada; entretanto essa restrição garante que seja transmitida apenas a pressão normal ao contato.

Os resultados obtidos para as tensões de contato em modelos que utilizam sistemas de coordenadas cilíndricas são:

- Tensões na superfície de contato ( $z=0$ ) e  $r \leq a$ :

$$\frac{\sigma_r}{p_0} = \frac{(1-2\nu)}{3} \left( \frac{a^2}{r^2} \right) \left[ 1 - \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{3/2} \right] - \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_\theta}{p_0} = -\frac{(1-2\nu)}{3} \left( \frac{a^2}{r^2} \right) \left[ 1 - \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{3/2} \right] - 2\nu \left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_z}{p_0} = -\left( 1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

onde  $a$  indica o raio de contato e  $\nu$  o coeficiente de Poisson.

Para  $r > a$ :

$$\frac{\sigma_r}{p_0} = -\frac{\sigma_\theta}{p_0} = (1-2\nu) \frac{a^2}{3r^2} \quad (4)$$

$$\frac{\sigma_z}{p_0} = 0 \quad (5)$$

- Tensões ao longo do eixo de simetria ( $r=0$ ):

$$\frac{\sigma_r}{p_0} = \frac{\sigma_\theta}{p_0} = -(1+\nu) \left[ 1 - \left( \frac{z}{a} \right) \tan^{-1} \left( \frac{a}{z} \right) \right] + \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{z^2}{a^2} \right)^{-1} \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_z}{p_0} = - \left( 1 + \frac{z^2}{a^2} \right)^{-1} \quad (7)$$

Os valores de  $a$  e  $p_0$  podem ser relacionados com os valores do módulo de elasticidade dos materiais, raio do indentador e carga aplicada através das equações (8) e (9). Esses valores normalmente são conhecidos.

$$a = \left( \frac{3PR}{4E^*} \right)^{1/3} \quad (8)$$

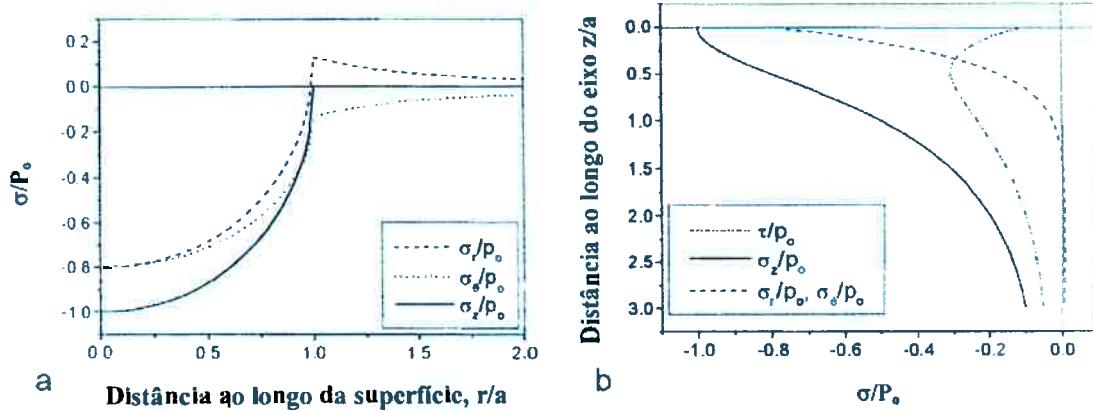
$$p_0 = \frac{3P}{2a^2\pi} \quad (9)$$

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (10)$$

As tensões principais ao longo do eixo z são  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$  e  $\sigma_r$ , e a tensão de cisalhamento principal é dada pela equação (11).

$$\tau = \frac{|\sigma_r - \sigma_z|}{2} \quad (11)$$

O comportamento dessas tensões pode ser visto na figura 5, onde são analisadas as tensões para o contato entre um corpo esférico e um corpo plano.



**Figura 5 – tensões Hertzianas: a) ao longo da superfície de contato ( $z=0$ ); b) ao longo do eixo  $z$  ( $r = 0$ ), (Pérez, 2005).**

Nota-se que a tensão de cisalhamento assume seu valor máximo ( $\tau_{\max}$ ) abaixo da superfície. É possível calcular o seu valor através da equação (12).

$$\tau_{\max} = 0,31 \cdot \left( \frac{6PE^*}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3} \quad (12)$$

Nota-se também que a tensão radial ( $\sigma_r$ ) possui um pico de tração na borda do contato, enquanto a tensão tangencial ( $\sigma_\theta$ ) possui valores compressivos o que se contrapõe com a possibilidade de trincas radiais.

Respeitando as restrições impostas por este modelo, é possível realizar simulações pelo método dos elementos finitos e comparar os resultados obtidos na simulação com os resultados obtidos pelo método analítico. Isso pode ser utilizado como referencial para a avaliação da qualidade dos resultados obtidos pelo MEF.

Como o caso a ser estudado possui variáveis que não são considerados pelos modelos analíticos (a deformação plástica, o recobrimento, o atrito entre indentador e amostra) optou-se por desenvolver um modelo no software ABAQUS/CAE 6.5 para realizar este estudo pelo método dos elementos finitos.

## 4 Estudo de tensões no filme para ensaios com indentador Rockwell

### 4.1 Modelo

A partir da figura abaixo será estabelecida a orientação do modelo em relação aos eixos do sistema de coordenadas.

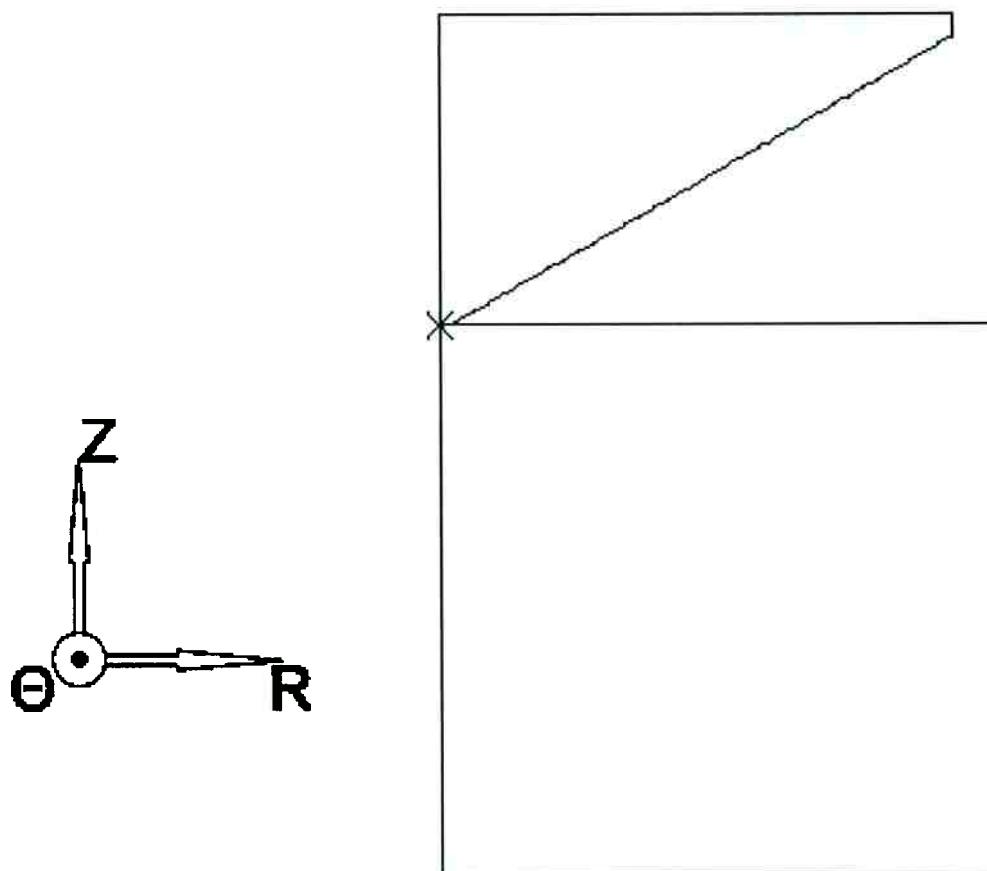


Figura 6 – Posição do modelo em relação ao sistema de coordenadas.

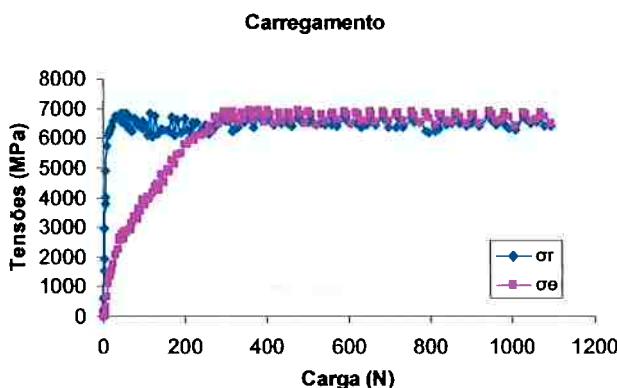
Defini-se: Z – direção vertical;

R – direção radial;

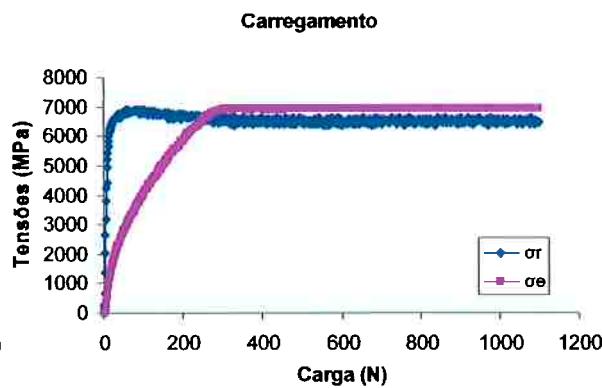
$\Theta$  – direção tangencial.

A primeira consideração feita é que o filme está perfeitamente aderido ao substrato, isso torna desnecessária a definição de propriedades da interface filme-substrato.

O modelo desenvolvido é axissimétrico e o refinamento de sua malha foi realizado até que as tensões obtidas na superfície do filme não apresentassem diferença significativa. A análise em função da carga (que será explicada com mais detalhes adiante) exigiu um número de elementos muito grande no filme. Caso contrário, apareciam oscilações que atrapalhavam a análise dos gráficos; como exemplo seguem as figura 7 (número de elementos menor) e 8 (número de elementos maior) que foram retiradas de simulações semelhantes (materiais, carga aplicada, condições de contorno).



**Figura 7 – análise de tensões em função da carga aplicada para um modelo com 28914 elementos.**



**Figura 8 – análise de tensões em função da carga aplicada para um modelo com 64904 elementos.**

Apesar das tensões não apresentarem grande diferença a oscilação presente na figura 7 impede que o gráfico seja analisado com facilidade.

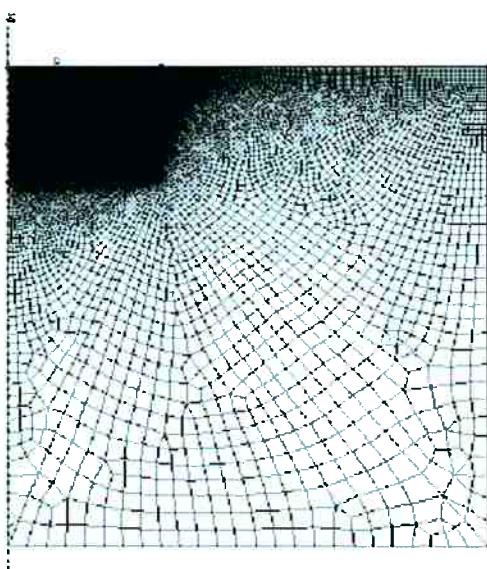
Um meio de compensar esse aumento de elementos foi a diminuição do tamanho da amostra no modelo. Porém, em ensaios de indentação, deve-se tomar cuidado com os efeitos causados pela distância entre a indentação e a borda da amostra. Para garantir a inexistência deste problema realizou-se uma comparação entre um modelo com 2,5 mm x 2,5 mm (raio x altura da amostra) e um modelo com 4,0 mm x 3,0 mm. Para evitar que existam diferenças causadas por mudança no refinamento tomou-se o cuidado de criar uma malha idêntica na região de análise. Os resultados não apresentaram mudanças significativas conforme mostra a tabela 1.

**Tabela 1 – Efeito do tamanho da amostra**

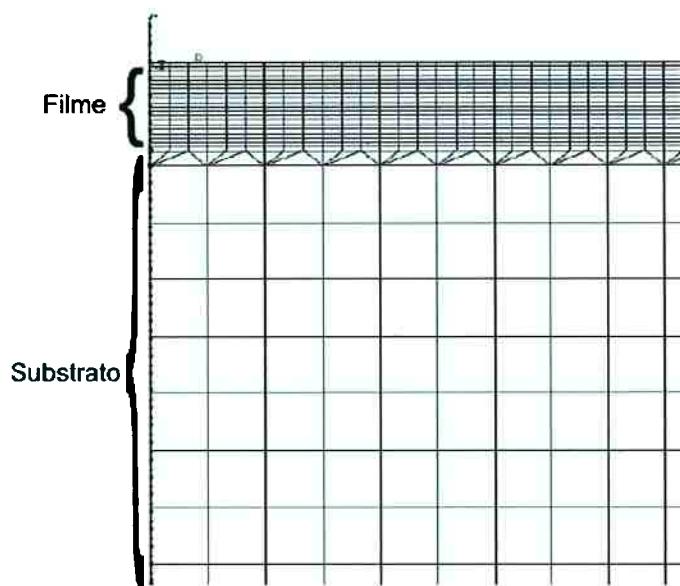
Carga (N)	Tamanho do modelo (mm x mm)	$\sigma_r$ (MPa)	$\sigma_\theta$ (MPa)
1100	2,5 x 2,5	6790	6934
1100	3,0 x 4,0	6773	6934
Descarregado	2,5 x 2,5	6285	6937
Descarregado	3,0 x 4,0	6359	6936

Durante o desenvolvimento do modelo a tensão  $\sigma_z$  apresentou picos com intensidade instável, estes picos se localizam próximos ao fim da região de contato entre indentador e amostra. Mesmo fazendo-se intenso refinamento da malha a leitura dos valores obtidos não era confiável. Essa instabilidade, entretanto, não afetou os valores das outras duas tensões. Além disso a magnitude dos picos de tensão  $\sigma_z$  é baixa comparada com a dos picos das outras duas tensões (focos desse estudo).

No modelo final assumiu-se axissimetria, dimensões de 2,5 mm x 2,5 mm e malha constituída por 64904 elementos com 4 ou 3 nós. Sua malha é mostrada nas figuras abaixo. Na região de contato do penetrador com o par filme/substrato foi feito um refinamento de malha como mostrado na Figura 10.



**Figura 9 – malha do modelo.**



**Figura 10 – ampliação da região superficial.**

A espessura do filme cerâmico era de 5  $\mu\text{m}$ .

As condições de contorno aplicadas foram:

**Tabela 2 – Condições de contorno**

Local de aplicação	Condição de Contorno
base do substrato	engastada
ponta inferior do indentador	só possui liberdade de movimento na direção vertical (z).

Os penetradores foram considerados perfeitamente rígidos, tornando desnecessária a definição de suas propriedades mecânicas. As geometrias desses penetradores estão definidas na tabela 3.

**Tabela 3 – Dimensões dos penetradores**

Penetrador	Dimensões
Cônico	0,2 mm de raio de ponta e 120° de abertura <sup>A</sup>
Esférico	0,8 mm de raio <sup>A,B</sup>

A – Hultman; Sundgren, 2001.

B – Dieter, 1988.

Foi utilizado coeficiente de atrito 0,3 para evitar que existam diferenças nas deformações do sistema devido ao escorregamento do penetrador em relação ao substrato (Begley, Evans et Hutchinson, 1998). Neste trabalho Begley, Evans et Hutchinson, (1998) determinaram este resultado indentadores esféricos, mas como não há estudos similares para penetradores cônicos foi tomado o mesmo coeficiente, mantendo homogeneidade nas simulações.

## 4.2 Simulações

As simulações realizadas possuíram as seguintes características:

**Tabela 4 – Resumo das simulações**

Simulação	Carga <sup>A</sup> (N)	Indentador	Substrato
1	1100	Cônico	1
2	1100	Cônico	2
3	1100	Cônico	3
4	1100	Esférico	1
5	1100	Esférico	2b
6	1100	Esférico	3
7	200	Cônico	3

A – carga máxima aplicada ao nó de referência do penetrador, nestas análises o indentador foi carregado com a carga máxima e depois foi retirada a carga.

Propriedades dos materiais:

**Tabela 5 – propriedades dos materiais**

Material	E (GPa)	LE (MPa)	Módulo Plástico (MPa)
Substrato 1	210	300	1000
Substrato 2	210	800	1000
Substrato 2b	210	793	1000
Substrato 3	210	2000	1000
Filme	440	6000	1000

O módulo plástico assume este valor até 20% de deformação, após essa deformação ele apresenta 0 GPa.

As propriedades dos substratos foram determinadas após uma análise ao Metals Handbook, e foram escolhidos limites de escoamento de forma a abranger os valores possíveis para aços. Não foram utilizadas curvas tensão x deformação de materiais reais, pois isto traria diferentes comportamentos plásticos o que acrescentaria mais uma variável ao estudo. O módulo elástico do substrato foi escolhido por ser um valor intermediário para os módulos elásticos encontrados em aços.

O substrato 2 foi criado para solucionar um problema de convergência encontrado quando se tentava usar o substrato 2b no modelo com penetrador cônico.

O módulo elástico utilizado o filme é um dos módulos elásticos encontrados para o TiN (Hultman; Sundgren, 2001).

### 4.3 Resultados e Discussão

Os primeiros resultados analisados foram os perfis de tensão na superfície do filme para o indentador cônico. Foram comparados os perfis de tensão para um mesmo substrato e diferentes cargas aplicadas – foram comparados, para um mesmo material, os perfis de  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$  em 7 instantes diferentes da análise. Quatro desses instantes durante o carregamento e três durante o descarregamento.

A segunda parte da análise dos resultados é direcionada a conhecer como variam as intensidades dos picos de tensão circumferencial e radial em função da carga aplicada (durante o carregamento e descarregamento). Esses resultados são mostrados no item 4.3.2.

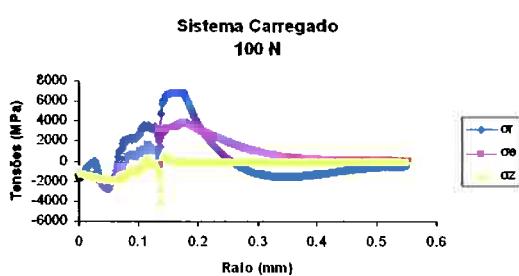
No item 4.3.3, são analisados os deslocamentos radiais e verticais sofridos pelo filme e estes são relacionados com os picos de tensão achados anteriormente.

E por último, são feitas as mesmas análises de 4.3.2 e 4.3.3 para um indentador esférico, permitindo averiguar se há similaridade de comportamento.

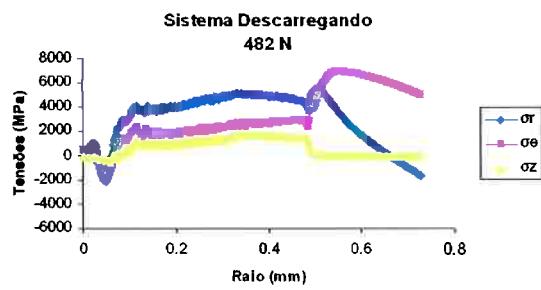
### 4.3.1 - Comparação dos perfis de tensão para um mesmo substrato e diferentes cargas aplicadas

#### 4.3.1.1 - Substrato 1

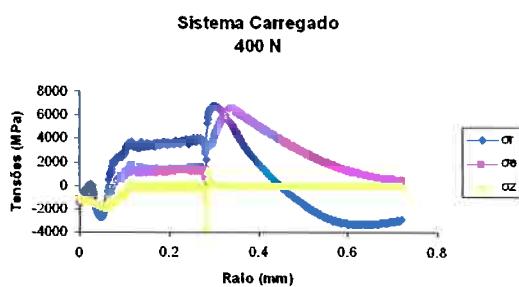
(11.a)



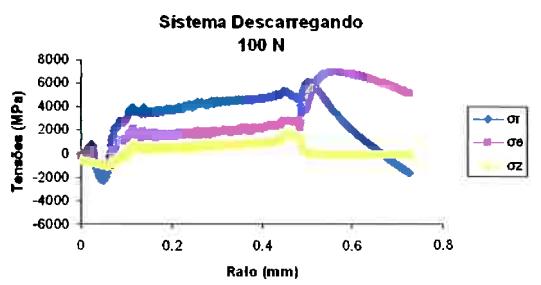
(11.e)



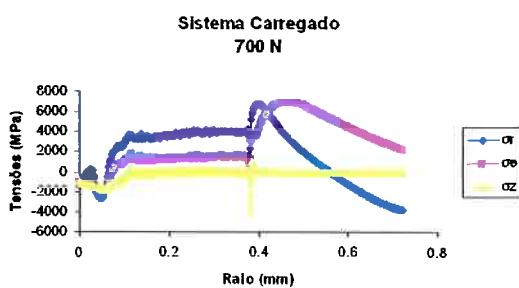
(11.b)



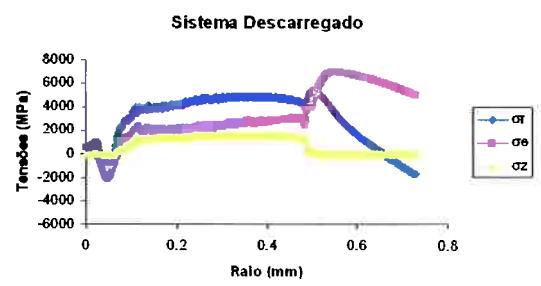
(11.f)



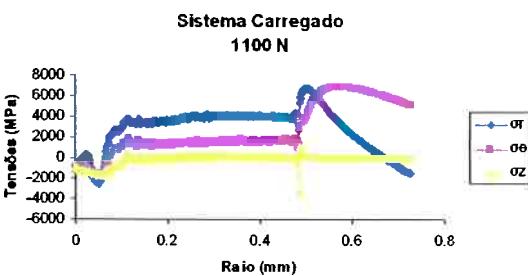
(11.c)



(11.g)



(11.d)



**Figura 11 – perfis de tensão para a superfície do filme com o substrato 1.** Os gráficos de (a) a (d) foram obtidos durante o carregamento do sistema e as cargas que estavam sendo aplicadas eram: (a) 100 N, (b) 400 N, (c) 700 N e (d) 1100N. Já os gráficos (e) e (f) foram obtidos durante o descarregamento e as cargas que ainda eram aplicadas são respectivamente 482 N, 100 N. O gráfico (j) corresponde ao sistema totalmente descarregado.

A primeira informação relevante é que o fim do contato se dá no local onde há um aumento abrupto das tensões radial e tangencial.

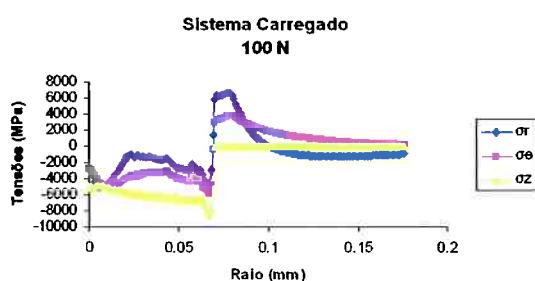
Durante o carregamento as únicas mudanças notáveis são: o deslocamento dos picos de tensão circumferencial para raios maiores que os raios dos picos de tensão radial; o aumento da intensidade do pico de tensão circumferencial. Ambos ocorrem com o aumento da carga.

Durante o descarregamento, com exceção do pico de tensão radial que decresce com a retirada da carga, os perfis se mantém constantes, ou seja, quem dá origem às tensões presentes no modelo é a deformação plástica do substrato. Então pode-se dizer que a deformação elástica é de alguma forma responsável pela redução de intensidade de  $\sigma_r$ . As influências da plasticidade tornam-se fáceis de perceber quando se comparam os gráficos 11.a e 11.f, ambos possuem a mesma carga, porém os picos de tensão estão deslocados e com intensidades diferentes.

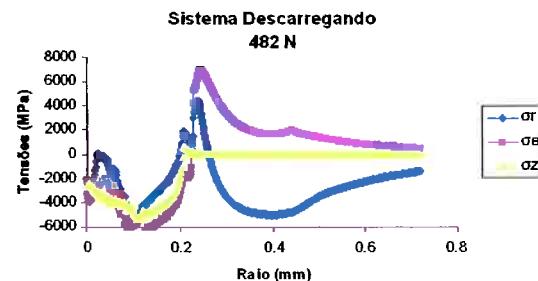
#### 4.3.1.2 - Substrato 3

Foi notada uma alteração em relação à análise anterior: o pico de tensão circunferencial cresceu mais rapidamente; com 400 N de carga ele já possui intensidade igual à tensão radial. A fim de entender melhor essa alteração, foi realizado o estudo que segue.

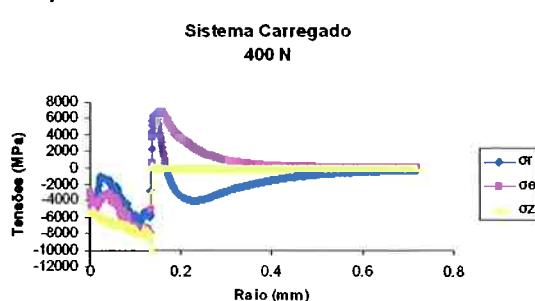
(12.a)



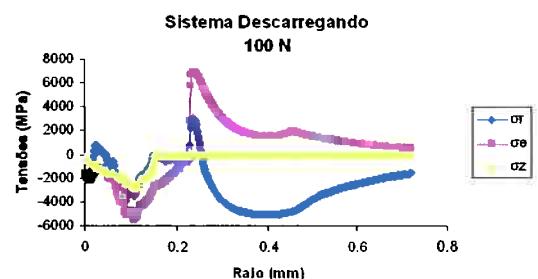
(12.e)



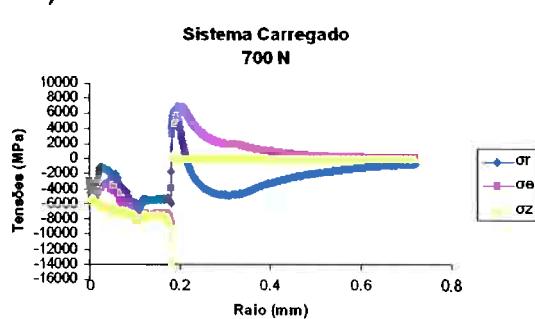
(12.b)



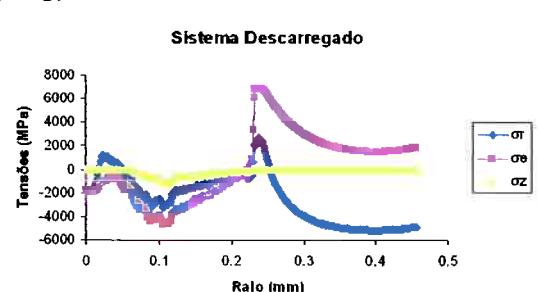
(12.f)



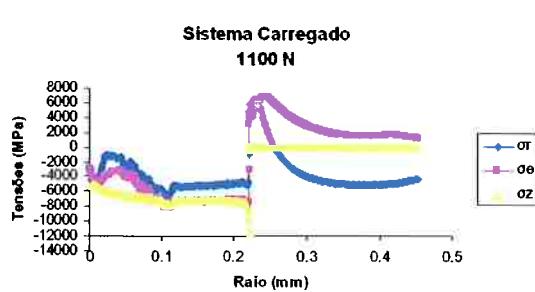
(12.c)



(12.g)



(12.d)



**Figura 12 – perfis de tensão para a superfície do filme com o substrato 3. Os gráficos de (a) a (d) foram obtidos durante o carregamento do sistema e as cargas que estavam sendo aplicadas eram: (a) 100 N, (b) 400 N, (c) 700 N e (d) 1100N. Já os gráficos (e) e (f) foram obtidos durante o descarregamento e as cargas que ainda eram aplicadas são respectivamente 482 N, 100 N. O gráfico (j) corresponde ao sistema totalmente descarregado.**

#### **4.3.2 - Análise dos picos de tensão circumferencial e radial em função da carga**

Dos resultados obtidos nas figuras 15, 16 e 17 o primeiro fator demonstrado é que ambas as tensões crescem com a carga aplicada até um máximo, que é determinado pelas propriedades plásticas atribuídas ao filme (conforme será mostrado adiante).

O próximo fator é que a intensidade de  $\sigma_\theta$  é praticamente igual à de  $\sigma_r$  para substratos com limites de escoamento menores (nesse caso substratos 1 e 2) e é maior que  $\sigma_r$  para o substrato 3 (limite de escoamento maior), porém essa diferença não é significativa.

Outra diferença é que o substrato 1 apresenta uma alteração na continuidade de sua curva de  $\sigma_\theta$  entre 30 N e 50 N de carga, enquanto os outros dois casos apresentam evolução uniforme e mais rápida, o que pode ser melhor analisado na figura 23b. Nota-se também que a evolução de  $\sigma_\theta$  para o substrato 1 acompanhava a do substrato 2 até ocorrer essa mudança de comportamento. Comparando os substratos 1 e 2 até esse ponto pode-se dizer que uma mudança de 400 MPa no limite de escoamento não possui grande influência para essa tensão.

A tensão radial evolui mais rápido para substratos com limites de escoamento menores, o que pode ser visto na figura 23a. E para o substrato 3,  $\sigma_r$  apresenta uma redução notável em seu valor para cargas entre 80 N e 160 N.

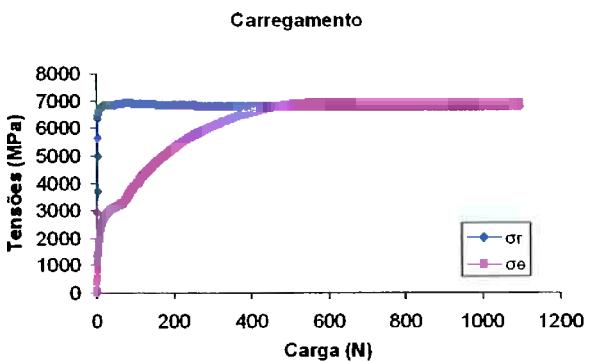


Figura 15 – máximos de  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  durante o carregamento para o substrato 1.

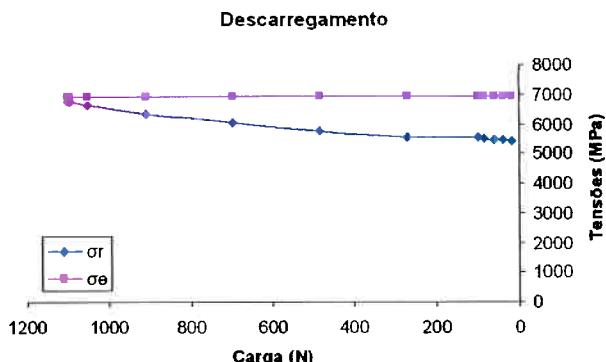


Figura 19 – máximos de  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  durante o descarregamento para o substrato 1.

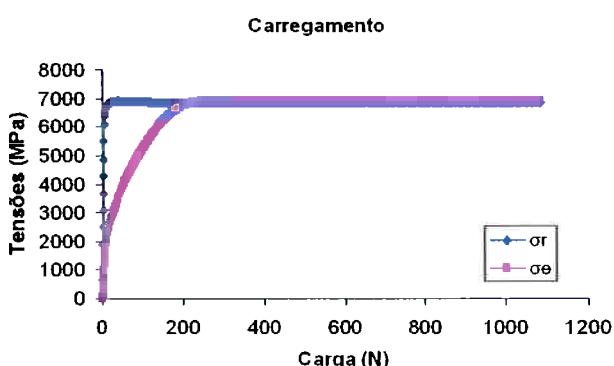


Figura 16 – máximos de  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  durante o carregamento para o substrato 2.

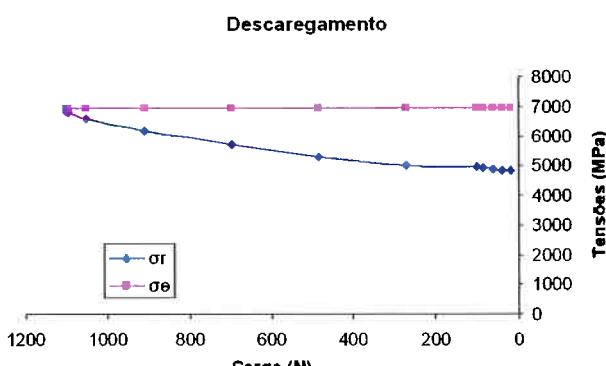


Figura 20 – máximos de  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  durante o descarregamento para o substrato 2.

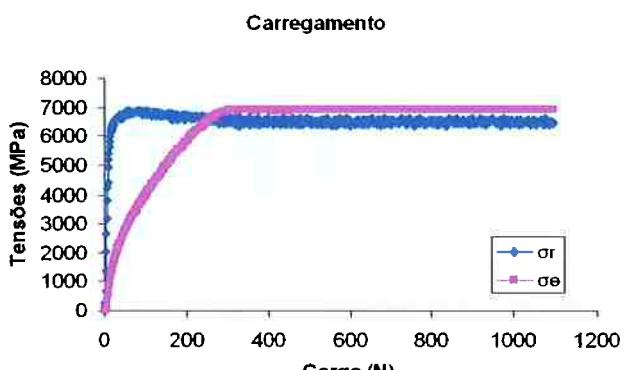


Figura 17 – máximos de  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  durante o carregamento para o substrato 3.

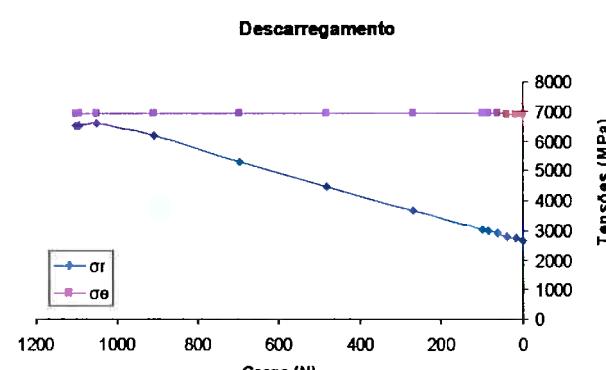


Figura 21 – máximos de  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  durante o descarregamento para o substrato 3.

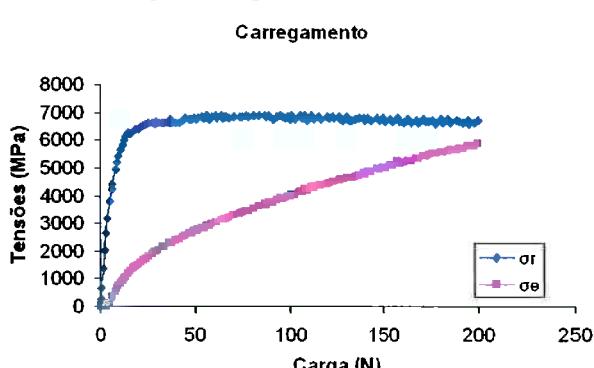


Figura 18 – máximos de  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  durante o carregamento para o substrato 3 (simulação 7).

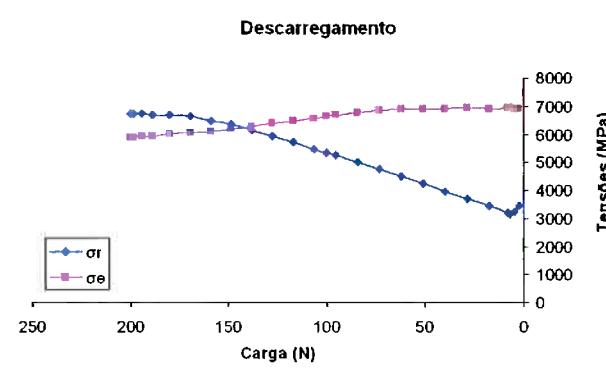
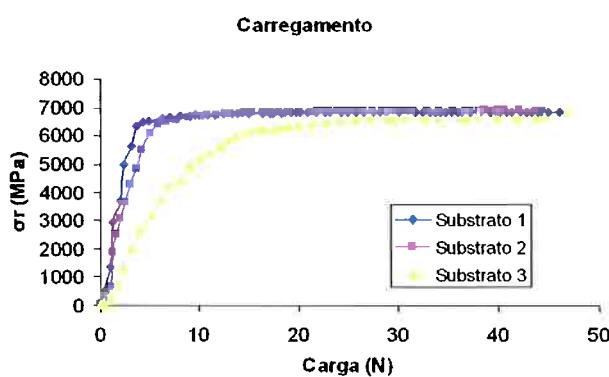


Figura 22 – máximos de  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  durante o descarregamento para o substrato 3 (simulação 7).

Uma observação a ser feita é em relação à grande diferença entre o número de pontos dos gráficos do carregamento e do descarregamento: o carregamento possuiu de 1414 a 865 incrementos (divisões que o programa faz para acrescentar a carga). Esse número varia de acordo com a quantidade de deformação que o modelo sofre e principalmente em relação às interações de contato presentes, pois estas dificultam a convergência dos cálculos) e o descarregamento possui 116 incrementos (a maior parte, cerca de 80, estão presentes no início do descarregamento, e a redução de carga é muito pequena o que sobrepõe os pontos).

(23.a)



(23.b)

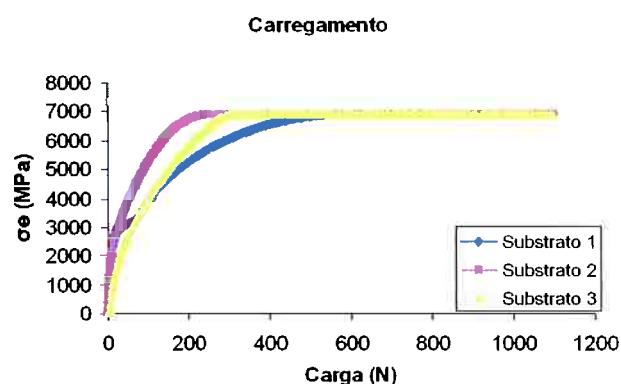


Figura 23 – máximos de  $\sigma_r$  e  $\sigma_a$  durante o carregamento para todos os substratos.

Quanto ao descarregamento (Figuras 19 a 22), é possível observar que há uma queda de intensidade do pico de tensão radial. A intensidade final encontrada para esta tensão no substrato 1 é o dobro da intensidade encontrada no substrato 3, o que mostra que esta tensão sofre uma grande influência do tamanho da camada elástica do substrato.

Como esses materiais possuem mesmo módulo de Young, o que possuir maior limite de escoamento possuirá material em regime elástico com maior deformação, o que permitirá uma maior recuperação elástica, consequentemente permite também uma maior alteração da curvatura do filme no fim da cavidade de indentação (maior influência sobre esta tensão). Isso será mais bem evidenciado na comparação de perfis de deslocamento vertical, que virá adiante.

Na simulação 7 (Figuras 18 e 22) a tensão circumferencial ainda não havia atingido seu máximo durante o carregamento, porém atingiu-o durante o descarregamento. Isso mostra que essa tensão depende de algum fator que possui continuidade comportamental também no descarregamento, ou seja, se esse fator aumenta no carregamento ele também aumentará durante o descarregamento.

### 4.3.3 - Análise dos deslocamentos radiais e verticais da superfície do filme

#### 4.3.3.1 - Análise dos perfis de tensão circunferencial e de deslocamento radial

Para explicar o aumento de  $\sigma_\theta$  foi usada a seguinte hipótese: se demarcarmos uma circunferência no filme, com centro na ponta do indentador, ao realizarmos um ensaio o deslocamento de material causado pela penetração fará com que essa circunferência tenha um aumento de raio que virá acompanhado por tensões circunferenciais de tração.

Uma primeira comparação pode ser feita através das figuras 24 e 25: a mudança do gradiente de cores em ambas as imagens acontecem em inclinações parecidas (para a região superficial, que seria o filme). O que indicaria uma possível relação.

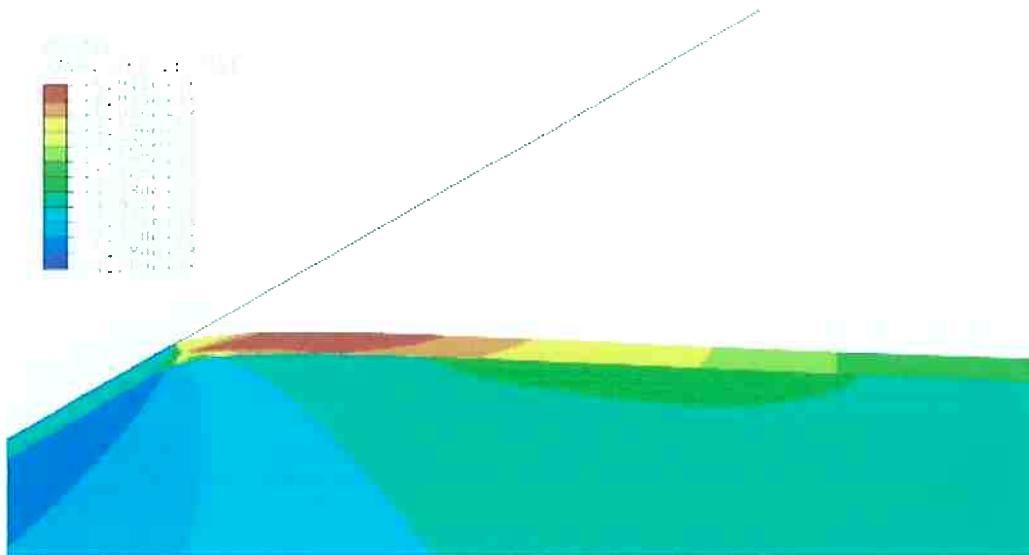


Figura 24 – tensão circunferencial para carga de 1100 N, substrato 2.

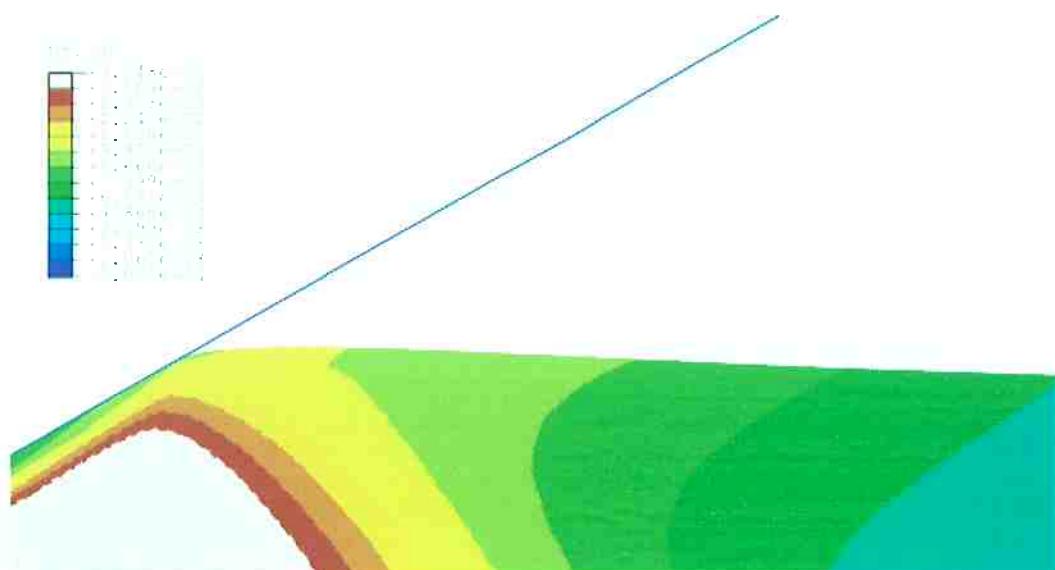
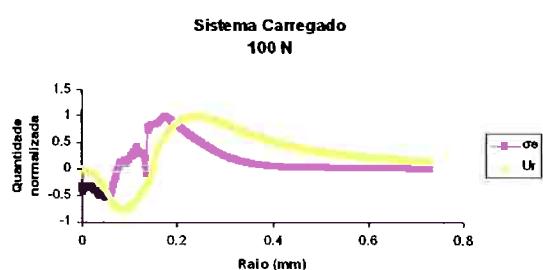


Figura 25 – deslocamento radial para carga de 1100 N, substrato 2.

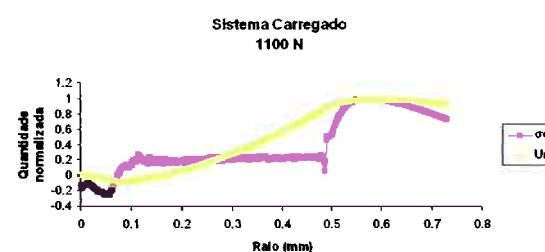
Ainda analisando esta hipótese existem três séries de figuras (26 a 28) que relacionam o perfil de tensão circunferencial com o perfil de deslocamento radial, respectivamente para os substratos 1, 3 e 3 (neste último caso para a simulação 7). As variáveis foram normalizadas por causa da imensa diferença de magnitude.

Nota-se, para todas as séries de figuras, que com o aumento das cargas os picos se tornam coincidentes. Se compararmos a série de figuras 26 com a série de figuras 11 (relativos à simulação 1) pode-se perceber que para a pré-carga (100 N) o pico de tensão circunferencial possui intensidade muito inferior ao de tensão radial e nessa série os picos estão distantes. Para 400N,  $\sigma_\theta$  possui intensidade um pouco inferior à de  $U_r$  e nessa série os picos já estão mais próximos, para as outras cargas a intensidade de  $\sigma_\theta$  é máxima e nessa série os picos são coincidentes.

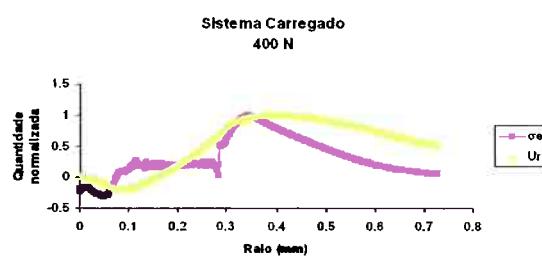
(26.a)



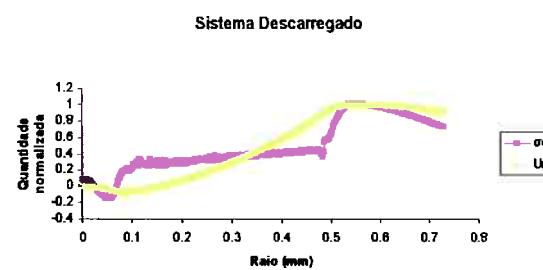
(26.d)



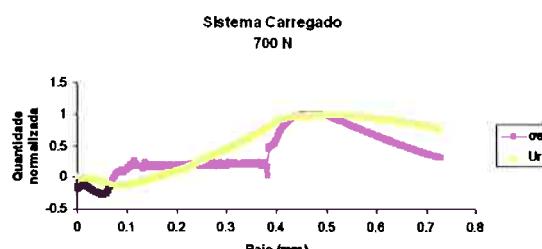
(26.b)



(26.e)



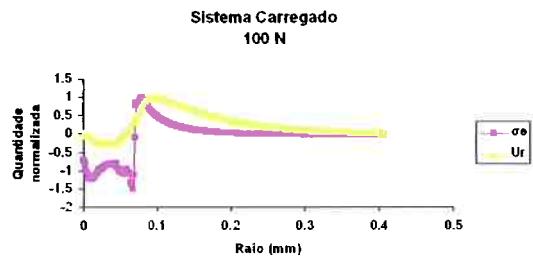
(26.c)



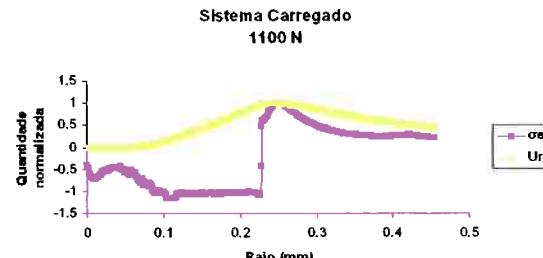
**Figura 26 – perfis de tensão e deslocamento para a superfície do filme com o substrato 1. Os gráficos de (a) a (d) foram obtidos durante o carregamento do sistema e as cargas que estavam sendo aplicadas eram: (a) 100 N, (b) 400 N, (c) 700 N e (d) 1100N. Já o gráfico (e) corresponde ao sistema totalmente descarregado.**

É possível notar o mesmo comportamento se compararmos a série de gráficos 12 e 27.

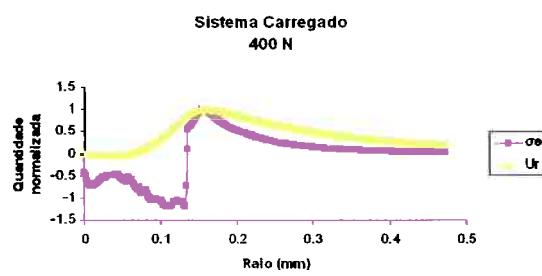
(27.a)



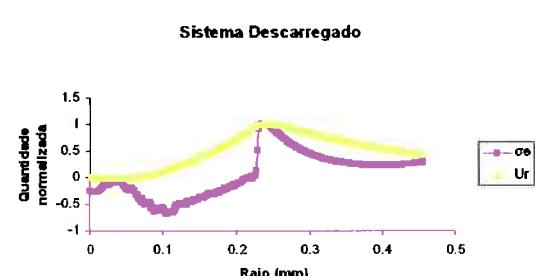
(27.d)



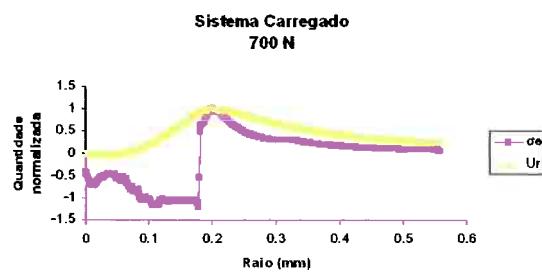
(27.b)



(27.e)



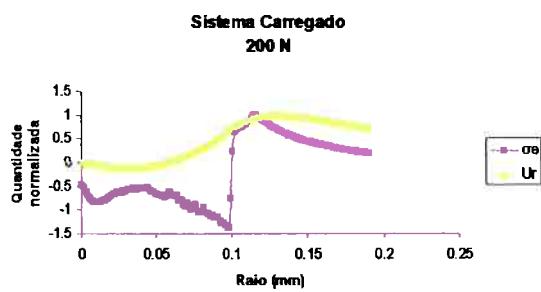
(27.c)



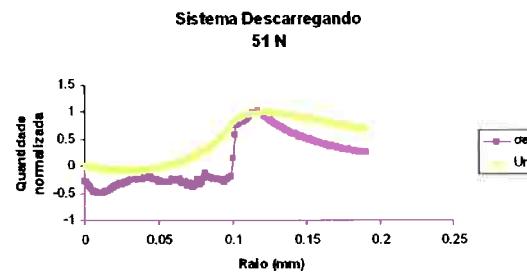
**Figura 27 – perfis de tensão e deslocamento para a superfície do filme com o substrato 3. Os gráficos de (a) a (d) foram obtidos durante o carregamento do sistema e as cargas que estavam sendo aplicadas eram: (a) 100 N, (b) 400 N, (c) 700 N e (d) 1100N. Já o gráfico (e) corresponde ao sistema totalmente descarregado.**

A série 28 pode ser comparada com a figura 22, ambas acompanham o descarregamento da simulação 7. Nesse caso a junção dos picos já não é tão notável provavelmente por começar com um pico de tensão circunferencial maior que nos outros casos.

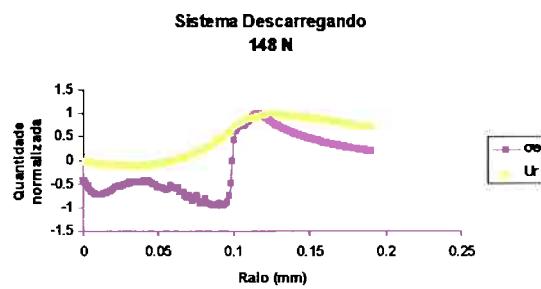
(28.a)



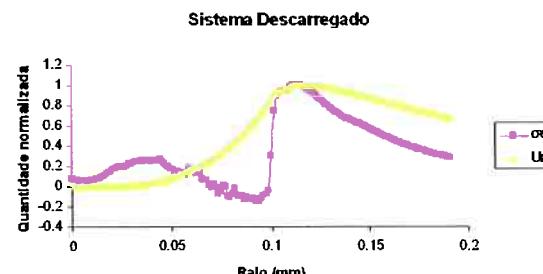
(28.d)



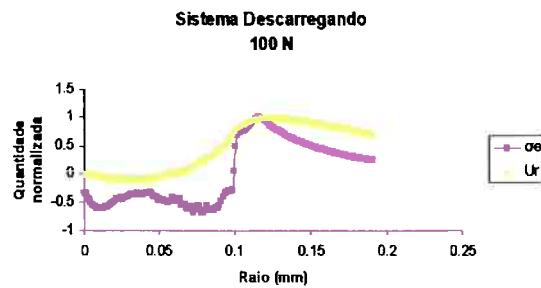
(28.b)



(28.e)



(28.c)



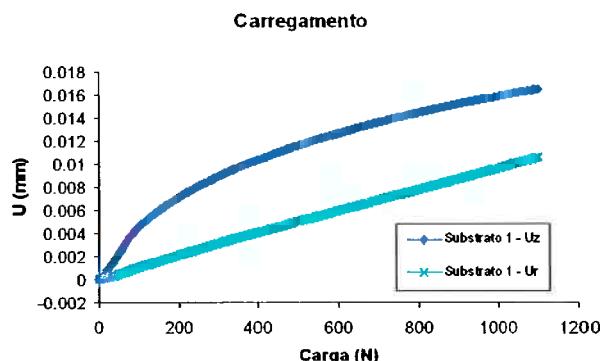
**Figura 28 – perfis de tensão e deslocamento para a superfície do filme com o substrato 3.** O gráfico (a) foi obtido no carregamento do sistema (simulação 7) e a carga que estava sendo aplicada era: (a) 200 N. Os gráficos (b) a (d) são do sistema descarregando e as cargas aplicadas são: (b) 148 N (c) 100 N e (d) 51 N. Já o gráfico (e) corresponde ao sistema totalmente descarregado.

#### 4.3.3.2 - Análise dos máximos de deslocamento radial e circunferencial

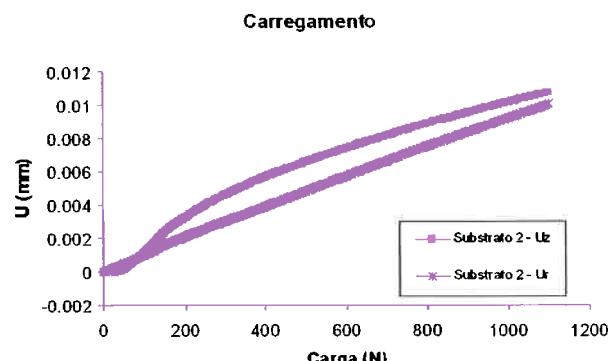
Uma outra análise pode ser feita a partir de deslocamentos sofridos pela superfície do filme, como mostra a série de figuras 29. Nesses são analisados os máximos deslocamentos (radiais e verticais) sofridos pela superfície do filme.

Pode-se perceber que o levantamento do filme ( $U_z > 0$ ) para o substrato 1 é muito maior do que nos outros dois substratos, ou seja, há um maior empilhamento do substrato. Também é notável que todos os substratos apresentaram empilhamento, mesmo que tardio, caso do substrato 3 onde esse só aparece a partir de 440N.

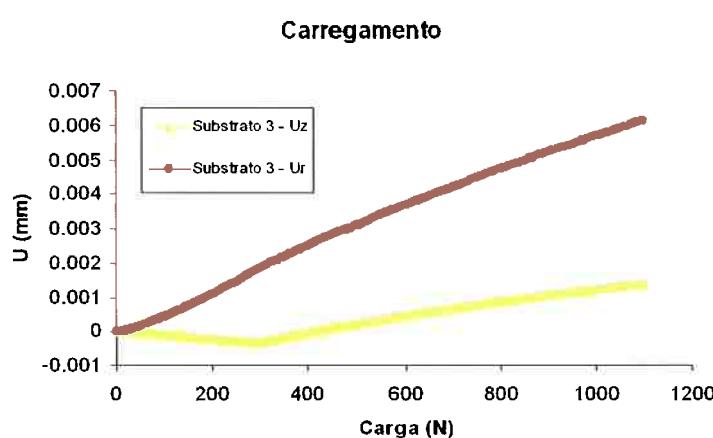
(29.a)



(29.b)



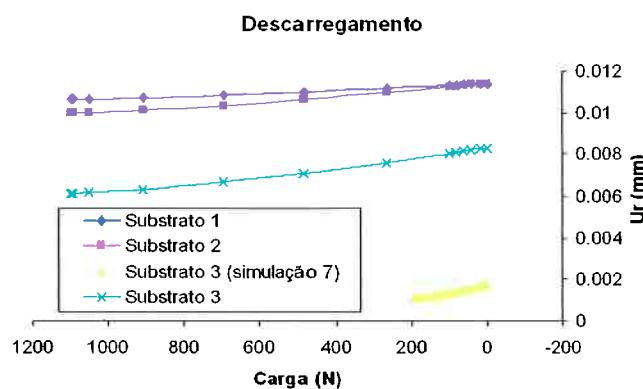
(29.c)



**Figura 29 – máximos de levantamento da superfície do filme (por pile-ups) e deslocamento radial durante o carregamento.**

(a) substrato 1, (b) substrato 2 e (c) substrato 3.

Nesta mesma série pode-se notar que há um crescimento contínuo de  $U_r$  o que permite o crescimento de  $\sigma_\theta$ . E conforme mostrado na figura 30  $U_r$  continua crescendo mesmo após o descarregamento, o que confirma o que tinha sido imaginado anteriormente.



**Figura 30 – máximos de deslocamento radial durante o descarregamento.**

Uma última consideração sobre  $\sigma_\theta$  é feita com base na figura 31: substratos com limites de escoamento menores possuem crescimento de deslocamento radial mais rápido, assim como o crescimento de  $\sigma_\theta$  tende a crescer mais rápido no substrato 2 do que no substrato 3 (lembrando que não é bom incluir o substrato 1 nessa comparação pois ele tem uma mudança de comportamento).

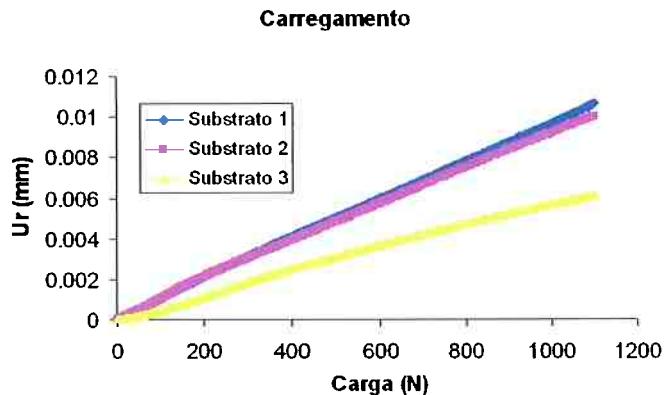


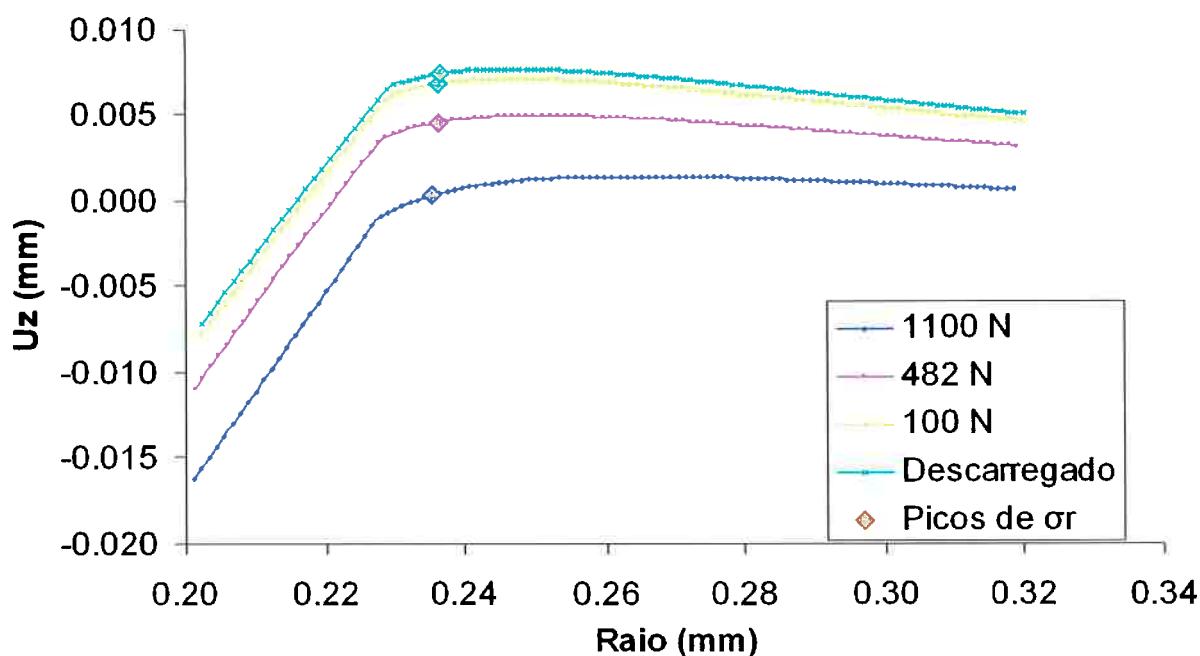
Figura 31 – máximos de deslocamento radial durante o carregamento.

#### 4.3.3.3 - Análise dos perfis de deslocamento vertical

Para explicar o relaxamento de  $\sigma_r$  utiliza-se o tamanho da camada plástica e o perfil de deslocamento vertical a que fica submetido o filme.

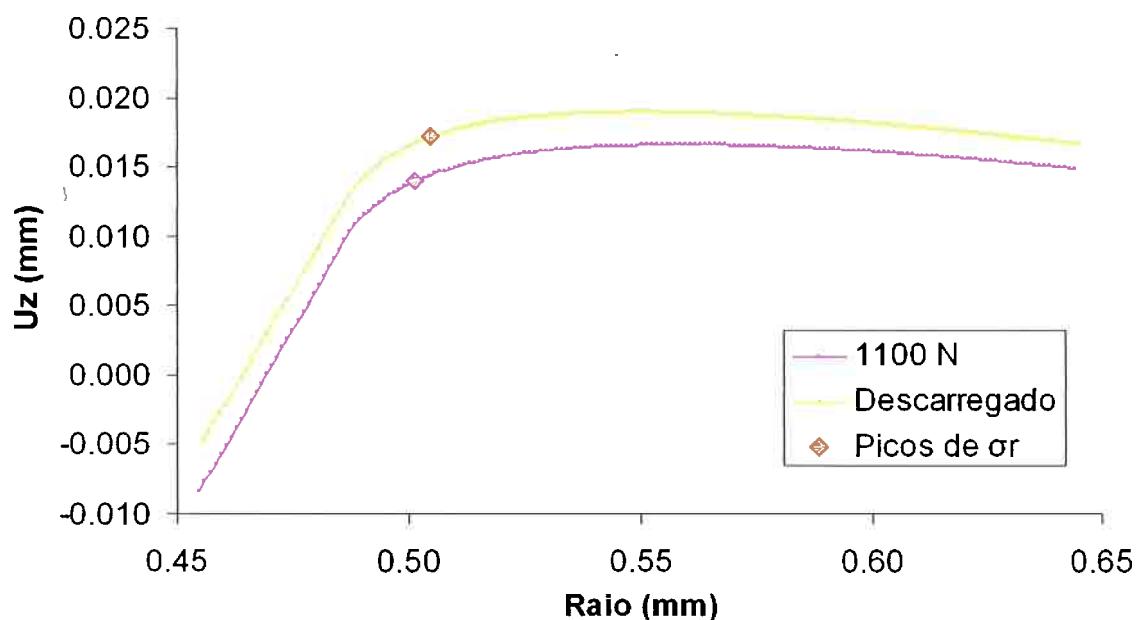
Na figura 32.a (ampliação do fim da cavidade de indentação) nota-se uma diminuição da curvatura do filme, na região onde está o pico de tensão, com o passar do descarregamento, essa diminuição resulta no relaxamento de  $\sigma_r$ .

### Perfis do filme em função da carga



**Figura 32.a - perfis do filme (no fim do contato indentador-amostra) para diferentes estágios do descarregamento (substrato 3).**

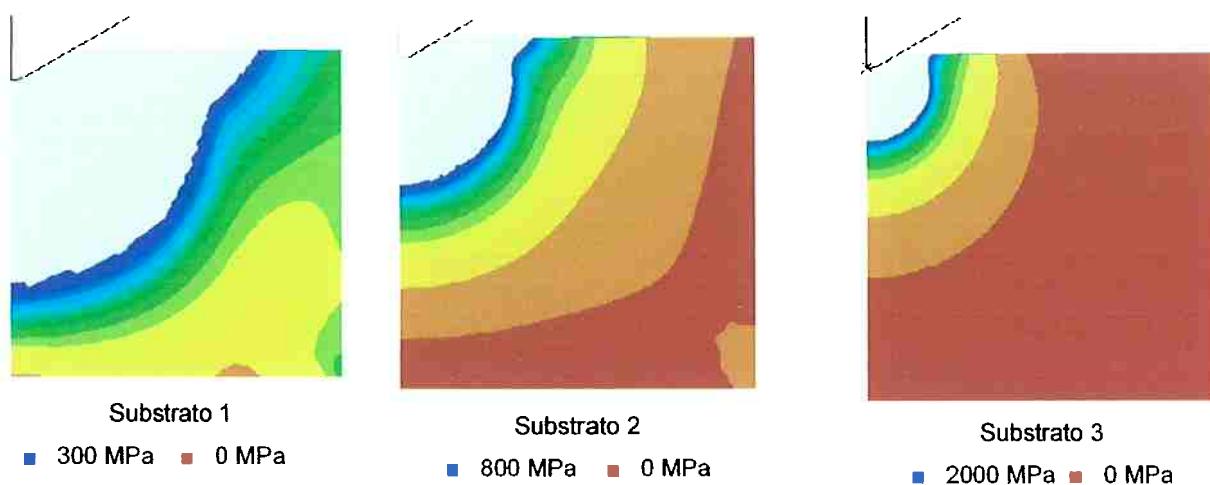
### Perfis do filme em função da carga



**Figura 32.b - perfis do filme (no fim do contato indentador-amostra) para o sistema carregado e descarregado (substrato 1).**

É notável que o substrato 3 possui uma maior recuperação elástica, causando uma maior diminuição de curvatura do filme. Isso se deve à deformação que se encontra a camada elástica do material.

Apesar de a camada elástica ser menor no substrato 3 (conforme mostrado na figura 3), ela suporta uma deformação 6.7 (2000MPa/300MPa) vezes maior sem se deformar plasticamente.

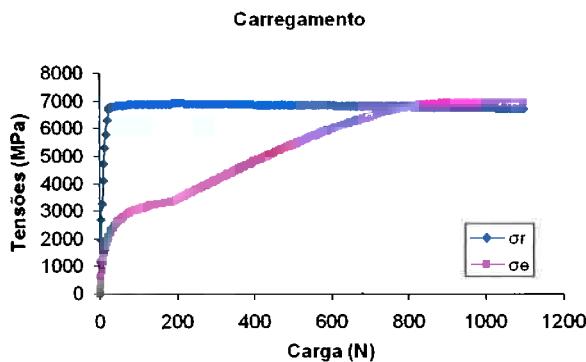


**Figura 33 – camada elástica (pelo critério de Mises) para os substratos 1, 2 e 3 (respectivamente da direita para a esquerda) mostrada pela zona colorida das imagens. As três imagens foram obtidas com os sistemas carregados com 1100 N (carga máxima). As zonas em vermelho possuem cargas entre 0 MPa e 17 MPa, ou seja deformação desprezível.**

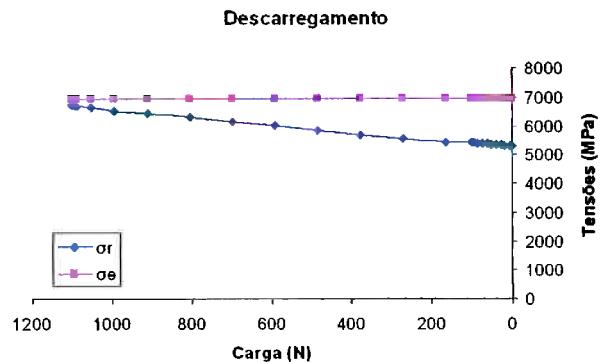
#### 4.3.4 – Comparação com penetrador esférico

##### 4.3.4.1 - Análise dos picos de tensão circunferencial e radial em função da carga para penetrador esférico

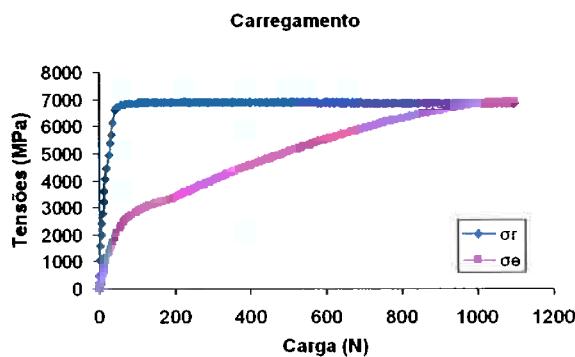
Para verificar se indentadores esféricos possuíam o mesmo comportamento foram realizadas as simulações 4, 5 e 6. Fez-se novamente as análises dos máximos de tensão em função da carga aplicada, que são apresentadas nas figuras 35 a 40.



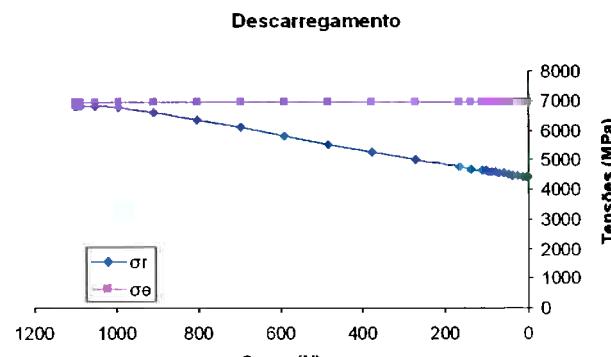
**Figura 35 – máximos de  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  durante o carregamento para o substrato 1.**



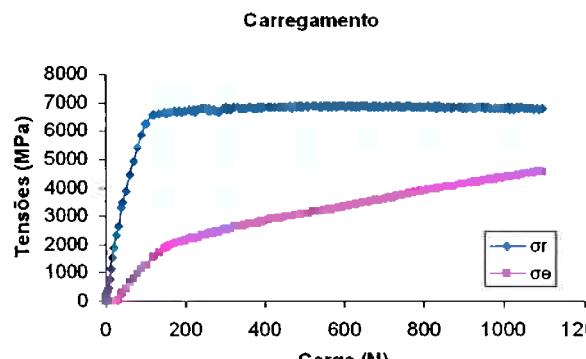
**Figura 36 – máximos de  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  durante o descarregamento para o substrato 1.**



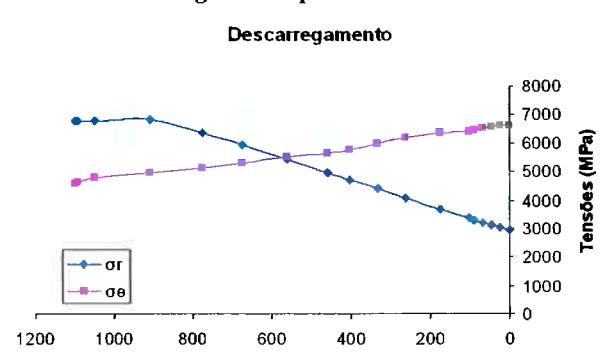
**Figura 37 – máximos de  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  durante o carregamento para o substrato 2.**



**Figura 38 – máximos de  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  durante o descarregamento para o substrato 2.**



**Figura 39 – máximos de  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  durante o carregamento para o substrato 3.**



**Figura 40 – máximos de  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  durante o descarregamento para o substrato 3.**

O comportamento de  $\sigma_r$  sob atuação do penetrador esférico é semelhante ao do penetrador cônico: crescimento contínuo até o seu máximo e mais rápido que o de  $\sigma_\theta$ .

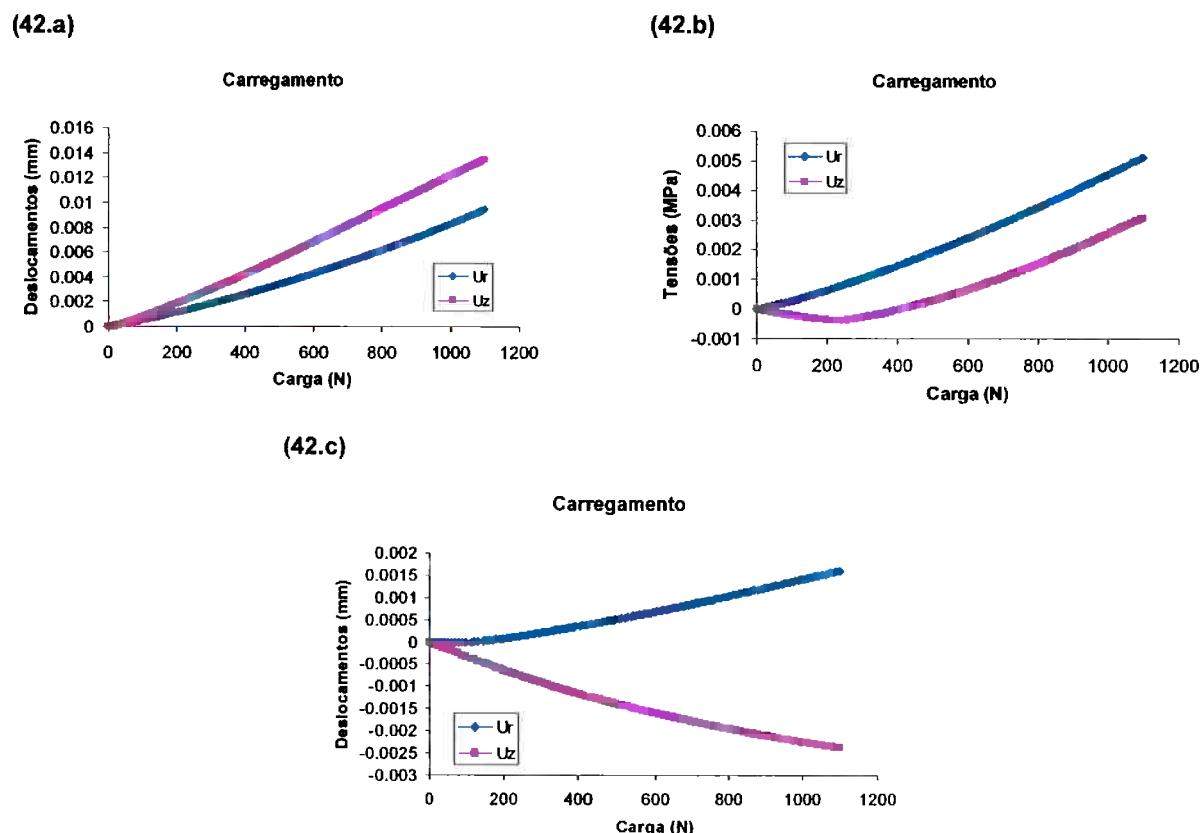
Agora  $\sigma_\theta$  apresenta mudança na continuidade de sua curva, apesar de pequena, também para o substrato 2. Novamente é observado que para substratos com limite de escoamento menor há uma evolução mais rápida desta tensão.

Como era esperado, o penetrador esférico acumula tensões de forma mais lenta do que o penetrador cônico.

#### 4.3.4.2 - Análise dos máximos de deslocamento radial e circunferencial

Para a série de gráficos 42 vale notar que o substrato 3 não apresenta empilhamento, e novamente  $U_r$  tem comportamento contínuo.

A partir das figuras 35, 37, 39 e 43 pode-se notar que os substratos que apresentam desenvolvimento de  $U_r$  mais rápido também apresentam desenvolvimento de  $\sigma_\theta$  mais rápido, o que concorda com os resultados obtidos anteriormente. E também, tem-se crescimento de  $U_r$  tanto no carregamento como no descarregamento, o que permite explicar o fato do substrato 3 ter apresentado pico de tensão circunferencial maior ao fim do descarregamento.



**Figura 42 – máximos de levantamento da superfície do filme (por pile-ups) e deslocamento radial durante o carregamento. (a) substrato 1, (b) substrato 2 e (c) substrato 3.**

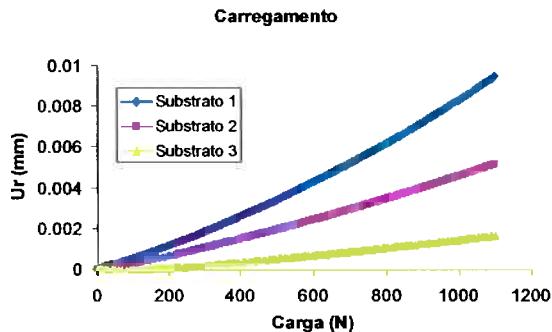


Figura 43 – máximos de deslocamento radial durante o carregamento.

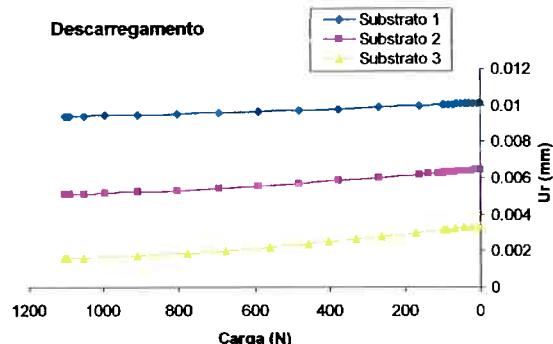


Figura 44 – máximos de deslocamento radial durante o descarregamento

#### 4.3.5 – Influências da plasticidade do filme nos resultados

Analisando o conjunto de gráficos 15 a 22 pode-se dizer que os picos das duas tensões se tornam comparáveis no limite de deformação elástica estabelecido para o filme, ou seja, se não for determinada uma propriedade plástica para o filme ou se o limite de escoamento do filme for muito alto a tensão circunferencial não alcançará a tensão radial durante o carregamento pois  $\sigma_r$  cresce de forma mais rápida. Durante o descarregamento, independente do filme ser plástico ou não, o crescimento de  $\sigma_\theta$  e a diminuição de  $\sigma_r$  serão os mesmos; é bom lembrar que em filmes de espessura pequena quem determina a deformação do sistema é o substrato, ou seja, o filme estará sujeito à mesma deformação.

As figuras abaixo mostram as regiões de deformação plástica no filme, quando ela começa a aparecer (figura 45) e na aplicação da carga máxima (1100N) quando ela está presente em grande parte do filme (figura 46).

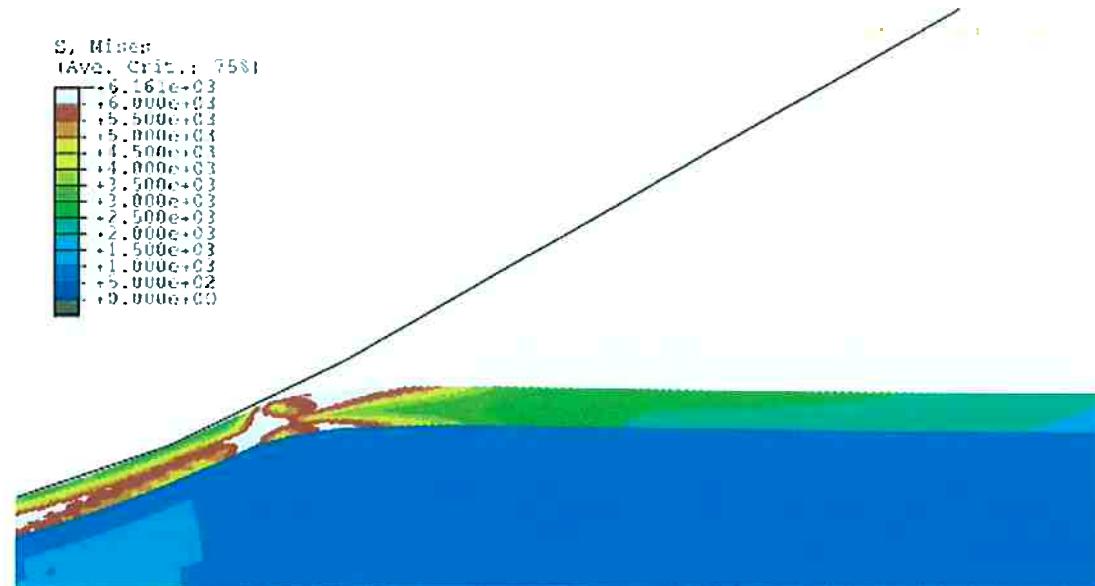


Figura 45 – Regiões sofrendo deformação plástica, segundo o critério de Mises, na simulação com o substrato 2.

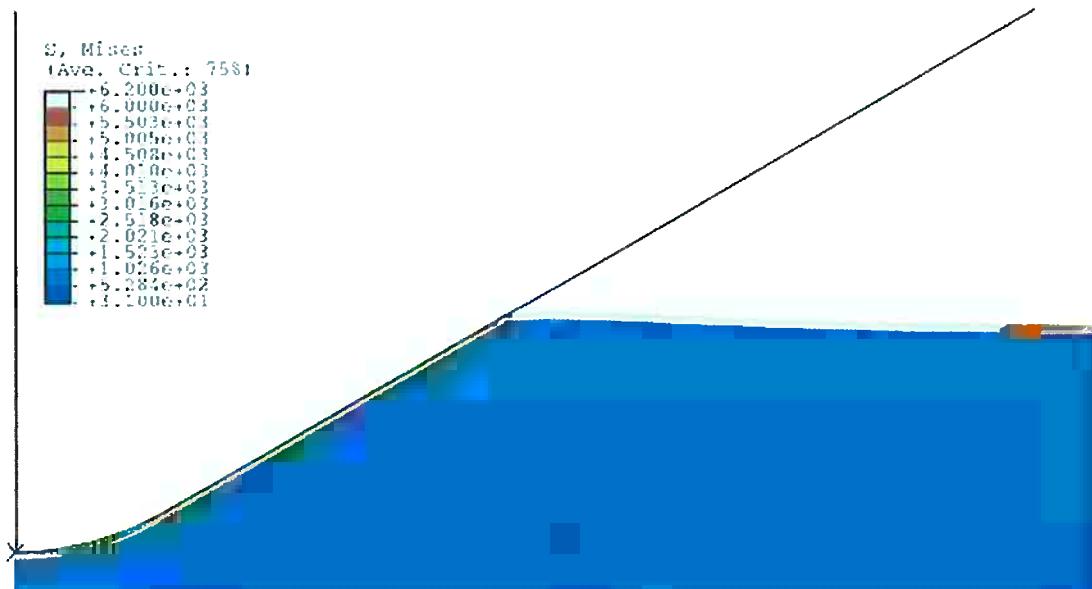


Figura 46 – Regiões sofrendo deformação plástica, segundo o critério de Mises, na simulação com o substrato 2, com carga máxima.

Abaixo são mostradas as figuras de deformação plástica equivalente (PEEQ) desses dois instantes da simulação. Nota-se que a maior deformação que o filme atinge, nas imediações da borda de contato, está presente no local do pico de tensão radial local este que apresenta as trincas circulares nos ensaios de indentação.

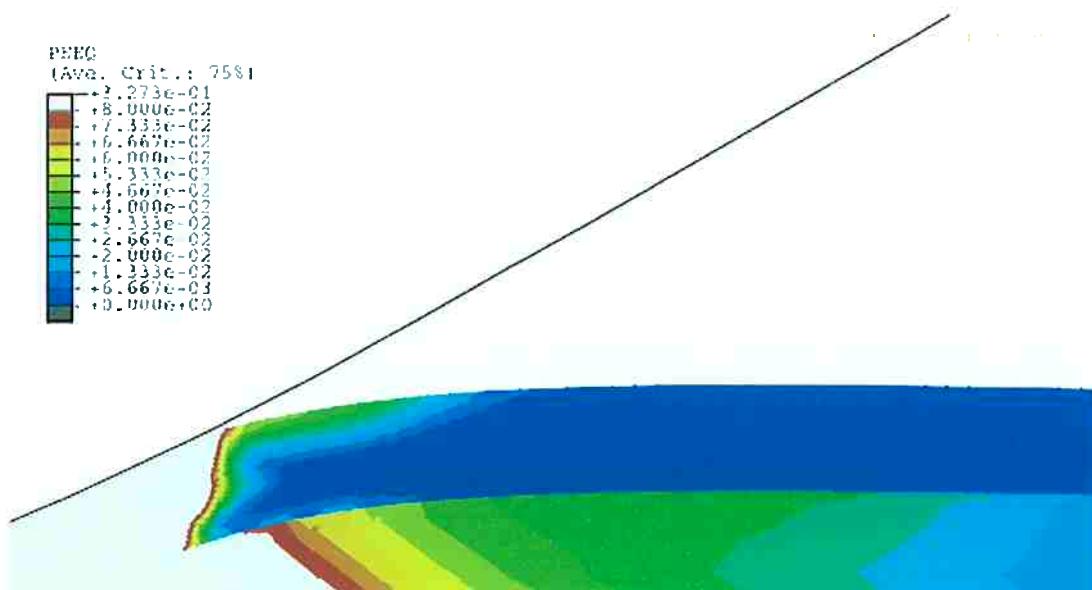
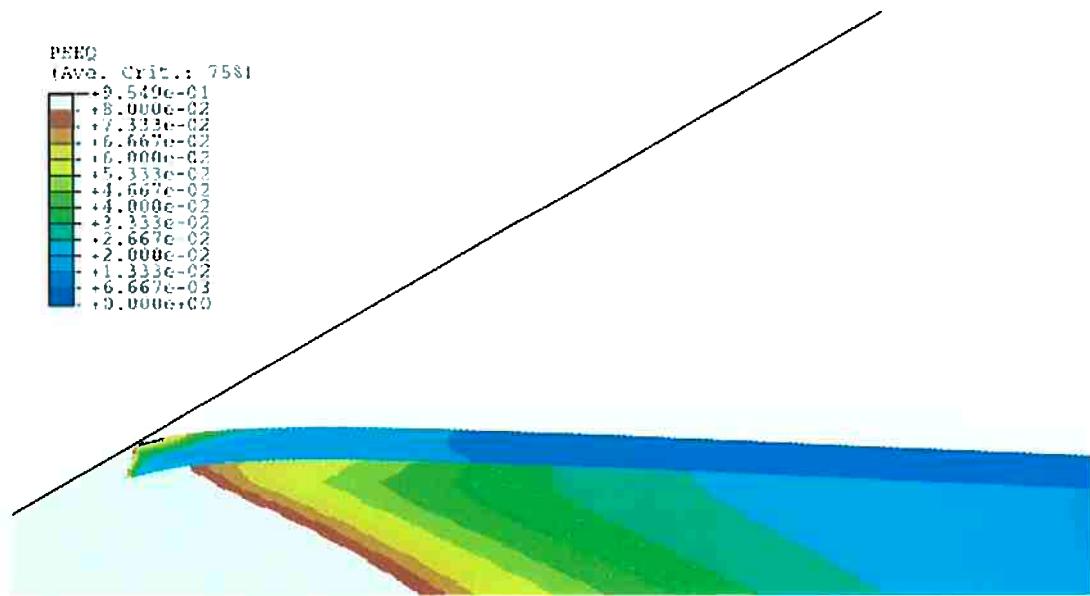


Figura 47 – Análise de PEEQ na simulação com o substrato 2.



**Figura 48 – Análise de PEEQ na simulação com o substrato 2, com carga máxima.**

Então, ao invés de ocorrerem trincas para aliviar tensões extremamente elevadas (da ordem de 70 GPa cfe. Piana et al. (2005)) o filme, neste caso, se deforma plasticamente, não permitindo que ocorra um grande aumento de tensões.

Nota-se também que as deformações plásticas encontradas (PEEQ) são muito pequenas, em média de 2%, atingindo o máximo na região de contato de 8%. Nos locais onde as deformações são pequenas (menores que 2%) devem ocorrer as micro-trincas e cisalhamentos entre os grãos do filme.

Estas comparações indicam que a parte do filme que sofre deformação plástica é a região suscetível a trincas em ensaios de indentação. Sendo assim, a região que se deforma plasticamente deve representar uma região danificada do filme.

Uma região danificada possui uma resistência à deformação menor que uma região íntegra. E no caso das simulações realizadas, as regiões deformadas plasticamente também oferecem menor resistência à deformação, pois quando uma região atinge o limite de escoamento a tensão para deformar o filme passa do módulo elástico (440 GPa) para o módulo plástico (1 GPa).

#### 4.4 - Análise experimental

Neste trabalho realizou-se uma tentativa de filmar um ensaio de indentação para comparar com os resultados obtidos nas simulações. Devido à limitações geométricas do equipamento utilizado não foi possível obter um bom foco da borda da indentação, o que impedia a visualização das trincas.

#### 4.5 Comparação com os resultados experimentais de Franco Jr (2003).

O ensaio de aderência Daimler-Benz consiste em realizar indentações em uma amostra, com penetrador Rockwell C e com uma carga de 150 kgf (1471 N). A micrografia da indentação (com aumento de 100 vezes) é comparada com a figura 49 e determina-se o parâmetro HF (abreviatura da expressão alemã que quer dizer força de adesão) do conjunto. Para HF de 1 a 4 diz-se que o filme tem boa adesão, de 5 a 6 pode-se dizer que ela é insuficiente.

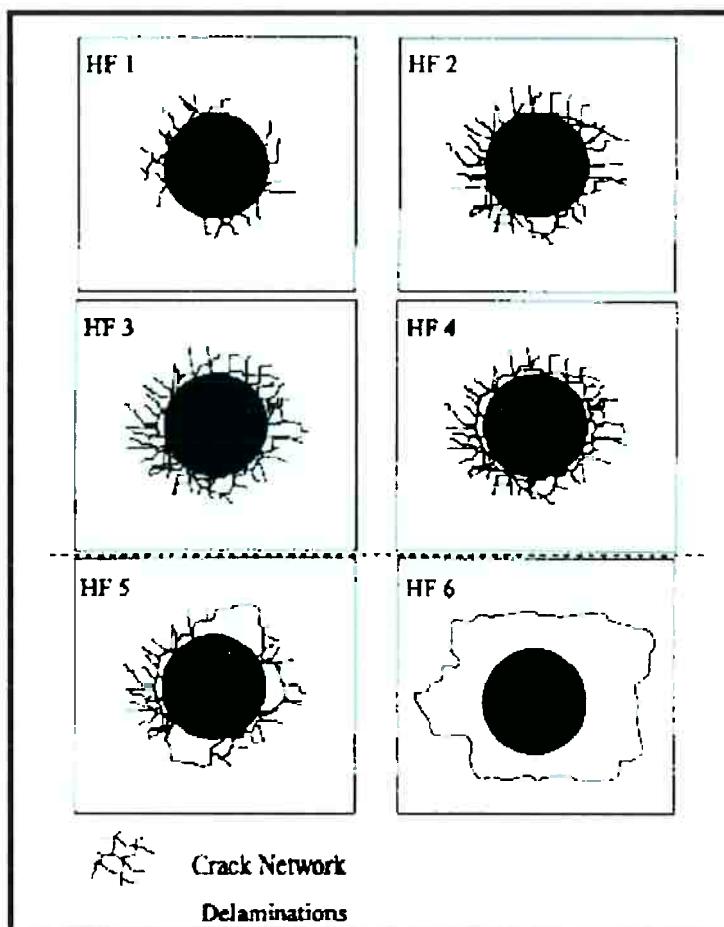


Figura 49 – Escala de adesão em ensaio Daimler-Benz (Heinke et al., 1995).

Uma forma modificada desse ensaio determina o parâmetro  $L_c$  (menor carga para que exista descolamento do filme) do conjunto. Neste ensaio são realizadas indentações, com penetrador Rockwell C e com cargas crescentes, de 15 kgf a 250 kgf. E através das micrografias destas indentações determina-se  $L_c$ .

Na tese de doutoramento de Franco Jr (2003), foram realizados ensaios de adesão Daimler-Benz modificados, avaliando filmes de nitreto de titânio em aços ferramenta H13 e D2. Nesse estudo foram analisadas que influências teriam os diferentes tratamentos de nitretação na adesão do filme e na formação de trincas radiais.

Abaixo, os resultados obtidos por ele são comparados com os resultados das simulações, validando-as.

Nas primeiras duas figuras (50 e 51, que estão nas páginas 36 e 37 respectivamente), que são amostras de aço H13 com menor suporte mecânico (pouca ou nenhuma nitretação), observa-se o mesmo comportamento: as trincas radiais (setas vermelhas) surgem nas bordas de indentação mesmo para cargas pequenas. Nas menores cargas, as trincas possuem direção puramente radial e nas maiores cargas elas possuem componentes radiais e tangenciais (setas rosas).

Nas simulações ficou indicado que substratos com menor suporte mecânico possuíam uma descontinuidade no crescimento da intensidade do pico de tensão tangencial, e essa descontinuidade fazia com que para o substrato com limite de escoamento menor o pico de tensão tangencial demore mais para crescer. Esse resultado não é coerente pois em substratos com baixo suporte mecânico a carga necessária para a formação de trincas radiais é baixa, como exemplo pode-se ver a figura 50 (a). Esse erro não pode ser explicado.

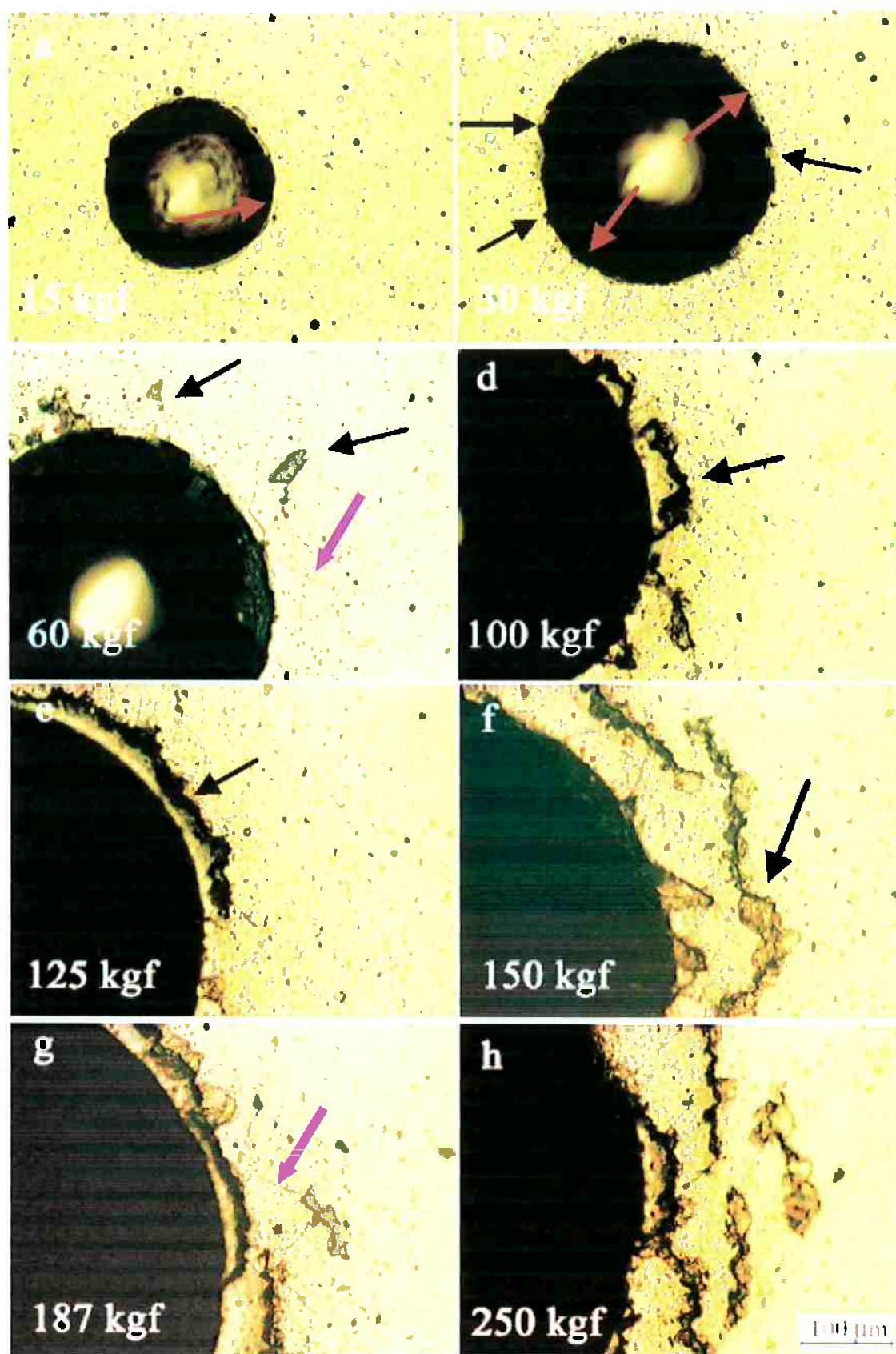
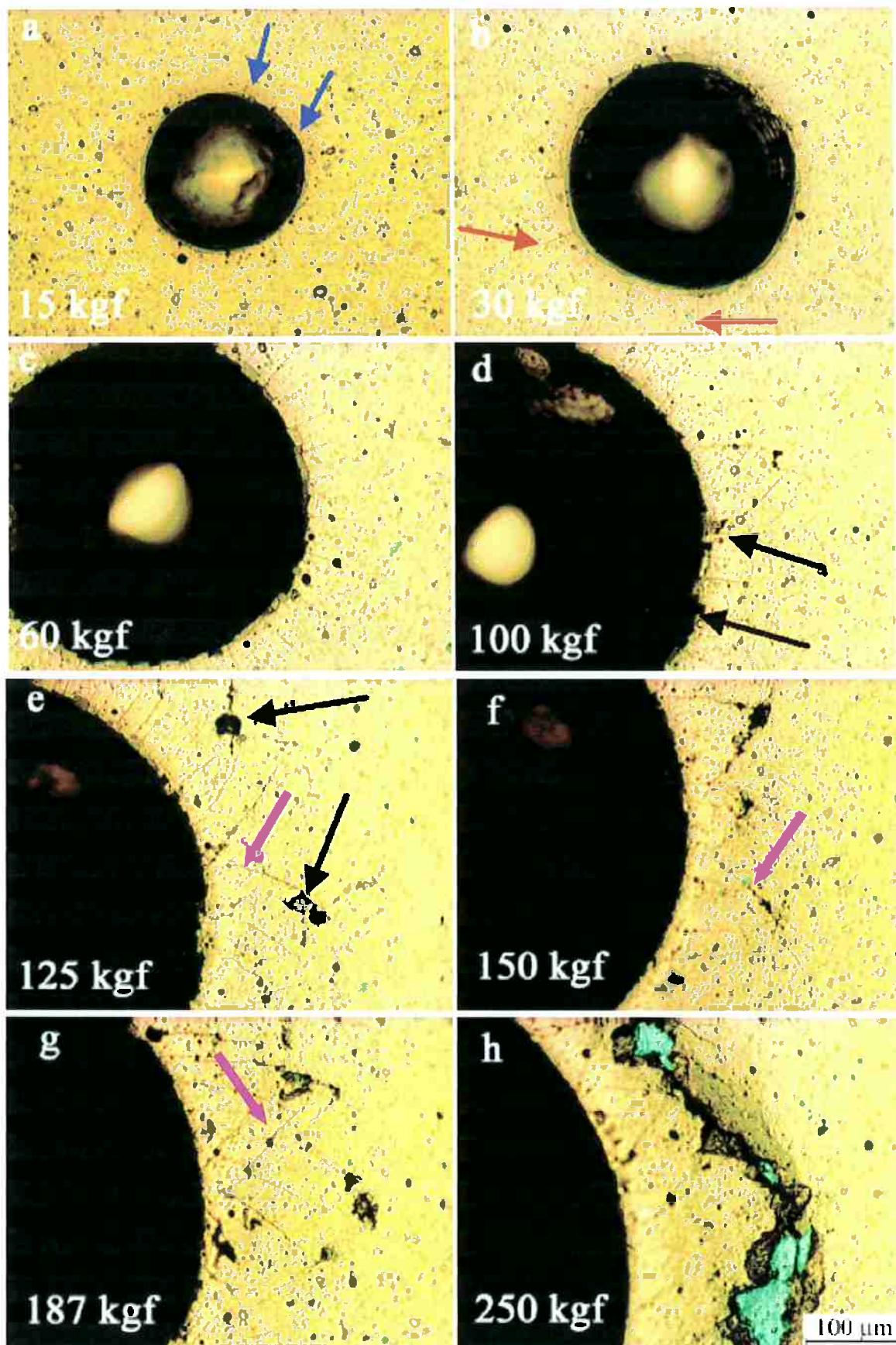


Figura 50 – Ensaio Daimler- Benz em Aço H13 recoberto por TiN. As setas vermelhas e amarelas indicam trincas radiais e as pretas indicam lascamentos do filme (Franco Jr, 2003).



**Figura 51 – Ensaio Daimler-Benz em Aço H13 nitretado por 42 minutos, com 5% de nitrogênio na atmosfera, recoberto por TiN. As setas vermelhas e rosas indicam trincas radiais e as pretas indicam lascamentos do filme (Franco Jr, 2003).**

Nas micrografias 52 (d) a (f) as trincas circulares são contínuas, o que indica que elas foram formadas primeiro. As trincas radiais surgem entre trincas circulares e a partir da última trinca circular elas continuam em linhas retas, demonstrando que elas foram formadas posteriormente. O que condiz com o fato de que para cargas menores de ensaio a formação de trincas radiais ocorre após a formação das trincas circulares.

O fato da trinca radial presente na micrografia 52 (d) não entrar na cavidade de indentação indica que ela foi formada apenas no descarregamento. Concordando com o resultado da simulação que indica um crescimento da tensão tangencial durante o descarregamento.

Na figuras 52 (g) e (h) nota-se que as trincas radiais ocorreram antes das últimas trincas circulares, pois estas estão interrompidas pela trinca radial, o que confere com o resultado de que para cargas maiores a tensão tangencial atinge o valor máximo estabelecido antes do descarregamento, fazendo com que exista competição entre os dois tipos de trincas.

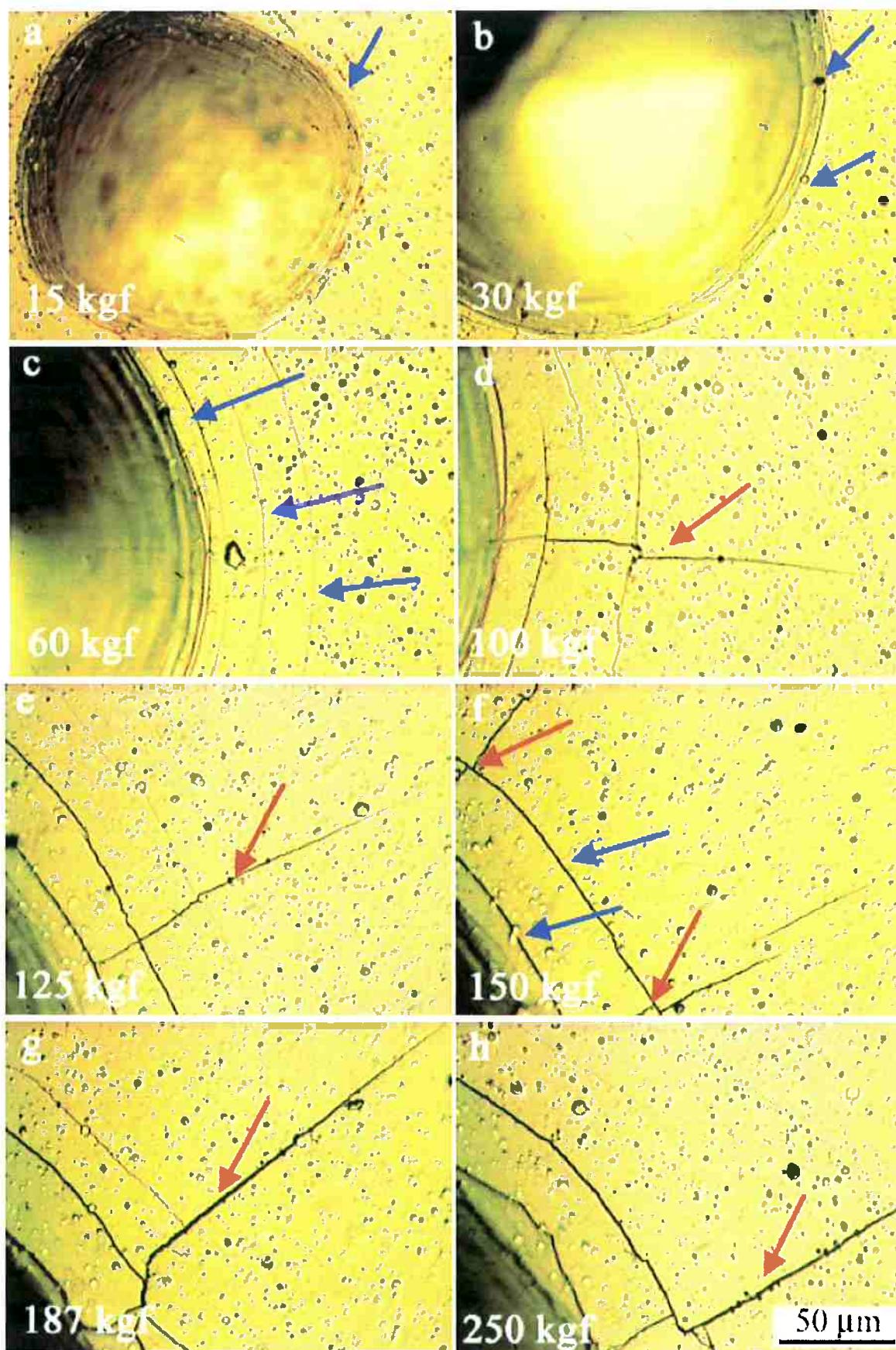


Figura 52 – Ensaio Daimler- Benz em Aço H13 nitretado por 11 horas e recoberto por TiN. As setas vermelhas indicam trincas radiais e as azuis indicam trincas circulares (Franco Jr, 2003).

Na micrografia (c) da figura 53 observa-se o caso em que as trincas circulares se formaram primeiro, pois estas interrompem as trincas radiais. Na micrografia (d), que possui uma carga maior, tem-se o caso em que as últimas trincas circulares se formaram após a trinca radial. Esses resultados também condizem com o que foi achado nas simulações: para cargas menores, a tensão tangencial assume valores maiores durante o descarregamento, favorecendo a nucleação de trincas circulares primeiro; para cargas maiores, a tensão tangencial atinge seu máximo, até mesmo, durante o carregamento possibilitando a formação de trincas radiais antes da formação das últimas trincas circulares.

Nas micrografias 53 de (e) a (h) existem trincas radiais (setas verdes) que possuíram outro mecanismo de formação, e não o de pico de tensão tangencial na superfície do filme. As principais características dessas trincas são: a ausência de sinuosidades e a invasão da cavidade de indentação.

O mecanismo proposto é que elas foram geradas por trincas nucleadas no substrato. Essa afirmação é baseada nas micrografias 56 (g) e (h) (página 47) que mostram o substrato exposto (locais verdes das figuras) e nele aparecem trincas radiais (setas verdes) que invadem a cavidade de indentação, assim como acontece nas figuras 53 (e) a (h). Nota-se também, para regiões mais afastadas das bordas de indentação, que essa trinca do substrato passou para o filme.

Esse tipo de trinca radial, indicado pelas setas verdes ao longo das figuras, não foram consideradas na comparação com as simulações por causa do diferente mecanismo de surgimento.

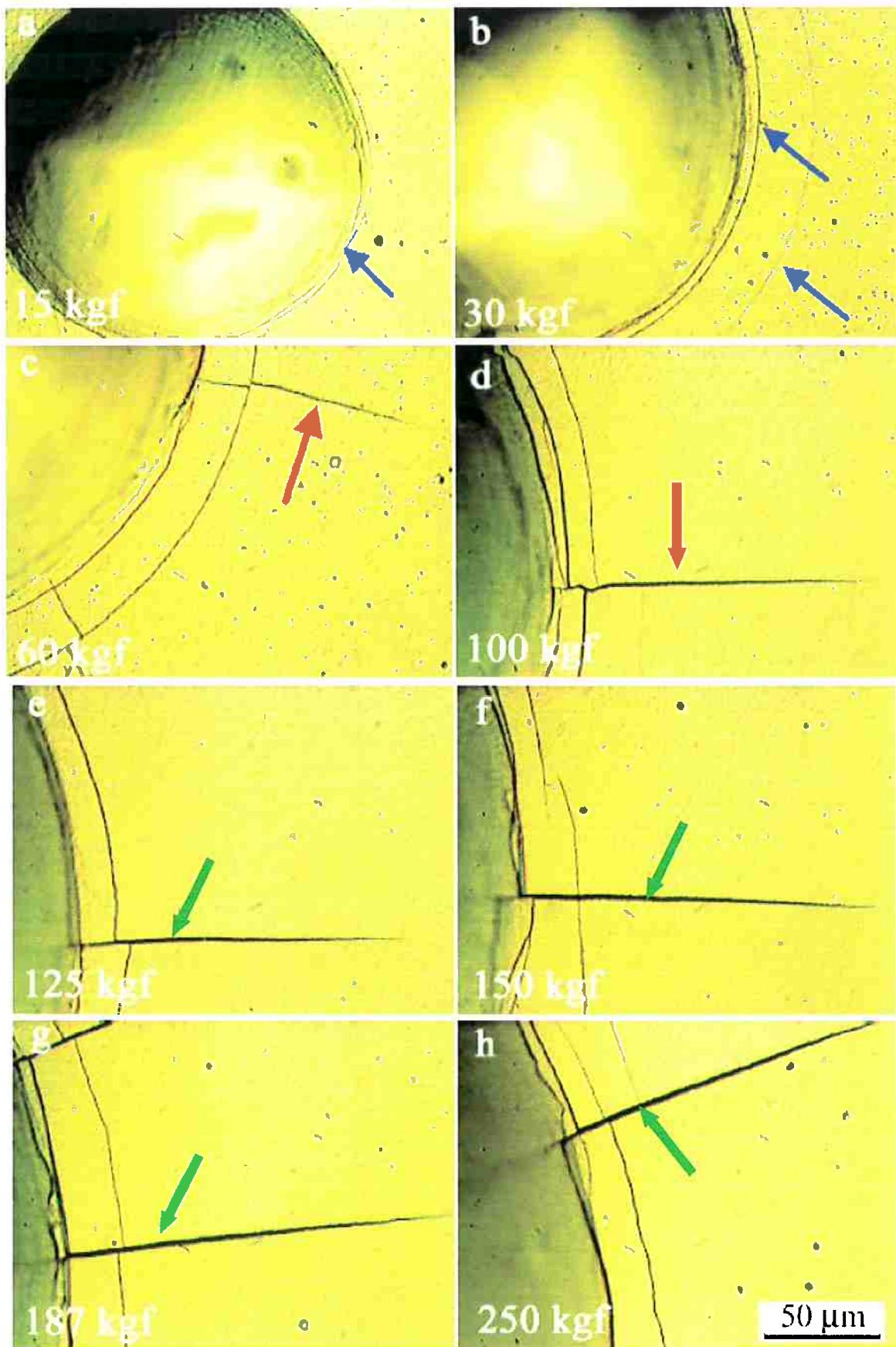


Figura 53 – Ensaio Daimler-Benz em Aço H13 nitretado por 3 horas, com 10% de nitrogênio na atmosfera, recoberto por TiN. As setas vermelhas indicam trincas radiais e as azuis indicam trincas circulares (Franco Jr, 2003).

Na figura 54, as micrografias (e) e (f) apresentam trincas radiais que surgiram a partir de uma mudança de direção das trincas circulares. Isso mostra que as trincas circulares provavelmente sofreram a mudança de direção quando a tensão tangencial passou a assumir valores maiores que a tensão radial.

Pelas simulações essa inversão de picos de tensão ocorre durante o descarregamento, o que concorda com o fato das trincas circulares aparecerem somente fora da cavidade de indentação.

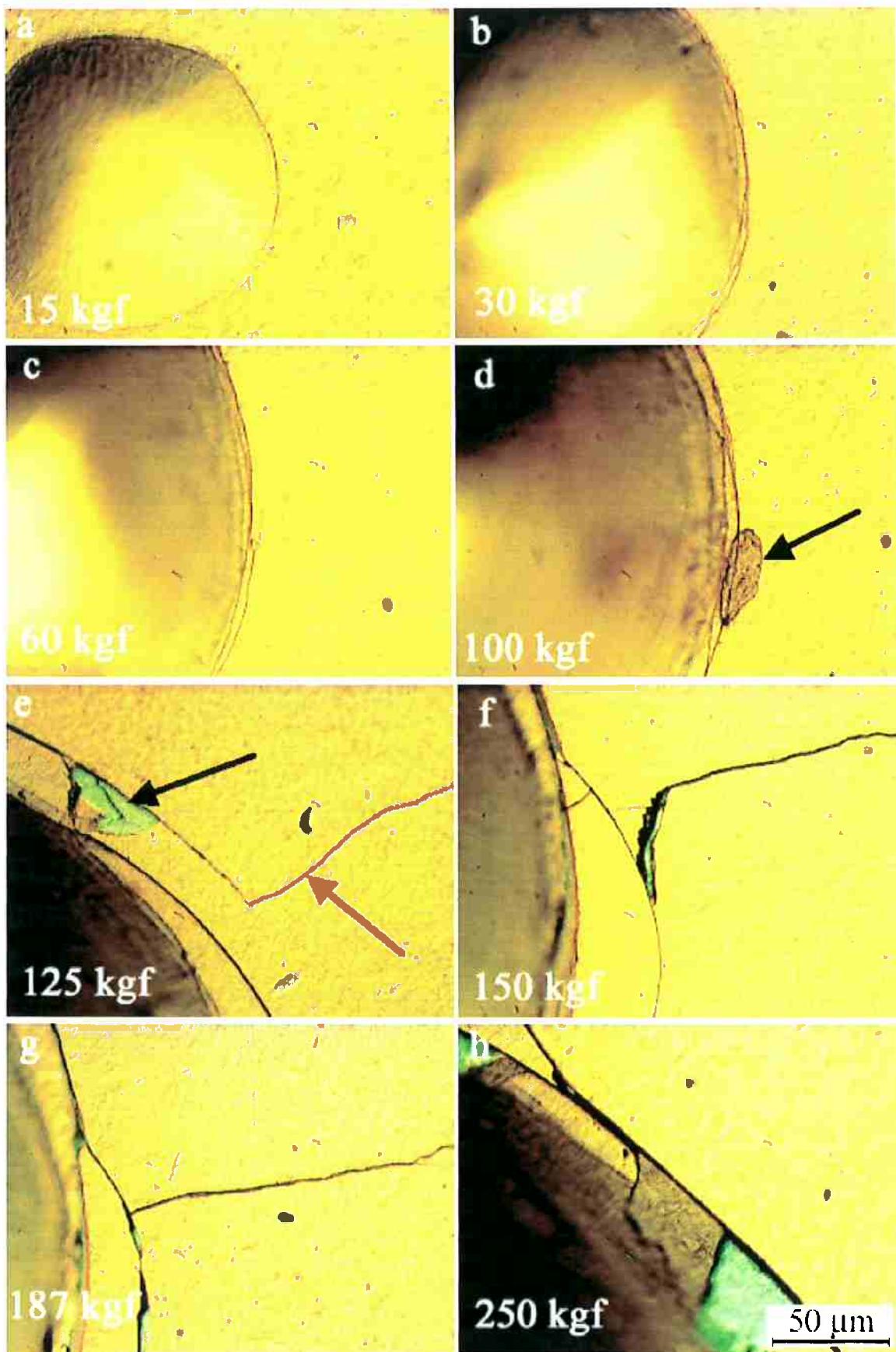
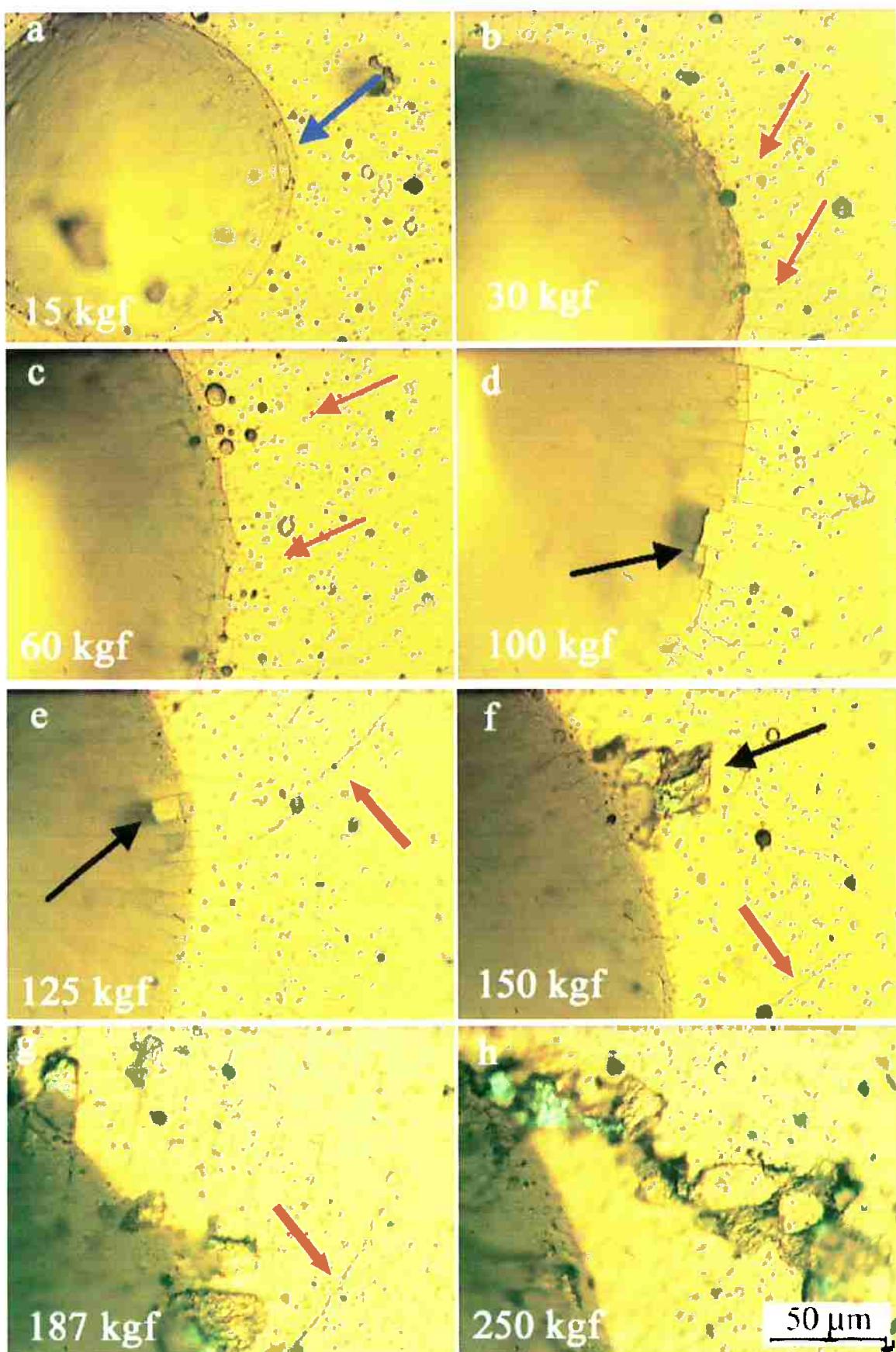


Figura 54 – Ensaio Daimler- Benz em Aço H13 nitretado por 6 horas, com 20% de nitrogênio na atmosfera, recoberto por TiN. As setas vermelhas indicam trincas radiais e as pretas indicam lascamentos do filme (Franco Jr, 2003).

Na figura 55 estão as micrografias para o teste de adesão de aço D2, sem nitatação, revestido com TiN. E assim como para os casos em que o aço H13 não oferecia bom suporte mecânico, as trincas radiais aparecem até para cargas pequenas, e para cargas maiores elas possuem componentes tangenciais.



**Figura 55 – Ensaio Daimler-Benz em Aço D2 recoberto por TiN. As setas vermelhas indicam trincas radiais, as pretas indicam lascamentos do filme e a azul indica uma trinca circular (Franco Jr, 2003).**

Nas figuras 56 e 57, referentes a substratos de aço D2 com diferentes tratamentos de nitretação, nota-se que as trincas circulares estão restritas a raios mais próximos da borda da indentação, dificultando a análise da ordem de formação das trincas.

Deve-se ressaltar as micrografias 57 (d) e (g) onde é possível visualizar que as trincas radiais (setas vermelhas) surgiram de uma mudança de direção de uma trinca radial e as trincas radiais estão presentes apenas fora da cavidade de indentação. Confirmando mais uma vez o resultado da simulação que indica uma inversão na tensão com maior valor durante o descarregamento.

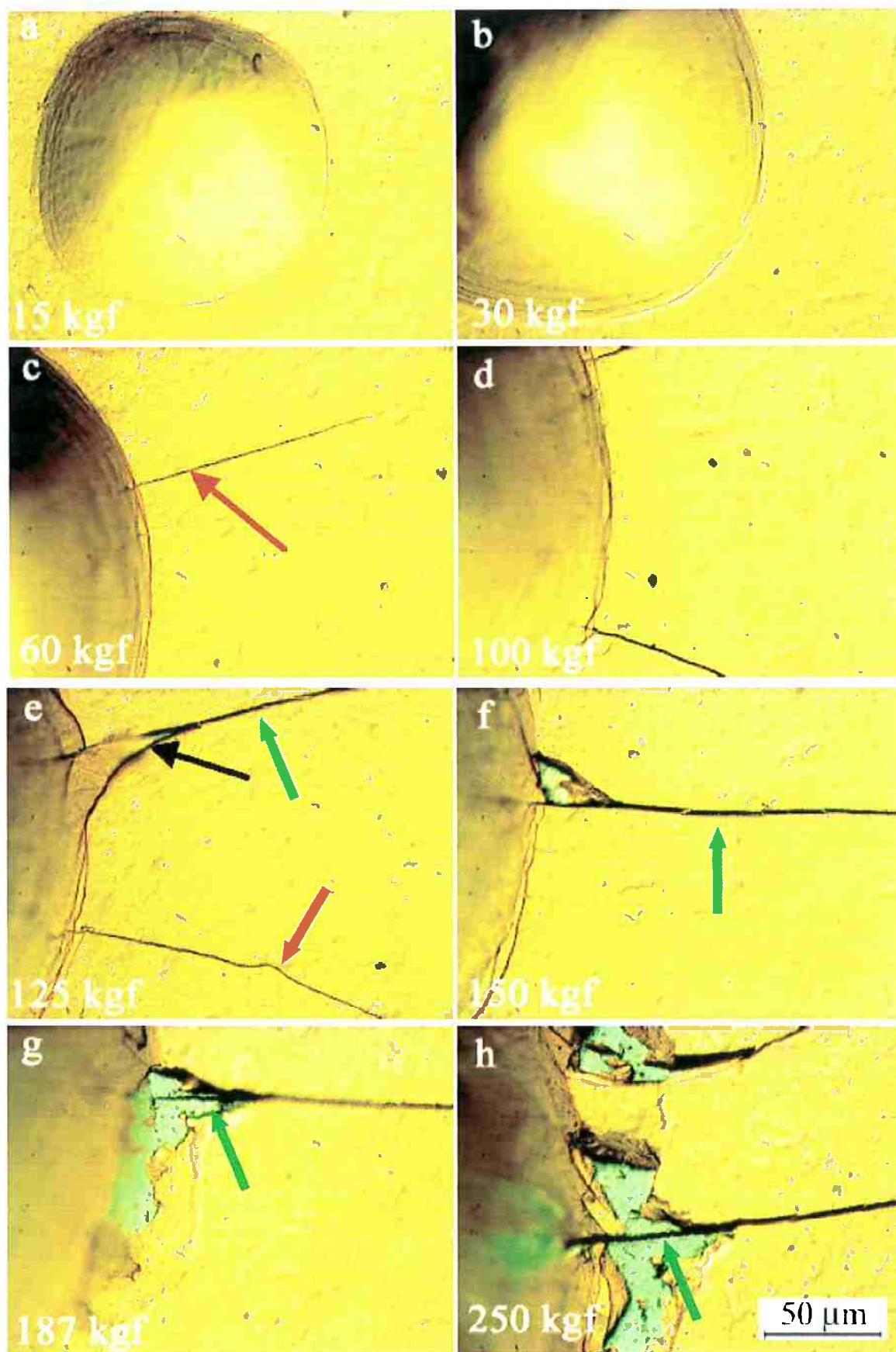
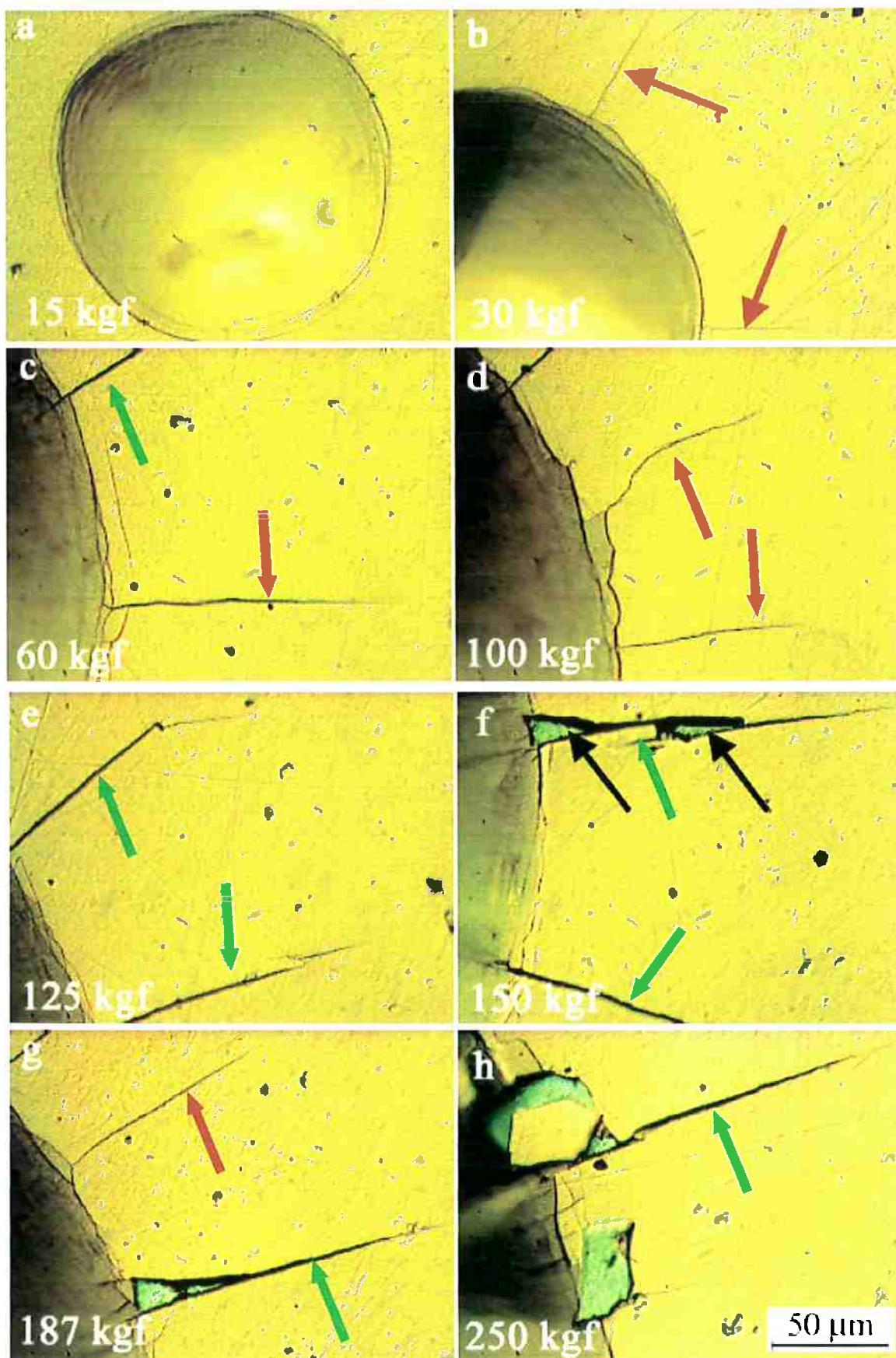


Figura 56 – Ensaio Daimler- Benz em Aço D2 nitretado por 6 horas, com 20% de nitrogênio na atmosfera, recoberto por TiN. A seta vermelha indica uma trinca radial e a pretas indica um lascamento do filme (Franco Jr, 2003).



**Figura 57 – Ensaio Daimler-Benz em Aço D2 nitretado por 3 horas, com 10% de nitrogênio na atmosfera, recoberto por TiN. As setas vermelhas indicam trincas radiais e as pretas indicam lascamentos do filme (Franco Jr, 2003).**

Visto que o comportamento encontrado em simulação condiz com os resultados experimentais, os resultados da simulação ficam validados e pode-se concluir que a simulação com filmes representados com comportamento elásto-plástico possuem menor erro na diferença de intensidade dos picos de tensão radial e tangencial.

É importante observar que nas análises para cargas de 1100 N todas as simulações tiveram o pico de tensão tangencial atingindo o máximo durante o carregamento, enquanto os resultados experimentais indicam que nem sempre isso ocorre. Esta diferença entre simulação e resultados experimentais provavelmente está relacionada com as propriedades mecânicas do substrato, que não são semelhantes na simulação e no trabalho de Franco Jr. (2003).

## 5 Conclusões

Conclui-se que simular o filme de nitreto de titânio assumindo comportamento elástico-plástico leva a uma maior coerência entre os resultados das simulações e resultados experimentais.

As simulações apresentaram boa correlação com os resultados experimentais mostrando confiabilidade para avaliar tensões nas bordas de indentação na superfície do filme. Baseado neste fato conclui-se que:

- O pico de tensão radial possui crescimento rápido atingindo o limite para o surgimento de trincas em cargas bem menores que o pico de tensão tangencial, o que favorece a formação de trincas circulares primeiro.
- O pico de tensão radial decresce no descarregamento devido à mudança de curvatura na superfície do filme. Quanto maior a recuperação elástica do substrato maior a redução de intensidade desse pico.
- O pico de tensão tangencial cresce de forma mais lenta que o pico de tensão radial e esse crescimento é contínuo durante o descarregamento caso ele não atinja o seu máximo durante o carregamento. Esse comportamento provoca trincas radiais que surgem entre trincas circulares ou a partir de trincas circulares para cargas menores ou substratos que oferecem maior suporte mecânico. Em casos de cargas maiores a tensão tangencial atinge o máximo durante o carregamento o que permite a concorrência entre os dois tipos de trincas.

Pelas simulações também foi determinado que o pico de deslocamento radial exerce grande influência no pico de tensão tangencial.

O indentador esférico apresenta o mesmo comportamento em relação ao cônicoo, porém com velocidades de crescimento da intensidade dos picos de tensão menores.

## 6 Bibliografia

Begley M.R; Evans A.G; Hutchinson J.W. – Spherical impression of thin elastic films on elastic-plastic substrates – International Journal of Solids and Structures, v. 36, pp. 2773-2788, 1999.

Bhowmick, S; Kale, A.N; Jayaram, V; Biswas, S.K. – Contact damage in TiN coating steel – Thin Solid Films, v. 436, pp. 250-258, 2003.

Dieter, George E. – Mechanical Metallurgy, London; New York: McGraw-Hill, 1988.

Franco Jr., A. R. – Obtenção de revestimentos dúplex por nitretação a plasma e PVD-TiN em aços ferramenta AISI D2 e AISI H13 – Tese de doutoramento – EPUSP, São Paulo 2003.

Heinke, W; Leyland, A; Matthews, A; Berg, G; Friedrich, C; Broszeit, E – Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests – Thin Solid Films, v. 270, pp. 431-438, 1995.

Hultman, L.; Sundgren, J.E. – Handbook of Hard Coatings – Deposition Technologies, Properties and Applications. ed. Bunshaw, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, 2001.

Johnson, K.L. – Contact Mechanics. Ed Cambridge University Press, New York 1989

Karimi, A; Wang, Y; Cselle, T; Morstein, M – Fracture mechanisms in nanoscale layered hard thin films – Thin Solid Films, v. 420-421, pp. 275-280, 2002.

Ma, K.J; Bloyce, A; Bell, T. – Examination of Mechanical properties and failure mechanisms of TiN and Ti-TiN multilayer coatings – Surface & Coatings Technology, v. 76-77, pp. 297-302, 1995.

Metals Handbook – Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys – ASM International – v. 1, 10<sup>a</sup> edição.

Pérez, E. A. – Estudo das tensões de contato durante sucessivas indentações de sistemas contendo filmes resistentes ao desgaste e substratos com diferentes propriedades mecânicas – Tese de mestrado – EPUSP, São Paulo 2004.

Piana, L.A; Pérez, E. A; Souza, R. M; Kunraht, A.O; Strohaecker, T. R. – Numerical and experimental analyses on the indentation of coated systems with different mechanical properties – Thin Solid Films v. 491, pp. 197-203, 2005.

Souza, R.M; Mustoe, G.G.W; Moore, J.J. – Finite-element modeling of the stresses and fracture during the indentation of hard elastic films on elastic-plastic aluminium substrates – Thin Solid Films, v. 355-356, pp. 303-310, 1999.

Tschiptschin, A.P. – Relação estrutura-propriedades em recobrimentos duros – Metalurgia & Materiais ABM - in Caderno Técnico, v. 60, n. 543, pp. 164-166, 2004.

# **Anexo A**

## Anexo A - Criação do modelo

A construção de um modelo no software utilizado, Abaqus/CAE 6.5, é dividida em módulos que são descritos sucintamente abaixo:

- part: módulo em que são criados os objetos que compõe o modelo, nesse caso são o filme, a camada tratada do substrato, o substrato e o indentador;
- properties: módulo em que se determinam as propriedades dos materiais constituintes de cada objeto;
- assembly: módulo em que são organizados espacialmente os objetos;
- step: módulo em que são determinadas as fases de cada análise, no caso de um ensaio Daimler tem-se o pré-carregamento (carga de 10 kgf), o carregamento (cargas até 250 kgf) e o descarregamento;
- interaction: módulo em que são determinados os tipos de interações entre cada um dos objetos, como propriedades de atrito;
- load: módulo em que são determinadas as forças e as condições de contorno presente no modelo;
- mesh: módulo onde se cria a malha de elementos finitos para cada objeto;
- job: módulo no qual é feita a análise;
- visualization: módulo em que são analisados os resultados;

Cada módulo possui um conjunto de ferramentas próprio que não fica acessível enquanto se usa outro módulo.

Na construção de um modelo, o primeiro passo é decidir o sistema de unidades a ser usado, para isso devem-se inserir os dados de forma coerente, ou seja, mudando todas as unidades do Sistema Internacional de acordo com a unidade alterada. Exemplo: se passarmos a usar milímetros devemos alterar a unidade de força N (Newton) para mN ( $10^{-3}$  N) pois:

$$10^{-3} : N = 10^{-3} \frac{kg \cdot m}{s^2} = \frac{kg \cdot mm}{s^2}$$

nesse caso também deve-se alterar a unidade de tensão e densidade, afinal elas também dependem da unidade de comprimento.

No modelo em desenvolvimento o fator limitante está na Área de Desenho dos objetos onde a menor medida possível é de  $10^{-5}$  unidades de comprimento, como os filmes

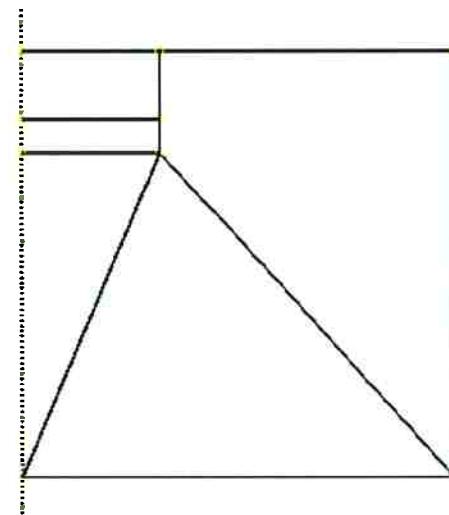
estudados terão medidas a partir de  $1\mu\text{m} = 10^{-3}\text{mm}$  o milímetro pode ser usado como unidade de comprimento e para facilitar serão utilizadas as unidades do “SI (mm)”, esse sistema de unidades é descrito detalhadamente na tabela 1, junto com outros sistemas possíveis.

**Tabela 1 – exemplos de sistemas de unidades coerentes (ABAQUS 6.5 Documentation).**

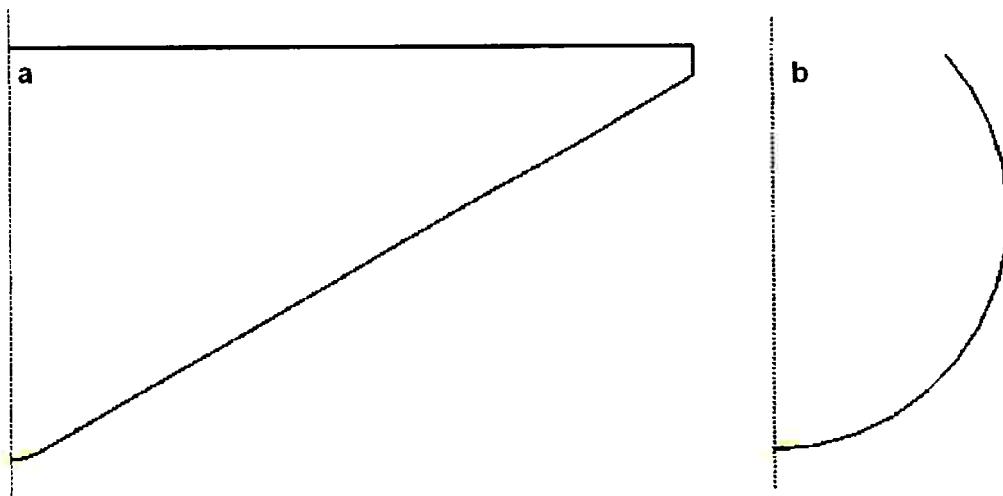
Medida	SI (m)	SI (mm)	US Unit (ft)	US Unit (in)
Comprimento	m	mm	ft	in
Força	N	N	lbf	lbf
Massa	kg	t ( $10^3\text{ kg}$ )	slug	$\text{lbf} \cdot \text{s}^2/\text{in}$
Tempo	s	s	slug	s
Tensão	Pa (N/m <sup>2</sup> )	MPa (N/mm <sup>2</sup> )	lbf/ft <sup>2</sup>	psi
Energia	J	mJ	ft · lbf	in · lbf
Densidade	kg/m <sup>3</sup>	t/mm <sup>3</sup>	slug/ft <sup>3</sup>	$\text{lbf} \cdot \text{s}^2/\text{in}^4$

Então, faz-se o desenho dos objetos, ou importa-se os desenhos de outro software (como AutoCAD). Em ensaios de dureza com indentadores Rockwell esféricos e cônicos podem-se construir modelos axissimétricos (simétricos em torno de um eixo de rotação). Nessa forma de construção os objetos são criados em duas dimensões, o que proporciona maior controle na criação da malha de elementos finitos e diminui notavelmente o tempo de análise.

O desenho da amostra pode ser visto na figura 1. Os desenhos dos penetradores, nas figuras 2 (a) e (b).



**Figura 1 – Imagem do desenho da amostra, as linhas pretas indicam subdivisões no substrato feitas para auxiliar na criação da malha de elementos. A linha pontilhada (vertical, à esquerda do desenho) indica o eixo de simetria da amostra.**



**Figura 2 – Imagem do desenho dos penetradores cônico (a) e esférico (b). A linha pontilhada (vertical, à esquerda de cada desenho) indica o eixo de simetria do penetrador.**

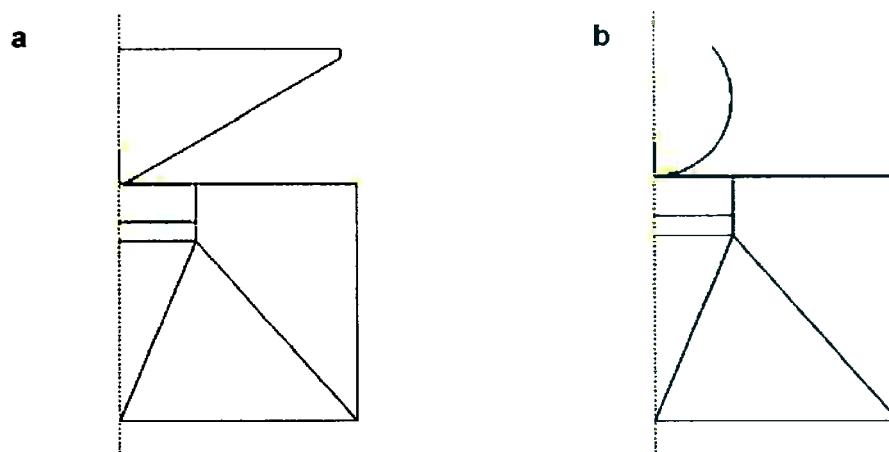
As dimensões da amostra e dos penetradores utilizados podem ser vistos no item 4.1, que descreve as características do modelo.

Seguindo a ordem dos módulos apresentados, são definidas as propriedades dos materiais.

Os indentadores são criados como objetos perfeitamente rígidos, tornando desnecessário descrever as propriedades do material que os constituem. Todas as partes rígidas, como os penetradores, possuem um ponto de referência (RP, reference point) que controla o seu movimento, as suas forças e as suas reações. A posição deste ponto não exerce influência significativa na análise, sendo localizado na base do penetrador.

As propriedades do substrato e do filme são descritas no item 4.2, que descreve as características de cada simulação.

A seguir organiza-se espacialmente o indentador e a amostra e obtém-se as imagens das figuras 3 (a) e (b).

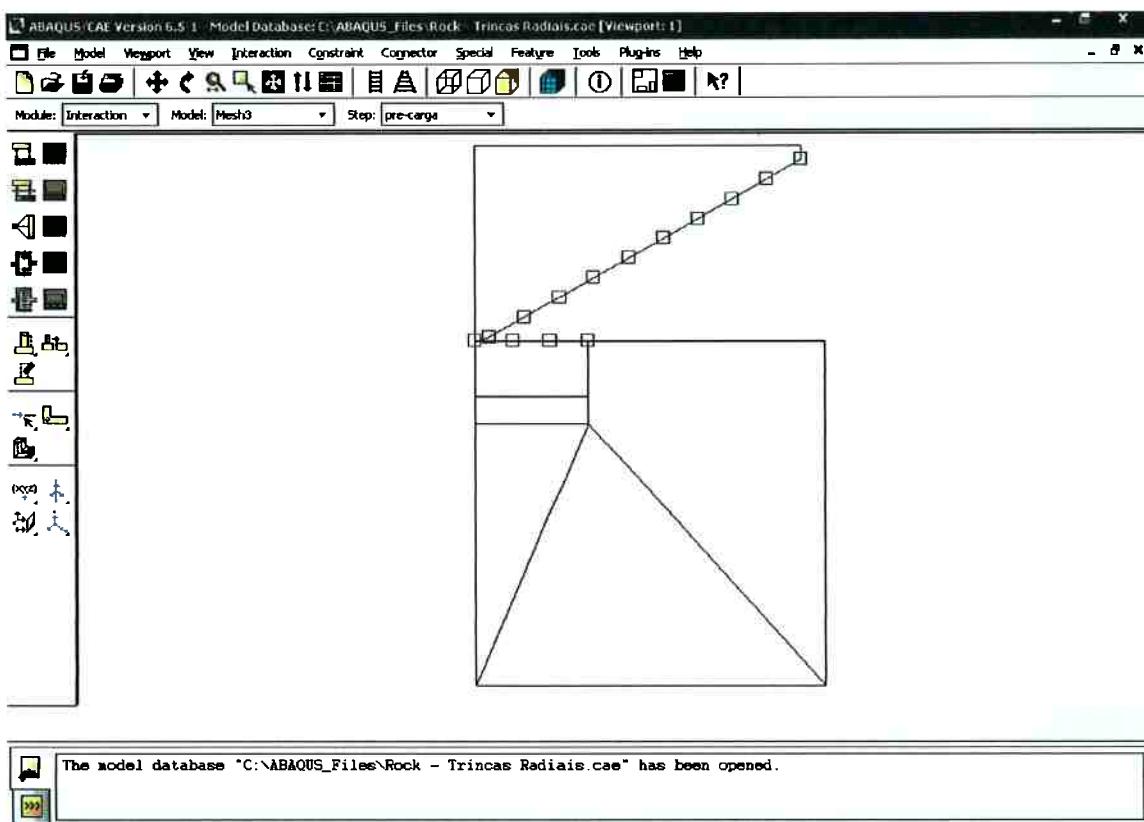


**Figura 3 – Imagem da organização espacial do modelo com penetrador cônico (a) e esférico (b).**

Na seqüência editam-se as etapas da análise, que nesse caso foram: carregamento e descarregamento.

Neste módulo definiu-se o método de resolução matemático do problema em questão. Neste estudo foram desconsideradas as possíveis influências do tempo e optou-se por utilizar o método Standart (implícito) do software, que resolve o problema através de um sistema de equações baseado no equilíbrio mecânico do modelo. Caso o estudo realizado possua variáveis que dependem do tempo, deve-se optar pelo método de resolução Explicit.

No módulo Interaction, definiram-se as superfícies que estariam em contato durante a simulação. Estas são indicadas, na figura 4, pelos quadrados pretos na superfície da amostra e do indentador.

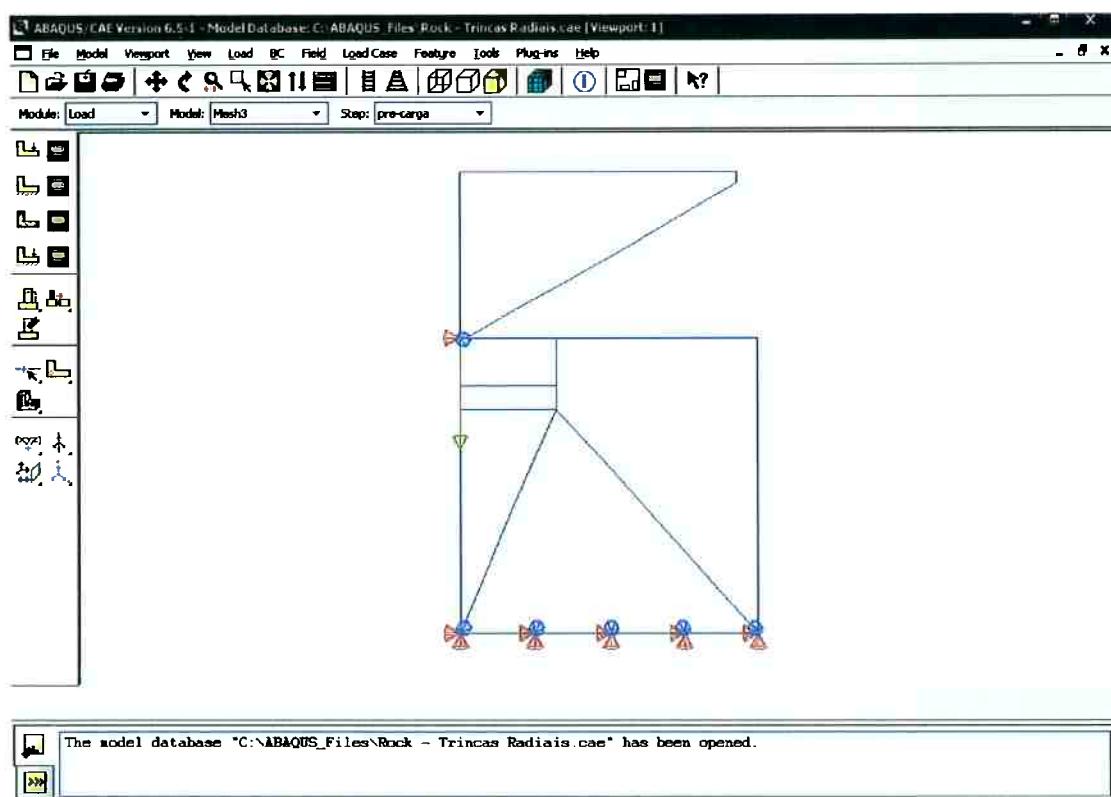


**Figura 4 – Indicação das superfícies em que existirá contato de diferentes objetos durante a análise.**

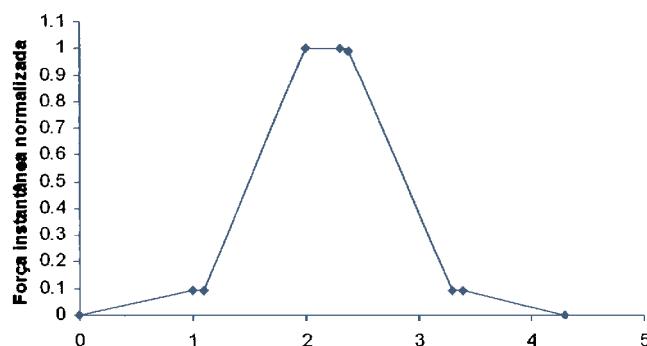
No módulo Load definem-se as condições de contorno (triângulos laranjas e azuis da figura 5) e a carga aplicada ao penetrador (flecha amarela da figura 5), conforme especificações da tabela 2 do item 4.1.

O próximo fato importante é relativo à aplicação das forças. Quando existe contato entre dois corpos distintos encontra-se grande dificuldade na convergência dos cálculos durante o começo da análise. Este fato constituiu um grande problema inicial e a fim de

resolvê-lo foram encontradas duas alternativas. A primeira envolve o acréscimo de uma etapa (step) na análise, nesse step aproximam-se os dois corpos com um deslocamento pequeno do indentador (da ordem de micrômetros) em direção ao filme criando um contato inicial suave. A segunda é o controle da aplicação da força no indentador, no início do carregamento seu aumento deve ser pequeno permitindo simular a aproximação lenta do indentador ao filme, como na alternativa anterior, podendo aumentar a velocidade de carregamento após essa fase inicial. Neste estudo foi utilizada a segunda opção e a intensidade da carga aplicada variou de acordo com o gráfico da figura 6. No instante 2.3 acaba a etapa de carregamento e inicia-se o descarregamento da carga aplicada.



**Figura 5 – Indicação das condições de contorno e cargas aplicadas aos objetos.**



**Figura 6 – Gráfico da força instantânea normalizada em função do tempo de análise.**

O último passo é o desenvolvimento da malha de elementos finitos. A quantidade de elementos finitos presentes na malha é importante por dois motivos: a precisão dos resultados e o tempo de análise. Ambos aumentam consideravelmente com o aumento do número de elementos.

Para determinar a quantidade de elementos ideal são realizadas análises idênticas, mudando apenas a quantidade de elementos, que devem aumentar de quantidade principalmente nas regiões onde há picos de tensão e grandes deformações. Então, compara-se a intensidade dos picos de tensão em função da quantidade de elementos no modelo. Quando o aumento na quantidade de elementos não trouxer mais alterações significativas na intensidade do pico de tensão, atingiu-se a quantidade de elementos ideal.

Neste estudo, utilizaram-se elementos quadrados e triangulares, com nós nos vértices. A malha criada é mostrada nas figuras 9 e 10 do item 4.1 do trabalho.