

FÁBIO RAFFAEL FELICE NETO

SIMULAÇÃO DE MICROINDENTAÇÃO DE  
MATERIAL MULTICAMADA PELO MÉTODO DOS  
ELEMENTOS FINITOS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA - FEMEC

2012

FÁBIO RAFFAEL FELICE NETO

SIMULAÇÃO DE MICROINDENTAÇÃO DE  
MATERIAL MULTICAMADA PELO MÉTODO DOS  
ELEMENTOS FINITOS

**Dissertação** de Mestrado apresentada  
ao Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Mecânica da Universidade Federal  
de Uberlândia, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de **MESTRE EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e  
Vibrações

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sonia A. Goulart de  
Oliveira

Co-orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Henara Lillian Costa  
Murray.

Uberlândia -MG

2012

## DEDICATÓRIA

Dedico a todos que, de alguma forma, me ajudaram a tornar tudo isso possível.

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo a minha família, pois são eles a base de tudo que eu sou e já fiz na vida.

A minha orientadora professora Sonia, por toda a ajuda, companheirismo e por me despertar ainda mais o interesse nos estudos.

A minha co-orientadora, professora Henara, que sempre muito gentilmente esteve empenhada em contribuir com seus conhecimentos e que de prontidão aceitou participar do projeto.

Ao professor José Daniel, que sempre esteve disponível e interessado em ajudar no meu crescimento acadêmico.

Aos colegas da sala FEMEC-CIMNE, que me ajudaram em cada etapa desse processo.

A FAPEMIG que viabilizou a concepção deste trabalho por meio da concessão de bolsa de estudo.

A todos os demais professores, técnicos e finalmente a Universidade Federal de Uberlândia e o Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, que me proporcionaram este grande curso.

NETO, F. R. F. **Simulação de microindentação de material multicamada pelo Método dos Elementos Finitos**. 2012. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Resumo

Materiais multicamadas são amplamente utilizados para melhorar as propriedades tribológicas de componentes mecânicos. Uma forma de se mensurar propriedades mecânicas de materiais multicamadas é através do ensaio de indentação, que apesar de ser largamente utilizado na determinação de propriedades, não permite a análise de campos de tensão no material multicamada. Devido à natureza do problema, os métodos numéricos, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), são de grande utilidade na análise dos campos de tensão e deformação em componentes revestidos. Este trabalho teve por objetivo determinar, usando o MEF, espessuras dos revestimentos que retardem o aparecimento de trincas e a delaminação de um material multicamadas, assim como analisar a influência da profundidade de indentação na resposta do ensaio. O material é composto por uma camada mais externa de carbono tipo diamante (*Diamond-like Carbon - DLC*), uma camada de Nitreto de Cromo (CrN) e um substrato de aço baixo carbono ABNT 1020. Foram simuladas 49 diferentes espessuras, com 7 espessuras para cada um dos revestimentos, conforme as possibilidades de fabricação e baseado em um planejamento. Estas espessuras mais favoráveis foram escolhidas com base em dois critérios objetivos: *i*. Maximizar a distância das tensões máximas de cisalhamento e radial das interfaces entre os materiais, para dentro da camada de CrN, e *ii*. Minimizar o valor da tensão máxima radial localizada dentro da camada composta por DLC. Para analisar a influência da profundidade de indentação foram feitas 5 simulações, com diferentes profundidades de indentação. Nas simulações foi utilizado o Método dos Elementos Finitos Explícito, com auxílio do software STAMPAK®.

Palavras chave: Método dos elementos finitos, indentação, material multicamada.

NETO, F. R. F. **Simulation of a multilayered material microindentation by Finite Element Method**. 2012. MSc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Abstract

Multilayered materials are widely used to improve the tribological properties of mechanical components. One way of measuring mechanical properties of multilayered materials is by indentation testing, which despite being widely used for the determination of properties, does not allow the analysis of stress fields inside the multilayered material. Due to the nature of the problem, numerical methods such as the Finite Element Method (FEM) are very useful in the stress and strain fields analysis on coated parts. This study aimed to determine, using FEM, thicknesses of coatings that delay the appearance of cracks and delamination of a multilayered material, as well as analyze the influence of the indentation depth in the test response. The material is composed of an external layer of *Diamond-like Carbon* (DLC), a nitride chromium layer (CrN) and a low carbon steel ABNT 1020 substrate. Forty nine (49) models of different thickness were simulated, with 7 thickness for each coating, according to manufacturing possibilities and planning. These thicknesses were chosen based on two objective criteria: i. Maximize the distance of the maximum shear and radial stresses from the material interfaces, into the CrN layer, and ii. Minimize the maximum radial stress within the DLC layer. To analyze the influence of indentation depth were made five simulations with different depths of indentation. The simulation used the Explicit Finite Element Method, with the software STAMPAK®.

Keywords: Finite element method, indentation, multilayered material.

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b><math>A</math></b>	Área de contato projetada.
<b><math>E</math></b>	Módulo de elasticidade da amostra.
<b><math>E_{ef}</math></b>	Módulo de Elasticidade efetivo.
<b><math>E_i</math></b>	Módulo de elasticidade do indentador.
<b><math>f(\mathbf{u}, t)</math></b>	Forças externas aplicadas a um corpo.
<b><math>H</math></b>	Dureza medida em GPa.
<b><math>h</math></b>	Profundidade de penetração do indentador no ensaio de indentação instrumentada.
<b><math>h_f</math></b>	Profundidade final da marca deixada no ensaio de indentação instrumentada.
<b><math>h_{max}</math></b>	Profundidade máxima de penetração no ensaio de indentação instrumentada.
<b><math>k</math></b>	Constante de encruamento.
<b><math>M</math></b>	Matriz massa.
<b><math>m</math></b>	Coefficiente angular de uma reta tangente a um ponto 20% abaixo do máximo da curva de descarregamento do ensaio de indentação instrumentada.
<b><math>n</math></b>	Expoente de encruamento.
<b><math>P</math></b>	Carga aplicada no ensaio de indentação instrumentada.
<b><math>p(\mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}})</math></b>	Forças internas aplicadas a um corpo.
<b><math>P_{max}</math></b>	Carga máxima do ensaio de indentação instrumentada.
<b><math>S</math></b>	Rigidez de contato.

$t_n$	Instante de tempo qualquer $n$ .
$t_{n+1}$	Instante de tempo seguinte a $t_n$ .
$u$	Vetor deslocamento.
$\dot{u}$	Vetor velocidade.
$\ddot{u}$	Vetor aceleração.
$\beta$	Parâmetro adimensional utilizado para explicar desvios de rigidez.
$\Delta t_{n+1}$	Diferencial de tempo de um passo da resolução do problema.
$\nu$	Coefficiente de Poisson da amostra.
$\nu_i$	Coefficiente de Poisson do indentador.
$\rho$	Densidade.
$\sigma_{rz}$	Tensão cisalhante.
$\sigma_{rr}$	Tensão radial.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 2.1:** Comportamento do revestimento em relação à deformação do substrato macio. (MANHABOSCO, 2009)

**Figura 2.2:** Métodos para medir espessura de revestimentos tribológicos. (WEISS, 1991)

**Figura 2.3:** Representação do processo CVD. (HOLMBERG, 2009)

**Figura 2.4:** Zonas de reação no processo CVD. (Adaptado de HOLMBERG, 2009)

**Figura 2.5:** Representação da deposição CVD na superfície.

**Figura 2.6:** Diagrama esquemático do PECVD. (KIM *et. al*, 2003)

**Figura 2.7:** Formas de atomização para o processo PVD. (HOLMBERG, 2009)

**Figura 2.8:** Diagrama esquemático do processo de deposição *sputtering*. (MOSHFEGH, 2009)

**Figura 2.9:** Propagação de trincas do processo CVD e PVD. (SCHLUND, 1999)

**Figura 2.10:** Modos de abertura de trincas. (ROYLANCE, 2001)

**Figura 2.11:** Diagrama ternário para o carbono amorfo. (DECHANDT, 2005)

**Figura 2.12:** Diagrama esquemático do ensaio de indentação instrumentada. (HOLMBERG, 2009)

**Figura 2.13:** Representação esquemática plana da geometria da amostra após um ciclo carregamento/descarregamento. Adaptado de Holmberg (2009)

**Figura 2.14:** Gráfico do ciclo carregamento/descarregamento.

**Figura 4.1:** Desenho do primeiro modelo proposto.

**Figura 4.2:** Desenho do segundo modelo proposto.

**Figura 4.3:** Malha do primeiro modelo com zoom da área selecionada em vermelho.

**Figura 4.4:** Malha do segundo modelo.

**Figura 5.1:** Gráfico do ensaio de descarregamento experimental.

**Figura 5.2:** Gráfico do ensaio de descarregamento simulado.

**Figura 5.3:** Deformação plástica efetiva para profundidade de indentação de 10% da espessura da camada.

**Figura 5.4:** Gráfico da posição da tensão radial para cada simulação.

**Figura 5.5:** Distribuição da tensão radial na simulação 7.

**Figura 5.6:** Posição das tensões radiais máxima e mínima na simulação 7.

**Figura 5.7:** Distribuição das tensões cisalhantes na simulação 7.

**Figura 5.8:** Posição da tensão cisalhante máxima para a simulação 7.

**Figura 5.9:** Distribuição das tensões cisalhantes na simulação 43.

**Figura 5.10:** Posição da tensão cisalhante para as 7 variações de CrN e espessura de 0,58  $\mu\text{m}$  para o DLC.

**Figura 5.11:** Posição da tensão cisalhante para as 7 variações de CrN e espessura de 0,86  $\mu\text{m}$  para o DLC.

**Figura 5.12:** Posição da tensão cisalhante para as 7 variações de CrN e espessura de 1,15  $\mu\text{m}$  para o DLC.

**Figura 5.13:** Posição da tensão cisalhante para as 7 variações de CrN e espessura de 1,44  $\mu\text{m}$  para o DLC.

**Figura 5.14:** Posição da tensão cisalhante para as 7 variações de CrN e espessura de 1,72  $\mu\text{m}$  para o DLC.

**Figura 5.15:** Posição da tensão cisalhante para as 7 variações de CrN e espessura de 2,01  $\mu\text{m}$  para o DLC.

**Figura 5.16:** Posição da tensão cisalhante para as 7 variações de CrN e espessura de 2,30  $\mu\text{m}$  para o DLC.

**Figura 5.17:** Distribuição das tensões radiais na camada de DLC na simulação 7.

**Figura 5.18:** Posição das tensões radiais máxima e mínima na camada de DLC na simulação 7.

**Figura 5.19:** Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 0,58  $\mu\text{m}$  da camada de DLC.

**Figura 5.20:** Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 0,86  $\mu\text{m}$  da camada de DLC.

**Figura 5.21:** Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 1,15  $\mu\text{m}$  da camada de DLC.

**Figura 5.22:** Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 1,44  $\mu\text{m}$  da camada de DLC.

**Figura 5.23:** Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 1,72  $\mu\text{m}$  da camada de DLC.

**Figura 5.24:** Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 2,01  $\mu\text{m}$  da camada de DLC.

**Figura 5.25:** Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 2,30  $\mu\text{m}$  da camada de DLC.

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1.1:** Características típicas dos principais métodos de deposição de revestimentos. (HOLMBERG, 2009)

**Tabela 2.1:** Propriedades dos diferentes tipos de filme à base de carbono. (VICENTE, 2005)

**Tabela 2.2:** Processo de deposição de filmes de carbono sem hidrogênio. (VICENTE, 2005)

**Tabela 2.3:** Processo de deposição de filmes de carbono com hidrogênio. (VICENTE, 2005)

**Tabela 4.1:** Propriedades utilizadas nas simulações.

**Tabela 4.2:** Organização dos ensaios.

**Tabela 4.3:** Relação entre número de camadas e espessura

**Tabela 5.1:** Valores de dureza para diferentes profundidades de indentação.

## Sumário

CAPITULO I.....	1
Introdução.....	1
CAPITULO II.....	4
Revestimentos Tribológicos .....	4
2.1. Materiais multicamadas.....	5
2.2. Adesividade dos revestimentos .....	6
2.3. Espessura dos revestimentos .....	8
2.4. Métodos de deposição de revestimentos tribológicos .....	9
2.4.1. Deposição Química de Vapor (CVD).....	10
2.4.2. Deposição Física de Vapor (PVD) .....	12
2.4.3. Comparação entre os processos CVD e PVD.....	14
2.5. Mecanismo de Falha da camada tribológica.....	15
2.6. Material do revestimento: <i>Diamond-like Carbon</i> (DLC).....	16
2.7. Caracterização dos revestimentos por ensaio de indentação instrumentada .....	19
2.7.1. Determinação das propriedades mecânicas por meio da curva de carregamento e descarregamento.....	20
CAPÍTULO III .....	24
Método dos Elementos Finitos (MEF) .....	24
3.1. Solução explícita .....	25
CAPÍTULO IV .....	27
Metodologia.....	27
4.1. Simplificações e fator de escala.....	27
4.2. Parâmetros utilizados.....	28
4.3. Modelos em Elementos Finitos .....	29

4.3.1. Modelos discretizados .....	29
4.3.2. Malha utilizada nos modelos .....	32
4.3.2.1. Teste de malha .....	32
4.3.2.2. Malha do primeiro modelo .....	32
4.3.2.3. Malha do segundo modelo.....	33
4.4. Determinação da Dureza da camada de CrN.....	34
4.5. Planejamento das simulações .....	35
CAPÍTULO V - Resultados e Discussão.....	38
5.1. Validação do MEF.....	38
5.2. Influência da profundidade de indentação nas respostas.....	40
5.3. Análise de Tensões .....	42
5.3.1. Posição da tensão Radial ( $\sigma_{rr}$ ).....	42
5.3.2. Posição da Tensão Cisalhante ( $\sigma_{rz}$ ) .....	45
5.3.3. Valor da tensão radial máxima ( $\sigma_{rr}$ ) na camada de DLC.....	51
CAPÍTULO VI - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros .....	57
6.1. Conclusões.....	57
6.2. Sugestões para trabalhos futuros .....	58
CAPÍTULO VII - Referências Bibliográficas .....	59
APÊNDICE I - Algoritmo em MatLab® para determinar o coeficiente angular da reta.....	63

# CAPITULO I

## Introdução

Uma forma muito eficiente de se melhorar as propriedades tribológicas de um componente é a utilização de um revestimento tribológico. Este tipo de revestimento é cada vez mais usado em aplicações comuns de componentes mecânicos de custo relativamente baixo, pois o desenvolvimento tecnológico proporciona uma maior facilidade na produção desses revestimentos, pela diminuição dos custos de produção.

Revestimentos tribológicos são, segundo Holmberg (2009), filmes finos o suficiente para alterar o contato tribológico do componente mecânico com o meio externo, mas sem influenciar as propriedades do componente como uma camada independente de material, ou seja, uma camada de material tão espessa não permitiria que o substrato, onde foi depositada, participe do contato tribológico. Este tipo de tecnologia é amplamente estudado principalmente para substratos duros, onde deformações plásticas no substrato pouco ocorrem. Porém o estudo de materiais multicamadas para substratos macios é muito importante, pois este tipo de substrato pode sofrer deformações que o revestimento não é capaz de suportar, ocasionando o colapso.

Uma das formas de mensurar propriedades mecânicas dos revestimentos tribológicos é o ensaio de indentação instrumentada, onde um indentador de geometria definida pressiona a superfície do corpo de prova feito do material multicamada e gera uma curva de Carregamento *versus* Profundidade de indentação. A partir desta curva é possível determinar algumas propriedades mecânicas do revestimento. É importante observar a influência da profundidade de

indentação na resposta do ensaio, pois quanto mais profunda for a indentação, maior será a influencia do substrato macio na resposta do ensaio. (OLIVER e PHARR, 2003)

Revestimentos tribológicos são regiões de alta energia e costumam apresentar defeitos devido a sua deposição e também falhas por abertura de trincas e delaminação, causadas pelo acúmulo de tensões normais e cisalhantes nas interfaces entre as camadas e na superfície do componente. Geralmente são depositadas camadas intermediárias destinadas a suportar estes campos de tensões e é então interessante que a configuração das espessuras das camadas situe todas as máximas tensões dentro destas camadas.

Uma forma de se mensurar propriedades mecânicas de um componente mecânico com revestimento ou mesmo apenas do revestimento é o ensaio de indentação instrumentada, onde um penetrador de geometria definida pressiona a superfície da amostra, gerando uma marca de indentação. A partir da marca e das trincas que por ventura apareçam na superfície é possível fazer uma análise qualitativa do componente. A análise quantitativa das propriedades mecânicas do componente pode ser feita a partir dos dados de carregamento/descarregamento, profundidade de indentação e área de indentação projetada.

Um estudo tribológico sobre materiais multicamadas demanda um controle muito preciso sobre as condições de cada ensaio, o que torna interessante a utilização de métodos numéricos para a execução dos testes. Nos métodos numéricos, no caso deste estudo o Método dos Elementos Finitos (MEF), é possível fixar condições e alterar apenas os parâmetros que se deseja analisar.

Apesar das pesquisas nesta linha serem relativamente recentes, grandes foram os avanços na modelagem e obtenção de propriedades dos filmes por meio da simulação em elementos finitos de indentação instrumentada (BÖHME *et. al.*, 2007; DAO *et. al.*, 2001). Alguns estudos já consideram também os efeitos do atrito entre indentador e peça, os defeitos de ponta do indentador. (RODRIGUEZ, 2010)

Para que um estudo baseado em simulações tenha resultados confiáveis, é necessária a validação do modelo. Uma das formas de validação consiste em simular numericamente as condições de um ensaio real e comparar os resultados, para garantir que mesmo com as aproximações feitas os resultados são suficientes para a análise proposta. Neste trabalho foram gerados modelos numéricos

baseados nos dados experimentais de Lara (2012) para validar o modelo em MEF proposto.

Este trabalho tem por objetivo propor um modelo em elementos finitos que simula o ensaio de indentação instrumentada em um material multicamada composto por um substrato de aço baixo carbono (ABNT 1020), uma camada de CrN e uma camada de DLC. Em todas as simulações, os materiais das camadas foram considerados isotrópicos e elásticos-lineares e o substrato de aço foi modelado como isotrópico e elasto-plástico. O modelo permite a análise das intensidades e posições das tensões radiais e cisalhantes e a partir dessa análise objetiva-se propor uma combinação de espessuras das camadas que retarde o aparecimento de trincas e, por conseguinte, a falha do componente.

Os resultados indicam que para retardar o aparecimento das trincas superficiais advindas de tensões radiais e a delaminação decorrente das tensões cisalhantes, a espessura da camada intermediária deve ser maior e que existe uma proporção ideal entre as espessuras.

Em relação à análise da profundidade de indentação, os resultados apontam que para profundidades de indentação de até 30% da espessura da camada de revestimento tribológico, as características do substrato pouco influenciam as respostas do ensaio. Para profundidades de indentação maiores, as propriedades do substrato influenciam nos resultados do ensaio.

## CAPITULO II

### Revestimentos Tribológicos

Revestimentos tribológicos são camadas de materiais suficientemente finas para que o substrato participe do contato tribológico, mas sem que esta camada atue como uma camada independente de material. Desta forma, ensina Holmberg (2009):

*“Nós devemos tomar como nossa definição de revestimentos tribológicos aqueles que são suficientemente finos para que o material do substrato desempenhe funções nas performances do atrito e desgaste. Assim, nós excluimos revestimentos que são tão espessos que há pequena ou nenhuma influência do substrato no comportamento tribológico - o revestimento efetivamente atua como um material independente.”*

A superfície do material e o revestimento tribológico escolhido devem funcionar como um sistema único, cujos parâmetros serão otimizados para que o sistema composto atenda, da melhor forma possível, aos objetivos do projeto, conforme Meldford (1991) *“a concepção da superfície e substrato juntos, como um sistema, para fornecer uma melhoria na performance e custo-benefício que nenhum deles poderia fornecer sozinho”*.

## 2.1. Materiais multicamadas

Para mesclar propriedades de interesse de projeto de diferentes materiais, em um único componente, é possível montar um revestimento tribológico com multicamadas sobrepostas. Esta metodologia apresenta várias vantagens, as três principais, segundo Holmberg (2009), são:

1. Com a adição de mais camadas é possível melhorar a adesão do revestimento tribológico e também fazer com que a transição de propriedades não seja muito brusca, o que poderia proporcionar perda de qualidade do revestimento.
2. Ao depositar camadas com diferentes propriedades mecânicas, ou mesmo semelhantes, pode-se conseguir uma melhor distribuição de tensões e com isto a prevenção de falhas do revestimento.
3. Torna-se possível a composição de diferentes características de cada camada sobreposta, como resistência a corrosão, adesão ao substrato, isolamento térmico e condutividade elétrica do conjunto.

Apesar de um material multicamadas conseguir melhor adesão do revestimento ao substrato e uma transição gradual de propriedades, se faz necessário o estudo das interações referentes às propriedades mecânicas macroscópicas. Ao considerar um substrato macio revestido por um material de propriedades semelhantes, as deformações plásticas sofridas pelo substrato serão acompanhadas pelo revestimento, que suportará esses deslocamentos. Em uma situação onde o substrato e o revestimento são duros, nenhum dos dois sofrerá grandes deformações.

Porém, em uma condição mais crítica, quando o revestimento é duro e o substrato é macio, a fragilidade do revestimento não permite que este suporte a deformação permanente sofrida pelo substrato, gerando trincas como uma forma de dissipação de energia. A Figura 2.1 representa esquematicamente o comportamento de um material duro sendo usado como revestimento de um componente de substrato macio, quando submetido a uma deformação plástica.

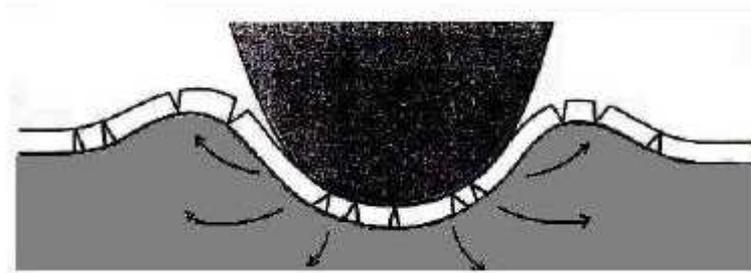


Figura 2.1: Comportamento do revestimento em relação à deformação do substrato macio.(MANHABOSCO, 2009)

## 2.2. Adesividade dos revestimentos

A adesão pode ser conceituada como a capacidade de um revestimento de se manter preso ao substrato quando submetido às condições de trabalho a que é proposto o componente. Segundo a *American Society for Testing Materials (ASTM)*, adesão é “o estado no qual duas superfícies são mantidas juntas por forças interfaciais que podem consistir de forças de valência, intertravamento ou ambas”

Esta propriedade é crucial, pois a delaminação de partes do revestimento, além de retirar a proteção do componente, adiciona ao sistema tribológico um grânulo de material muito duro, que pode atuar como abrasivo. Em máquinas rotativas, a delaminação ocasionará o rápido colapso do componente mecânico pelo processo progressivo de abrasão e destacamento de uma maior parte da camada de revestimento.

A adesividade é uma propriedade que não depende somente da afinidade química entre os materiais, principalmente porque uma região de interface pode sofrer maiores tensões e falhar primeiro que outras regiões, sem que isso signifique que a união química seja fraca. Existem diversas formas de caracterizar e avaliar a adesividade de revestimentos tribológicos, sendo que as principais são:

**Testes de *Pull-off*:** o revestimento e o substrato são colados em hastes onde é aplicada uma força axial de tração, a fim de separar o substrato do revestimento. Os resultados se baseiam na resposta de força que foi necessária para que o material seja arrancado. Este teste possui limitações, pois somente será capaz de medir a força necessária para arrancar revestimentos que tenham uma pior

adesividade com o substrato que a adesividade entre as hastes e o componente mecânico. (HOLMBERG, 2009)

**Método de forças de corpo (*Body force methods*):** consiste na aplicação de forças de aceleração ou desaceleração nos revestimentos, por centrifugação ou ultrassom (VALLI *et al.*, 1986).

**Imagem Acústica (*Acoustic Imaging*):** este processo trabalha com microscópios óticos e acústicos, avaliando as imagens dos revestimentos e assim determinando regiões de pior adesividade. O microscópio acústico emite pulsos de curta frequência a um transdutor piezoelétrico, produzindo uma onda que é focada por lentes e bombardeada contra o corpo reflexivo. O pulso refletido é convertido em sinal elétrico que é convertido em uma micrografia. Este tipo de avaliação dos revestimentos tribológicos é apenas qualitativa. (HOLMBERG, 2009)

**Ensaio de indentação:** é uma forma bastante comum de se avaliar a adesividade de revestimentos devido ao seu custo benefício. Consiste na aplicação de uma carga definida a priori sobre o revestimento por meio de um indentador de raio de ponta definido. Depois de retirado o indentador, pode-se observar a formação das trincas na região de indentação e nas suas proximidades e então estabelecer um critério qualitativo. É também possível uma análise quantitativa em relação à carga aplicada e à geometria do indentador. A limitação deste método está em apenas apresentar as trincas existentes na superfície do revestimento, sendo que a delaminação pode ocorrer no interior sem que existam trincas superficiais aparentes. (HOLMBERG, 2009)

**Ensaio de riscamento:** este tipo de ensaio também utiliza um indentador, porém neste caso o indentador caminha na superfície da amostra enquanto a força é aplicada na direção normal à superfície, gerando um risco. Deste ensaio pode-se obter a carga crítica, que é a carga necessária para que se inicie a falha por delaminação. As respostas obtidas deste ensaio dependem do material do indentador, do acabamento e geometria da superfície e até mesmo a umidade do ar pode influenciar os resultados. (HOLMBERG, 2009)

### 2.3. Espessura dos revestimentos

A espessura é um fator crítico para revestimentos tribológicos, pois o sistema formado pelo substrato e pelo revestimento terá diferentes propriedades de dureza, adesividade e distribuição de tensões conforme se muda a espessura. Encontrar uma espessura de revestimento que trabalhe de forma satisfatória é tão importante quanto escolher quais serão os materiais que farão parte do revestimento.

Existem diversas formas de mensurar a espessura de um revestimento, conforme mostra a Figura 2.2. Uma forma muito utilizada para determinação dessa espessura é o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), que bombardeia a amostra com um feixe eletrônico que interage com os elétrons dos átomos da amostra e gera uma imagem bidimensional da seção transversal. Esta forma de mensurar revestimentos foi utilizada no procedimento experimental de *Lara et. al.* (2012).

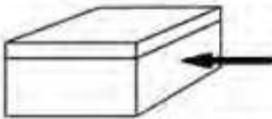
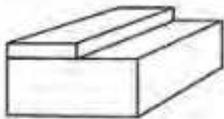
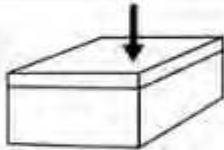
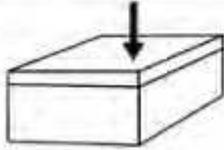
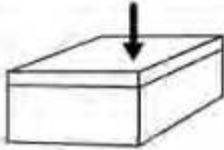
Métodos Óticos		Metalografia SEM Holografia
Métodos de Remoção		Coulométrico Calibrador Craterização esferoidal
Métodos Eletromagnéticos		Fluxo Magnético Corrente de Foucault Capacidade
Métodos de Espalhamento		Retroespalhamento beta Ultrasom
Métodos de Excitação		Flourescência raios-X

Figura 2.2: Métodos para medir espessura de revestimentos tribológicos. (WEISS, 1991)

## 2.4. Métodos de deposição de revestimentos tribológicos

Existem diversas formas de se depositar um revestimento sobre um substrato, conforme as características de cada material do revestimento e do substrato e também os resultados que se deseja. As principais formas de deposição são:

- Processos de deposição no estado gasoso.
- Processos de deposição de soluções.
- Processos de deposição de fundidos ou semi-fundidos.
- Processos de deposição no estado sólido.

Para escolher o processo adequado de deposição do revestimento, é necessária uma análise das características típicas de cada processo. Estas características são apresentadas na Tabela 1.1.

Para este trabalho, os métodos de deposição aplicados são pelo estado gasoso, divididos em Deposição Química de Vapor (CVD) e Deposição Física de Vapor (PVD).

Tabela 1.1. Características típicas dos principais métodos de deposição de revestimentos (HOLMBERG, 2009)

	Processos no estado Gasoso					Processos em solução		Processos em estado fundido ou semi fundido		
	PVD	PAPVD	CVD	PECVD	Implantação Iônica	Sol-Gel	Eletro-galvanização	Laser	Spray Térmico	Soldagem
Taxa de deposição (kg/h)	Até 0,5 por fonte	Até 0,2	Até 1	Até 0,5		0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-1	0,1-10	3,0-50
Espessura do revestimento ou profundidade de tratamento (µm)	0,1-1000	0,1-100	0,5-2000	1-20	0,01-0,5	1-10	10-500	50-2000	50-1000	1000-10000
Tamanho do componente	Limitado pelo tamanho da câmara					Limitado pelo banho de solução		Pode ser limitado pelo tamanho da câmara		
Temperatura de deposição ou tratamento do substrato (°C)	50-500	25-500	150-12000	150-700	50-200	25-1000	25-100	200-2000	100-800	500-1200
Material do substrato	Metais, cerâmicos e polímeros	Metais e cerâmicos	Metais e cerâmicos	Metais e cerâmicos	Metais, cerâmicos e polímeros	Metais, cerâmicos e polímeros	Metais, cerâmicos e polímeros	Metais		
Pré-tratamento	Mecânico/ químico	Mecânico/ químico mais bombardeamento de íons	Mecânico/ químico	Mecânico/ químico mais bombardeamento de íons	Químico mais bombardeamento de íons	Decapagem e/ou limpeza química	Limpeza química e decapagem	Limpeza mecânica e química		
Tratamento posterior	Nenhum	Nenhum	Alívio de tensão no substrato	Nenhum	Nenhum	Alta temperatura	Nenhum/ tratamento térmico	Nenhum/ alívio de tensão no substrato		Nenhum
Uniformidade do revestimento	Boa	Boa	Muito boa	Boa	Linha de visão	Razoável/ boa	Razoável/ boa	Razoável	Variável	Variável
mecanismo de adesão	Atômico	Atômico mais difusão	Atômico	Atômico mais difusão	Integral	Forças de superfície		Mecânica/ Química/ Metalúrgica		

### 2.4.1. Deposição Química de Vapor (CVD)

Este processo consiste na introdução de um gás contendo o material a ser depositado em uma câmara de reação, onde reage e se fixa à superfície do substrato, conforme representado na Figura 2.3. Este processo normalmente depende de altas temperaturas (800-1200°C), que propiciam a existência de transformações de fase, precipitações, recristalizações e crescimento de grão, que auxiliarão uma melhor adesão.

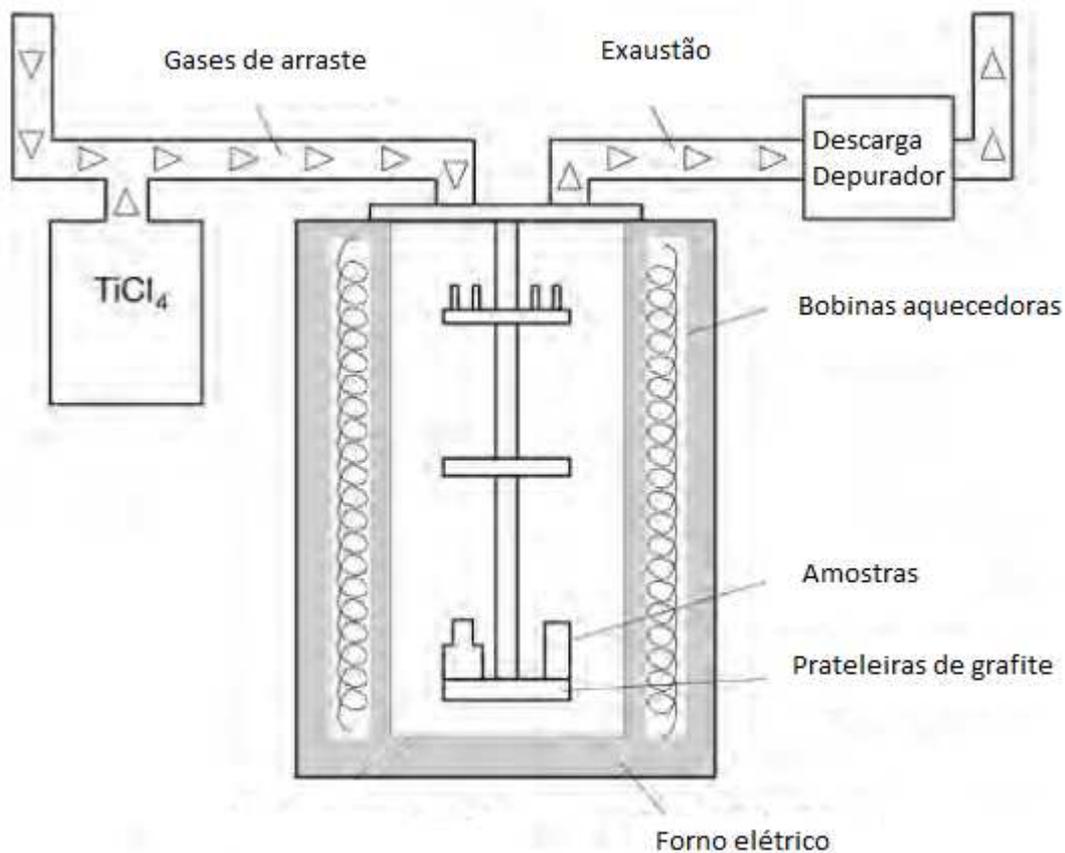


Figura 2.3: Representação do processo CVD. (HOLMBERG, 2009)

Neste processo são utilizados baixos níveis de pressão (1 Pascal ou menos). Este tipo de revestimento tem como principais características uma boa adesividade, uniformidade e densidade da camada produzida, devido a difusão e adsorção das partículas de revestimento sobre a superfície, dentro da região estagnante. A camada estagnante e as demais, juntamente com o fluxo de gás, são representadas na Figura 2.4. O fenômeno de difusão e adsorção sobre a superfície pelas partículas do material a ser depositado está representado na Figura 2.5.

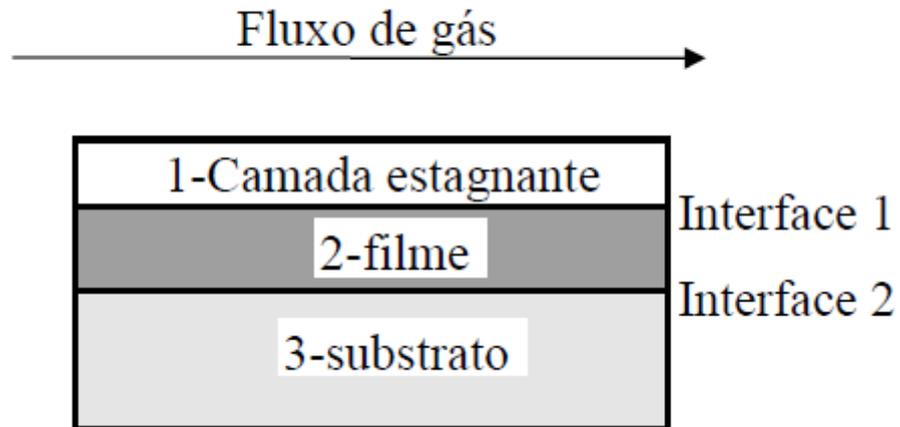


Figura 2.4: Zonas de reação no processo CVD. (Adaptado de HOLMBERG, 2009)

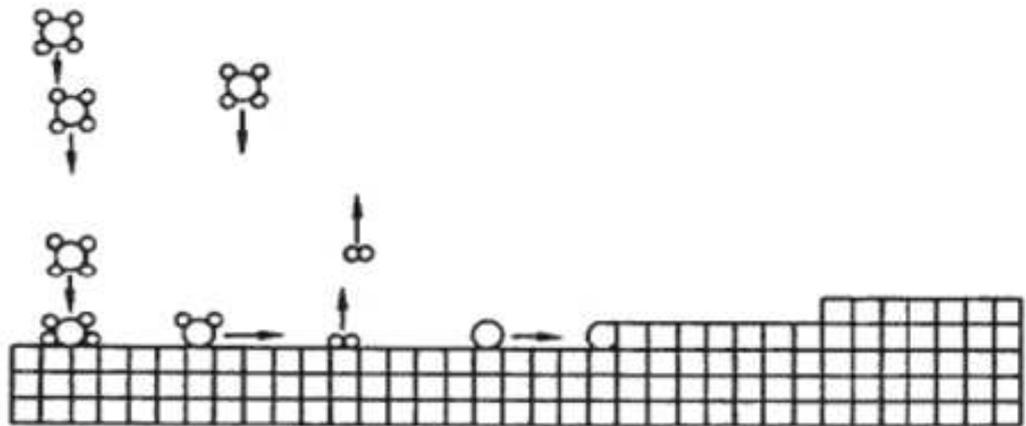


Figura 2.5: Representação da deposição CVD na superfície.

É possível diminuir as temperaturas necessárias para a deposição do filme, adicionando fontes energéticas diferentes, como o laser ou um canhão de elétrons. Esta diminuição na temperatura é benéfica ao processo, já que altas temperaturas geram grandes tensões residuais e eventualmente também podem gerar trincas térmicas. Para o estudo em questão, o método de deposição tem por fonte de energia o plasma, sendo denominado Deposição Química de Vapor Assistida por Plasma (PECVD).

O PECVD utiliza uma descarga elétrica que passa pelo gás onde se encontram as partículas a serem depositadas e o substrato, assistindo o processo de deposição do filme, conforme esquema da Figura 2.6.

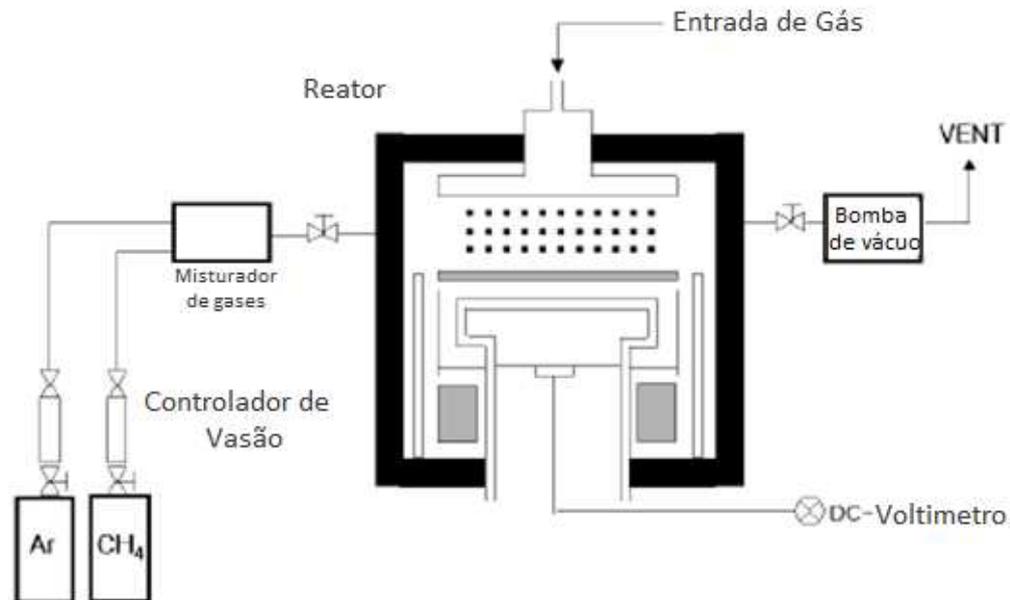


Figura 2.6: Diagrama esquemático do PECVD. (KIM *et. al*, 2003)

#### 2.4.2. Deposição Física de Vapor (PVD)

O processo PVD consiste na vaporização ou atomização de uma fonte de material que é bombardeada contra o substrato, formando o revestimento. Existem diversas formas de processo PVD, divididas segundo a forma como o material do revestimento é atomizado, conforme mostrado na Figura 2.7.

A atomização no processo PVD pode ter fonte energética térmica ou cinética. O processo que envolve energia térmica é denominado vaporização da fonte de material e o que envolve energia cinética é denominado *Sputtering*.

No *Sputtering* o material a ser depositado (alvo) é bombardeado por um feixe de íons, que arranca partículas e as arremessa contra o substrato onde se quer o revestimento. O choque das partículas contra a superfície tem grande energia e faz com que estas partículas fiquem aderidas a ela. O diagrama esquemático do processo é representado na Figura 2.8.

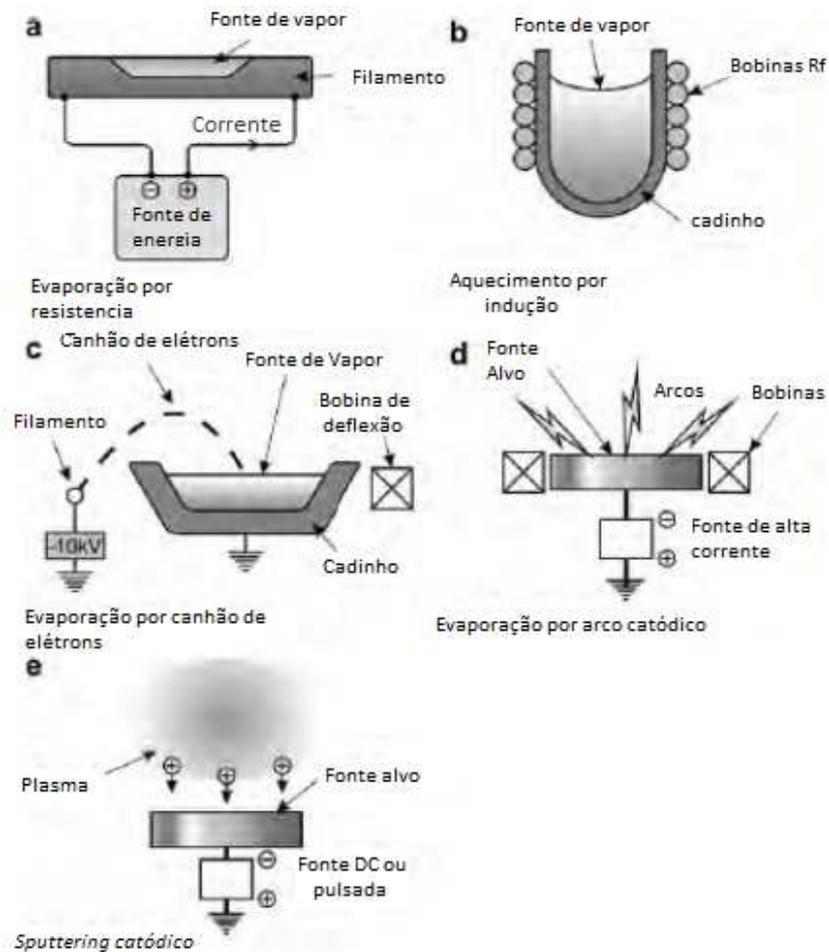


Figura 2.7: Formas de atomização para o processo PVD. (HOLMBERG, 2009)

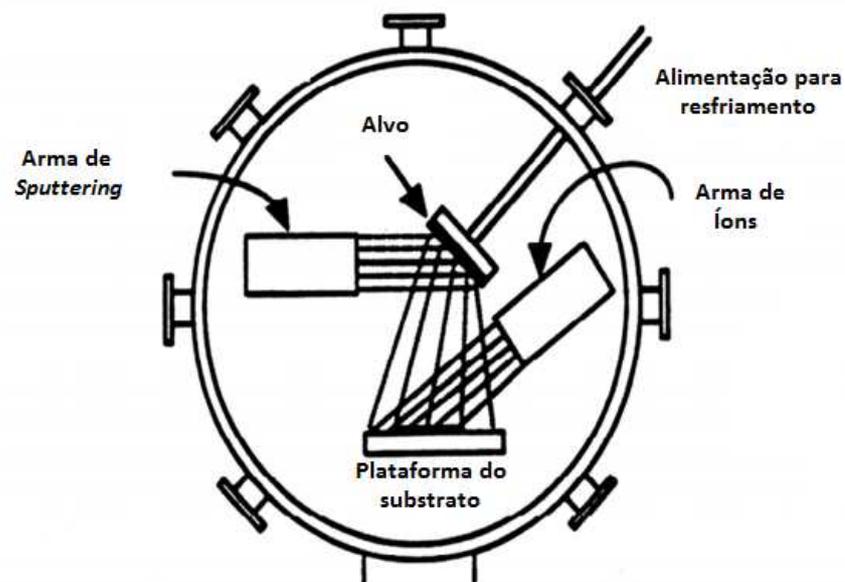


Figura 2.8: Diagrama esquemático do processo de deposição *sputtering*. (MOSHFEQH, 2009)

De forma geral, pode-se dizer que o processo PVD pode ser utilizado em um grande número de materiais de revestimentos, pois existem diferentes maneiras de atomização. O processo não deixa tensões residuais térmicas pois não são necessárias elevadas temperaturas para sua obtenção, porém a camada criada é pouco uniforme, devido ao choque desordenado de partículas sobre a superfície a ser revestida.

### 2.4.3. Comparação entre os processos CVD e PVD

Em uma comparação entre os processos, pode-se constatar que o processo CVD possui melhor adesividade que o PVD devido principalmente as reações químicas de adsorção e difusão que ocorrem para que o filme seja formado. O CVD também cria uma camada mais uniforme na superfície que o PVD, relacionada a forma desordenada da deposição física.

O PVD tem melhores características em relação à quantidade de materiais que podem ser depositados, pois existem diversas formas de atomizar vários tipos de materiais. Este processo não produz tensões residuais térmicas como o CVD. A Figura 2.9 mostra um material multicamadas onde a trinca propaga na camada depositada por CVD e para ao atingir a camada depositada por PVD. No processo CVD é necessário o aquecimento do substrato onde será depositado o filme, o que ocasiona tensões térmicas e pode gerar trincas térmicas.

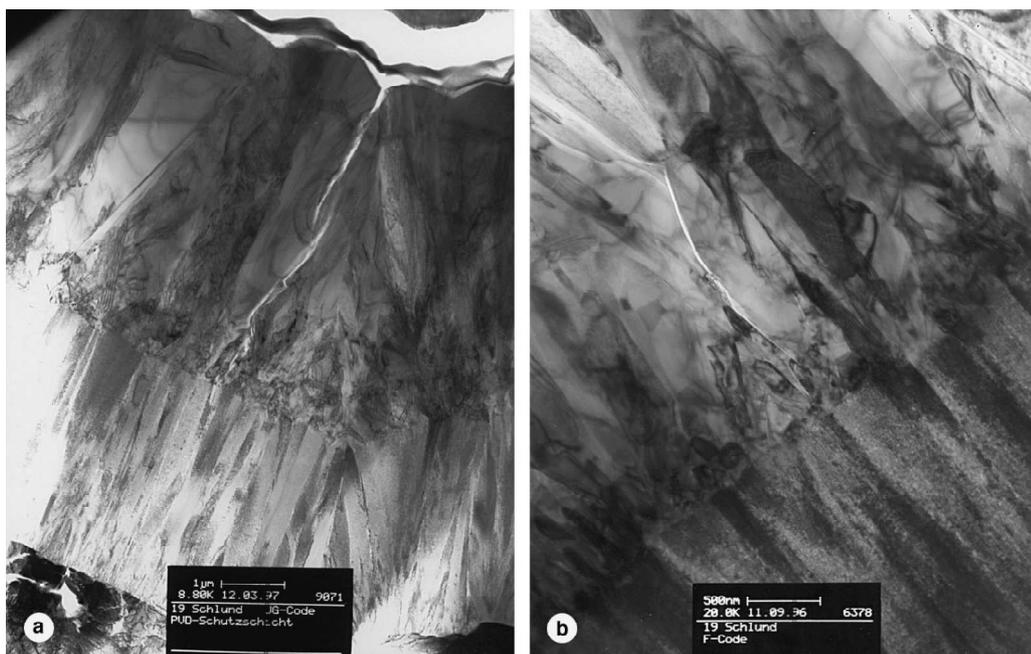


Figura 2.9: Propagação de trincas do processo CVD e PVD. (SCHLUND, 1999)

## 2.5. Mecanismo de Falha da camada tribológica

Camadas tribológicas são geralmente frágeis e falham por fratura, tornando importante o estudo do mecanismo de abertura de trincas, para tentar prever e retardar seu aparecimento.

Quando um componente mecânico é submetido a uma tensão, a energia imposta precisa ser dissipada. Se o corpo tem restrições quanto ao movimento e não consegue suportar as deformações que seriam geradas por este campo de tensão, ocorre a falha por trincamento, que é a ruptura do material em pequena escala. Existem basicamente três modos de abertura de trinca, conforme mostra a Figura 2.10.

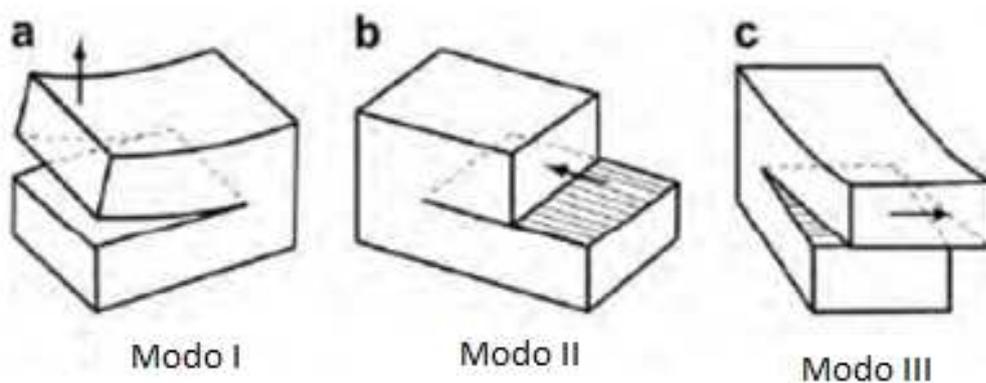


Figura 2.10: Modos de abertura de trincas (HOLMBERG, 2009)

- **Modo I:** A trinca se propaga devido a uma força normal ao plano de abertura da trinca. Também chamada de trinca de abertura
- **Modo II:** A trinca se propaga devido a forças cisalhantes paralelas ao plano de abertura e perpendiculares a frente da trinca. Também chamada de trinca de cisalhamento.
- **Modo III:** A trinca se propaga devido a forças cisalhantes que são paralelas ao plano de abertura e a frente da trinca. Também chamada de trinca de rasgamento.

Para análise do campo de tensões que ocorre em revestimentos frágeis é preciso entender os modos de abertura de trinca e a natureza das tensões relacionadas com estes modos.

As tensões radiais são esforços normais, e estão relacionadas com o Modo I de abertura de trincas. Estas tensões são responsáveis por aparecimento de trincas inicialmente perpendiculares às interfaces entre camadas de revestimentos, bem como pelas trincas radiais observadas na região imediatamente fora da marca de indentação deixada pelo ensaio de indentação instrumentada.

As tensões cisalhantes, relacionadas com os Modos II e III de propagação de trincas, são responsáveis pela delaminação que ocorre na interface entre as camadas de revestimento, promovendo o destacamento de partes destas camadas.

Partindo dessa análise foram definidos os critérios a serem analisados no campo de tensões proveniente do ensaio de indentação em um material multicamadas, quais sejam:

- Maximizar a distância das tensões máximas de cisalhamento e radial das interfaces entre os materiais, para dentro da camada de suporte mecânico (CrN).
- Minimizar o valor da tensão máxima radial localizado dentro da camada composta por DLC.

## 2.6. Material do revestimento: *Diamond-like Carbon (DLC)*

Para melhorar as propriedades tribológicas de um componente geralmente é utilizado um revestimento de alta dureza e baixo atrito. A popularização do estudo do revestimento feito de DLC se deve principalmente ao fato de que este material pode apresentar excelentes propriedades no contato tribológico.

Segundo Robertson (2002), “o DLC é uma forma metaestável de carbono amorfo e pode apresentar hibridizações  $sp^3$ ,  $sp^2$  e  $sp^1$ .”

O carbono comum apresenta uma configuração  $1s^1 2s^2 2p^2$ , porém pode sofrer hibridizações para possibilitar sua ligação com outros átomos. Os elétrons da camada 2s são transferidos para a camada 2p, podendo se transformar em  $sp^1$ ,  $sp^2$  e  $sp^3$ , dependendo das condições de temperatura e pressão.

A hibridização  $sp^3$  corresponde à forma alotrópica do carbono-diamante, de elevada dureza. A  $sp^2$  corresponde à forma alotrópica do carbono-grafite, estrutura lamelar com características lubrificantes. A forma alotrópica  $sp^1$  é rara e não concerne a este estudo. Conforme as quantidades existentes do carbono  $sp^3$  e  $sp^2$  no material, ele possui diferentes tipos de filmes, conforme mostra a Figura 2.11.

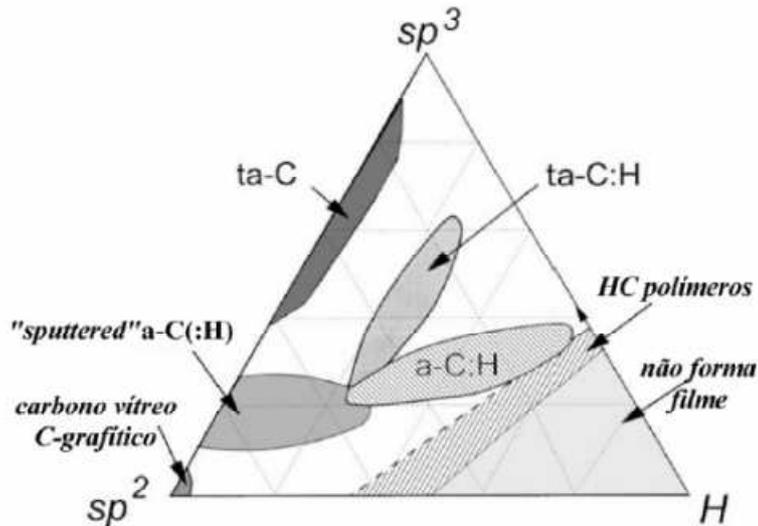


Figura 2.11: Diagrama ternário para o carbon amorfo (DECHANDT, 2005)

Cada tipo de filme possui diferentes propriedades, conforme Tabela 2.2. A forma de deposição do filme de DLC também muda segundo o tipo de filme, como mostra a Tabela 2.3 para filmes de carbono sem hidrogênio e Tabela 2.4 para filmes de carbono com hidrogênio.

Tabela 2.1. Propriedades dos diferentes tipos de filme a base de carbono. (VICENTE, 2005)

	$sp^3$ (%)	H (%)	Densidade ( $kg/m^3$ )	Dureza (GPa)
Diamante	100	0	3515	100
Grafite	0	0	2260	-
ta-C	80-88	0	3100	80
a-C:H Duro	40	30-40	1600-2200	out/20
a-C:H Mole	60	40-50	1200-1600	<10
ta-C:H	70	30	2400	50
Polietileno	100	67	920	0,01

Tabela 2.2. Processo de deposição de filmes de carbono sem hidrogênio. (VICENTE, 2005)

Filmes de Carbono Amorfo sem Hidrogênio			
Elemento Dopante	-		Metal
Ligações	$sp^2$	$sp^3$	$sp^2$
Abreviação	a-C	ta-C	a-C:Me
Nome Comum	DLC Carbono Grafítico	DLC Diamante Amorfo	-
Processo de Deposição	PVD	PVD	-

Tabela 2.3. Processo de deposição de filmes de carbono com hidrogênio. (VICENTE, 2005)

Filmes de Carbono Amorfo com Hidrogênio				
Elemento Dopante	-		Metal	Outros
Ligações	$sp^2/sp^3$	$sp^3$	$sp^2$	$sp^2$
Abreviação	a-C:H	ta-C:H	a-C:H:Me Me=W, Ti, etc	a-C:H:X X= Si, O, N, etc
Nome Comum	DLC Carbono Duro		DLC Me-DLC Me-C:H	DLC X-DLC Si-DLC
Processo de Deposição	PACVD	PVD PACVD	PVD PACVD	PVD PACVD

Os filmes depositados pelo método CVD possuem hidrogênio em sua composição e isso se deve ao fato de que os gases utilizados nessa técnica de deposição são hidrocarbonetos (VICENTE, 2005). O hidrogênio causa mudanças nas propriedades do revestimento, pois este é importante na formação e estabilização na hibridização  $sp^3$ , que confere ao revestimento formado as características inerentes do diamante, principalmente a elevada dureza. (GRILL, 1999)

Algumas formas de DLC possuem ótimas características como: alta dureza, baixo atrito, baixo coeficiente de expansão térmica, inércia química, isolamento elétrico e alta condutividade térmica.

A espessura da camada de DLC varia de 0,01 a 2 $\mu$ m e para melhorar a sua adesividade com o substrato é comum a adição de uma camada intermediária

(HOLMBERG, 2009). A dificuldade de produção de espessuras maiores que  $2\ \mu\text{m}$  é causada principalmente pela característica frágil do revestimento, que se rompe por consequência das próprias tensões inerentes do processo de deposição. Espessuras menores que  $0,01\ \mu\text{m}$  são de difícil produção por demandarem um processo de deposição muito preciso para que exista, de fato, um revestimento sobre toda a superfície do substrato.

## **2.7. Caracterização dos revestimentos por ensaio de indentação instrumentada**

A caracterização das camadas tribológicas é essencial para sua aplicação, pois somente com a determinação das propriedades de cada camada é possível otimizar sua utilização. Uma forma eficaz de se caracterizar as camadas e determinar suas propriedades é o ensaio de indentação instrumentada.

Este ensaio consiste na aplicação lenta de uma força em uma amostra por meio de um indentador de raio de ponta definido. A técnica permite realizar a penetração com medida simultânea da força aplicada e o deslocamento do punção em função do tempo (AZEVEDO, 2009). São analisadas neste ensaio as curvas de carregamento e descarregamento (Carga vs. Deslocamento do indentador), assim como a marca feita na amostra pelo indentador. A Figura 2.12 representa o diagrama esquemático do ensaio de indentação instrumentada.

Por meio de uma indentação instrumentada podem-se obter diferentes propriedades de um material, ou mesmo propriedades de uma camada em materiais multicamadas. É considerada uma técnica bastante robusta, já que podem ser obtidas propriedades das camadas sem que para isso seja necessária a separação dos materiais. Porém é necessário que a indentação seja bastante superficial e com alta resolução, a fim de minimizar a influência do substrato na resposta do ensaio, como leciona Bezerra (2002): “a espessura do corpo de prova deve ser pelo menos dez vezes a profundidade da impressão, bem como a distância da impressão para a aresta ou outra impressão deve ser de pelo menos três vezes seu diâmetro.”

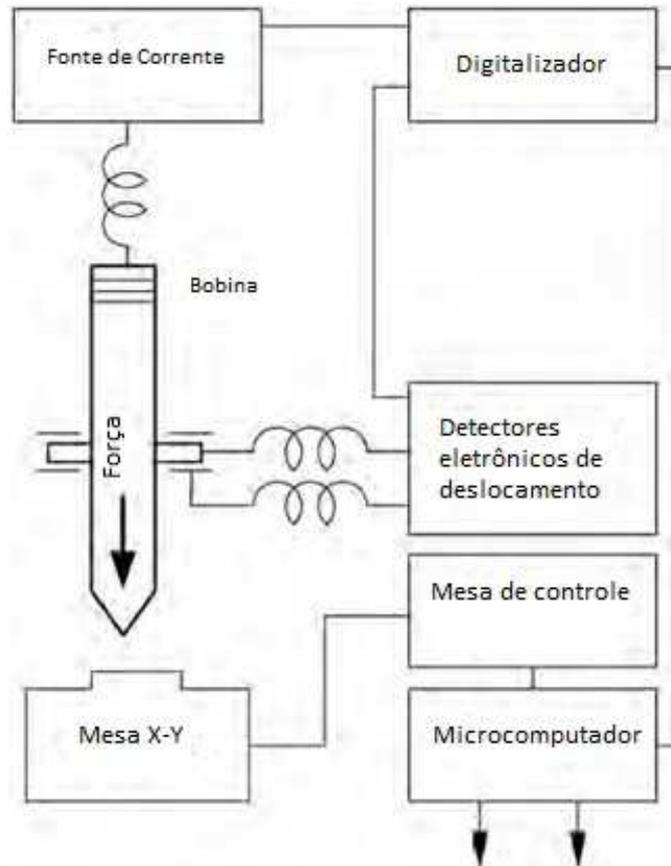


Figura 2.12: Diagrama esquemático do ensaio de indentação instrumentada.  
(HOLMBERG, 2009)

Para medir as propriedades em uma camada da amostra é utilizado o método de Oliver e Pharr, que trabalha dados de carga e deslocamento do indente em um ciclo de carga e descarga no ensaio de indentação instrumentada. Este método foi originalmente criado para um indente com raio de ponta piramidal Berkovich, mas que comprovadamente pode ser aplicado para outras geometrias de raio de ponta do indente. (OLIVER e PHARR, 2003)

### 2.7.1. Determinação das propriedades mecânicas por meio da curva de carregamento e descarregamento

Um ensaio de indentação instrumentada ocorre geralmente em um ciclo de carregamento e descarregamento. A carga é aplicada pelo indente contra a face da amostra de forma lenta o suficiente para que se possa desprezar forças de inércia. Quando a força atinge uma carga máxima ( $P_{max}$ ) a profundidade de indentação também atinge seu valor máximo ( $h_{max}$ ).

O segundo passo do ensaio é o descarregamento, que também ocorre de forma lenta para evitar forças de inércia. À medida que a carga é retirada, é possível perceber a recuperação elástica do material a certa profundidade de indentação e o fenômeno da deformação plástica, já que a curva de descarregamento não retorna à profundidade de indentação zero. A Figura 2.13 mostra o desenho esquemático da geometria da superfície da amostra após um ciclo carregamento/descarregamento de um ensaio de indentação instrumentada.

Do gráfico do ciclo carregamento/descarregamento são retirados os dados de carga máxima ( $P_{max}$ ), deslocamento máximo do indentador ( $h_{max}$ ), a profundidade final ( $h_f$ ) e a rigidez do contato, que é o coeficiente angular de uma reta tangente à curva de descarregamento (GIANNAKOPOULOS *et.al.*, 1999).. A Figura 2.14 representa o gráfico do ciclo carregamento/descarregamento, em função da carga aplicada ( $P$ ) e da profundidade de penetração do indentador na superfície da amostra ( $h$ ).

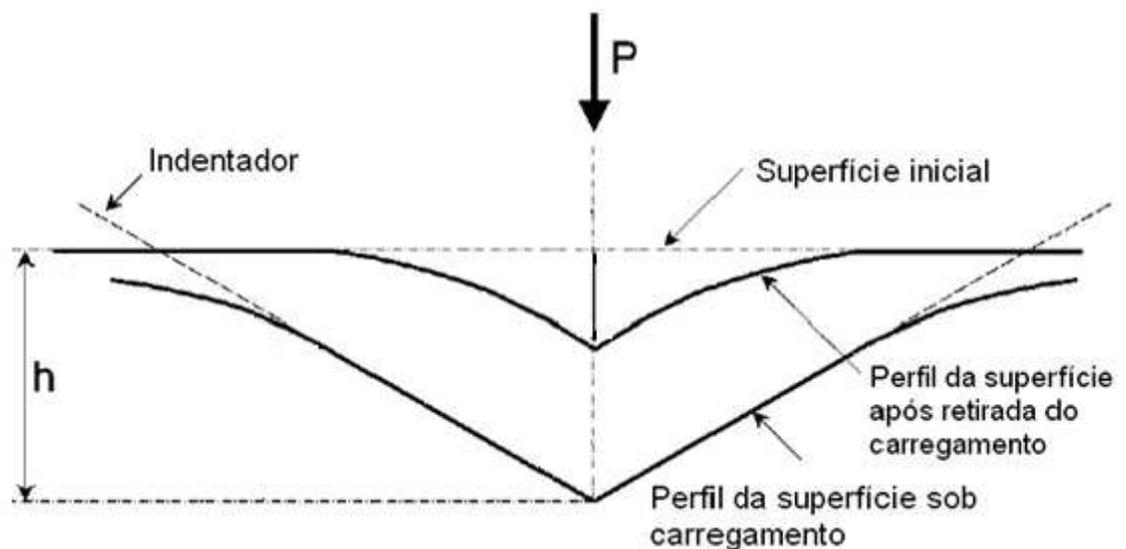


Figura 2.13.: Representação esquemática plana da geometria da amostra após um ciclo carregamento/descarregamento. Adaptado de Holmberg (2009)

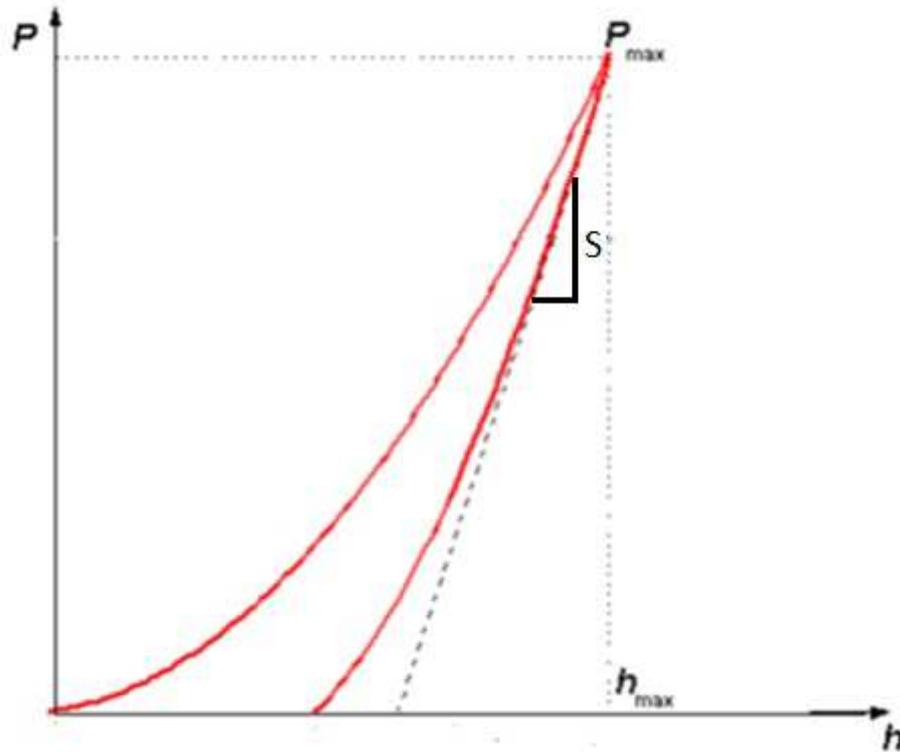


Figura 2.14: Gráfico do ciclo carregamento/descarregamento.

De acordo com o método de Oliver e Pharr (2003), a dureza de um material é a relação entre a pressão média que o material sofre no carregamento e pode ser obtida dividindo-se a carga máxima experimentada no ensaio dividida pela área de contato projetada ( $A$ ), conforme Equação (2.1).

$$H = \frac{P_{max}}{A} \quad (2.1)$$

. A propriedade de rigidez de contato ( $S$ ), é o coeficiente angular de uma reta tangente à curva de descarregamento do ensaio de indentação e a área de contato projetada pode ser obtida pela equação que rege a rigidez de contato, descrita pela Equação 2.2. Esta equação depende do Módulo de Elasticidade efetivo ( $E_{ef}$ ) definido pela Equação 2.3. O módulo de elasticidade efetivo é um parâmetro que combina o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do indentador e da peça, considerando a existência de deslocamentos elásticos nos dois materiais (LARA, 2012).

$$S = \beta \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot E_{ef} \cdot \sqrt{A} \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{E_{ef}} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad (2.3)$$

Onde:

- $\beta$  – Parâmetro adimensional utilizado para explicar desvios de rigidez causados pela falta de simetria do indentador piramidal (HAY *et. al.*, 1999).
- $E$  – Módulo de elasticidade da amostra.
- $E_i$  – Módulo de elasticidade do indentador.
- $\nu$  – Coeficiente de Poisson da amostra.
- $\nu_i$  - Coeficiente de Poisson do indentador.

Uma vantagem, do ponto de vista numérico, da utilização do método de indentação para obter valores de dureza é que a propriedade de dureza independe da carga aplicada no ensaio e pode ser considerado proporcional à razão entre a força aplicada e a impressão do indentador na superfície da amostra indentada. (DIAS *et.al.*, 2005, MEDEIROS *et.al.*, 2006)

## CAPÍTULO III

### Método dos Elementos Finitos (MEF)

Muitos problemas físicos são descritos matematicamente na forma de equações diferenciais e sua solução exata, buscada de forma analítica, é impraticável ou mesmo impossível. Para sanar este problema, são feitas soluções aproximadas por métodos numéricos e uma solução numérica robusta e de grande utilização é o MEF.

Segundo Rade (2008) o MEF “é uma técnica de análise numérica destinada à obtenção de soluções aproximadas de problemas regidos por equações diferenciais”. Este método discretiza o problema contínuo em um número finito de nós interconectados, que são os elementos. O conjunto dos elementos utilizados na discretização é denominado malha.(DESAI, 1972)

Definidos todos os componentes da malha, são inseridas as equações de forma ou funções de interpolação e também as condições que garantem a continuidade de nós compartilhados por mais de um elemento. As incógnitas são os graus de liberdade (gdl) do problema e passam a ser os valores das variáveis de campo nos pontos nodais. As soluções obtidas podem ser analisadas de forma pontual (nodal) ou de forma global, quando os pontos são interpolados, garantindo a continuidade do problema. A qualidade de solução está atrelada à quantidade de elementos que compõe a malha, assim como às equações de campo inseridas e às condições de contorno.

A vantagem de se utilizar este método para o problema exposto é a possibilidade de se controlar os parâmetros de entrada das simulações, tornando

possível a variação de apenas um parâmetro, para analisar sua influência. Como desvantagem, destaca-se a necessidade de parâmetros de entrada fixos de cada camada de material, o que de fato não ocorre, pois o fenômeno da adsorção superficial e os próprios métodos de deposição fazem com que os filmes tribológicos tenham uma transição gradual de um material para outro.

O MEF pode ser dividido em implícito e explícito, sendo que o primeiro não considera forças de inércia na aplicação das condições de contorno da simulação, ou seja, é como se as cargas fossem aplicadas suficientemente lentas para que não exista impacto, resultando em uma simulação onde o desenvolvimento do processo não pode ser analisado, existindo apenas uma condição inicial e uma condição final. Já o método explícito calcula um passo de tempo, que rege a evolução da simulação, em função das propriedades elásticas do modelo e do tamanho do menor elemento. Esta característica do método explícito permite a análise do desenvolvimento da solução, muito importante na análise de deformações. (ZIENKIEWICZ, 1991)

### 3.1. Solução explícita

A equação para uma estrutura discretizada, a ser resolvida pelo MEF é definida pela Equação 3.4:

$$M \cdot \ddot{u} + p(u, \dot{u}) = f(u, t) \quad (3.4)$$

Onde  $M$  é a matriz massa da estrutura,  $u$ ,  $\dot{u}$  e  $\ddot{u}$  são os vetores deslocamento, velocidade e aceleração,  $p(u, \dot{u})$  são as forças internas e  $f(u, t)$  são as forças externas. (DUARTE, 2007)

Os métodos explícitos só serão estáveis se o passo de tempo for suficientemente pequeno. É possível estimar um valor crítico por meio das propriedades elásticas do material e do tamanho do menor elemento existente na malha. É comum utilizar uma margem de incerteza de 25% para o tempo crítico. (DUARTE, 2007)

A integração se dará pelo método das diferenças finitas, onde cada passo seguinte de tempo será determinado pela iteração anterior mais um fator relativo ao

novo instante de tempo, ou seja, em relação ao tempo o instante  $t_{n+1}$  será o instante  $t_n$  adicionado da parcela  $\Delta t_{n+1}$ . (STAMPACK, 2003)

Para as simulações foi utilizado o *software* STAMPACK®, ferramenta comercial de elementos finitos que conta com uma interface CAD e aplica o método explícito de solução.

O *software* STAMPACK® é desenvolvido essencialmente para simulação numérica de estampagem de chapas, com aplicações industriais em processos como *necking*, embutimento, *stretch-forming*, conformação de chapas espessas, *flex-forming*, hidroconformação etc. Porém este programa tem potencial para aplicação em outros tipos de problemas onde a simulação com integração explícita é mais recomendada, como é o caso do ensaio de indentação onde ocorre deformação plástica no substrato.

## **CAPÍTULO IV**

### **Metodologia**

Modelos em MEF geralmente precisam de um parâmetro experimental que valide sua utilização, garantindo a robustez das conclusões obtidas. Neste estudo foram utilizados os resultados obtidos por Lara (2012) na forma de curva do ensaio de indentação instrumentada, assim como dados geométricos e de propriedades dos materiais.

Em seguida foram confeccionados modelos com diferentes espessuras das camadas para analisar a influência dessas espessuras na posição das tensões cisalhantes e radiais. A distância destas tensões máximas em relação às interfaces e o valor da tensão máxima radial na superfície foram os critérios para determinar quais as melhores espessuras das camadas de revestimento compostas de DLC e CrN.

#### **4.1. Simplificações e fator de escala**

O MEF permite que se façam simplificações e que se aplique ao modelo um fator de escala, reduzindo exponencialmente o esforço computacional necessário e sem que com isso existam perdas na qualidade dos resultados obtidos. Este fator de escala é necessário, pois o cálculo do passo de tempo, que garante a convergência, no MEF explícitos é baseado no tamanho do menor elemento da malha. Para uma

malha com elementos na escala micrométrica, o tempo de cálculo se tornaria inviável com os equipamentos disponíveis.

Neste modelo foi utilizado um fator de escala  $10^3$ , pois as espessuras das camadas e o raio de ponta do indentador são da ordem de micrometros. Foi utilizado um modelo axissimétrico, ou seja, foi adotado um eixo de simetria e o modelo foi feito em duas dimensões (GIANNAKOPOULOS *et.al.*, 1999). Depois de feita a simulação, é possível rotacionar o modelo para ter uma visualização melhor dos resultados.

Para facilitar as simulações, os modelos contam com camadas estratificadas, que permitem que a espessura das camadas seja alterada apenas mudando as propriedades de cada camada independente, evitando que sejam necessários diversos modelos.

#### 4.2. Parâmetros utilizados

Os parâmetros utilizados para validação foram retirados de Lara *et. al.* (2012) e os dados geométricos são  $1,44 \mu\text{m}$  para a camada de CrN,  $1,15 \mu\text{m}$  para a camada de DLC e uma camada de substrato espessa o suficiente para que este fator não influencie o ensaio.

O indentador utilizado para a validação é do tipo Berkovich, com ponta viva e com ângulo de abertura de  $136^\circ$ . As propriedades dos materiais compõem a Tabela 4.5. É importante salientar que o DLC e o CrN foram considerados em todas as simulações como materiais perfeitamente elásticos lineares.

Tabela 4.1. Propriedades utilizadas nas simulações. (LARA, 2012)

	E(GPa)	$\nu$	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
DLC	220,38	0,30	2200
CrN	307,20	0,25	2200
Substrato	209,00	0,30	7800

Além dessas propriedades também são necessárias propriedades referentes às características plásticas dos materiais utilizados. Para o substrato de aço foi

utilizada a lei de encruamento *Ludwik-Nadai*, constante de encruamento ( $k$ ) de 560, expoente de encruamento ( $n$ ) de 0,22 e limite elástico de 345 MPa. (STAMPACK, 2003)

As condições de contorno são: o deslocamento do indentador de 20% da espessura da camada de DLC, equivalente a 0,2296  $\mu\text{m}$ ; atrito desprezível e velocidade de avanço do indentador contra a face da amostra de 0,1m/s, já aplicado o fator de escala. Foi necessária a inserção de apoios indeformáveis e que não se deslocam, sendo o primeiro abaixo da amostra e o segundo na superfície do lado oposto a indentação. Estes apoios funcionam como os dispositivos de fixação das amostras na mesa de ensaio.

Foram retirados também de Lara (2012) os dados de carga e profundidade de penetração do indentador em um ciclo carregamento/descarregamento em um ensaio de indentação instrumentada, com as mesmas características geométricas e de propriedades de materiais propostas neste trabalho.

### **4.3. Modelos em Elementos Finitos**

#### **4.3.1. Modelos discretizados**

As simulações foram divididas na validação do método com um primeiro modelo e simulações de diferentes espessuras das camadas tribológicas, com um segundo modelo.

O primeiro modelo possui um indentador na forma triangular piramidal Berkovich, simplificado como um cone com aresta viva, utilizando o conceito de forma efetiva do indentador (SCHWARZER *et.al.*,2005). Esta simplificação é justificável, pois a área de contato indentador/peça é muito pequena e uma forma triangular piramidal garante o contato por um ponto, assim como ocorre com um cone de revolução, gerado pelo modelo axissimétrico. Este primeiro modelo foi utilizado para validar o método, já que os resultados experimentais de Lara *et al* (2012) foram feitos com um indentador de canto vivo. A Figura 4.1 representa o primeiro modelo proposto.

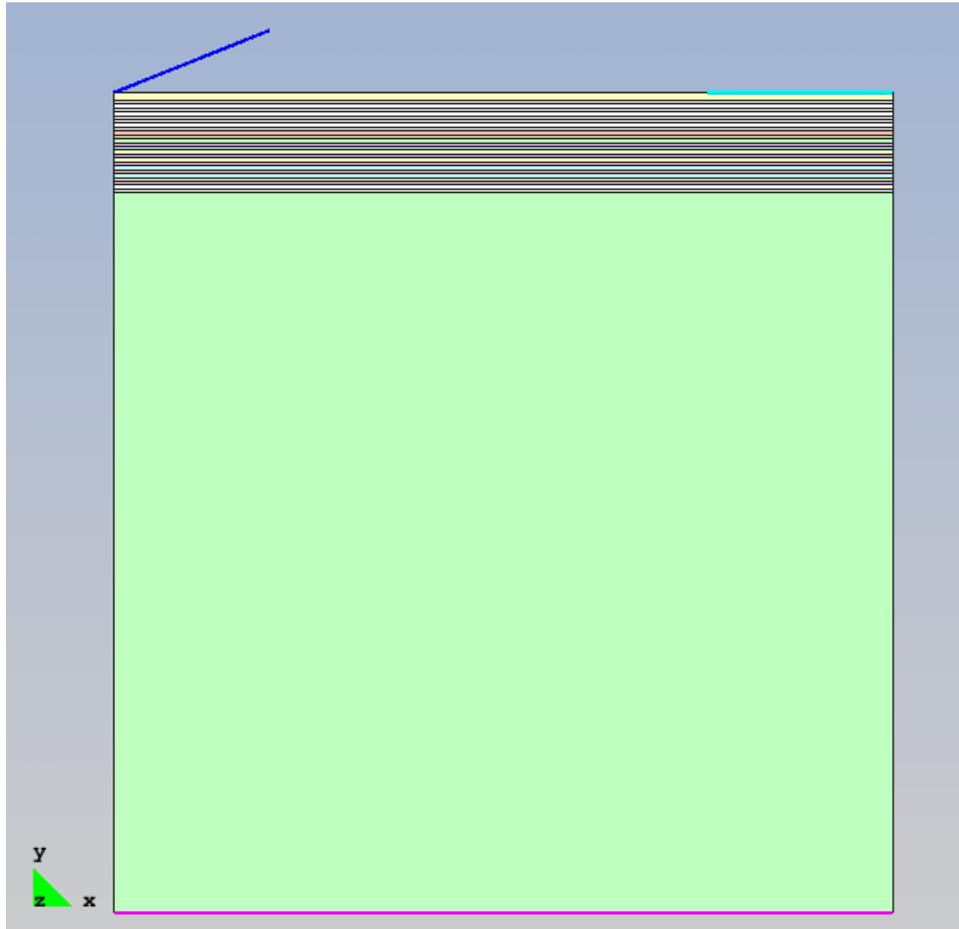


Figura 4.1: Desenho do primeiro modelo proposto

O modelo é plano e com simetria, considerando o modelo axissimétrico. Foram criadas 25 camadas e mais um substrato de maior espessura, a fim de facilitar a alteração das espessuras apenas com a troca de propriedades de cada camada. Os apoios são as linhas indeformáveis presentes na face inferior e superior direita da Figura 4.1, também nesta figura, a linha inclinada a partir do canto superior à direita representa a geratriz do cone indentador.

O desenho tem seu zero vertical na superfície e a primeira camada (mínima espessura de DLC) tem espessura equivalente a  $0,58 \mu\text{m}$ . Cada camada seguinte tem  $0,29 \mu\text{m}$  de espessura até que se alcance a profundidade de  $5,54 \mu\text{m}$ , completando 25 camadas. O substrato tem espessura de aproximadamente  $40 \mu\text{m}$  e a largura é constante igual a, aproximadamente  $43 \mu\text{m}$ .

O indentador do primeiro modelo tem aproximadamente  $9 \mu\text{m}$  de comprimento, mas este valor não influencia o resultado, contanto que este tamanho seja grande o suficiente para que na profundidade máxima de penetração a

superfície lateral do indentador se mantenha em contato com a superfície indentada da amostra.

O segundo modelo foi feito com uma ponta esférica de raio  $200\ \mu\text{m}$ , para simular um indentador Rockwell. Este modelo propõe o contato esférico, pois o contato real entre corpos ocorre entre as maiores asperidades, que apresentam picos com superfícies de contato curvas. A utilização de um modelo esférico permite que o modelo do MEF tenha uma malha mais grosseira, pois o contato ocorre em uma área ao invés de um ponto. Esta consideração diminui exponencialmente o esforço computacional. Os demais parâmetros do modelo são iguais aos do primeiro modelo. A Figura 4.2 representa a geometria do segundo modelo em MEF proposto.

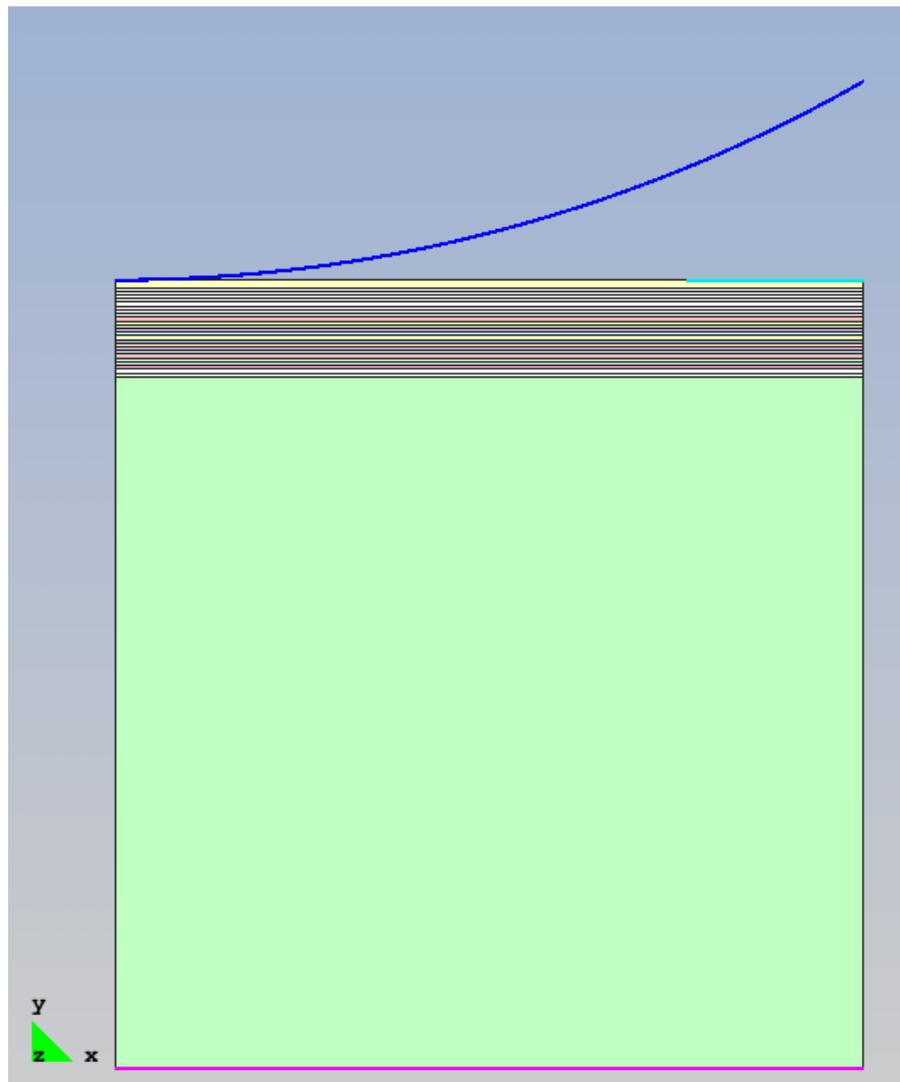


Figura 4.2: Desenho do segundo modelo proposto

### **4.3.2. Malha utilizada nos modelos**

Para modelos planos com axissimetria são utilizadas malhas estruturadas e com elementos quadrilaterais para as áreas (camadas e substrato) e malhas não estruturadas para as linhas (indentador e apoios).

#### **4.3.2.1. Teste de malha**

Sempre que se utiliza o MEF para simular um fenômeno físico, é necessário que se faça um teste de malha, a malha deve ser refinada até que os resultados de interesse não sejam afetados pela malha, ou seja, até que se atinja o ponto de convergência da malha. Após o ponto de convergência da malha, o refino aumenta o esforço computacional e a qualidade dos resultados permanece constante, podendo até mesmo ocorrer a divergência do algoritmo após um refino excessivo.

A malha deverá então ser fina o suficiente para que o resultado seja útil à proposta, mas sem que o esforço computacional torne a simulação inviável.

Neste estudo, o indentador é representado por uma linha, com região de contato muito pequena, o que faz necessário um grande refino da malha, para que um elemento do indentador não penetre a malha da amostra sem que seja computado o contato entre eles. O ponto de convergência da malha será então, no caso deste estudo, uma malha fina o suficiente para que os elementos do indentador não ultrapassem a superfície da amostra sem que exista contato entre eles.

#### **4.3.2.2. Malha do primeiro modelo**

O primeiro modelo conta com uma situação mais crítica que o segundo pela existência do canto vivo, exigindo que se faça uma malha mais fina. Porém a malha necessária para que nenhum elemento do indentador ultrapasse a superfície da amostra é tão fina que torna o ensaio inviável.

Foi feita uma malha com a menor influencia possível do efeito do canto vivo, ou seja, a mais fina possível que tenha bons resultados e que seja viável computacionalmente. Na amostra, a malha possui 1000 elementos na direção x para todas as camadas. Na direção y, a amostra apresenta quatro elementos na primeira camada, dois elementos nas demais camadas e 30 elementos no substrato. A ferramenta possui 200 elementos, o primeiro apoio possui 100 elementos e o segundo 50. A Figura 4.3 mostra a malha do primeiro modelo e um detalhe da região

do contato, pois a malha é tão fina que é necessária uma ampliação para que se possa visualizar os elementos.

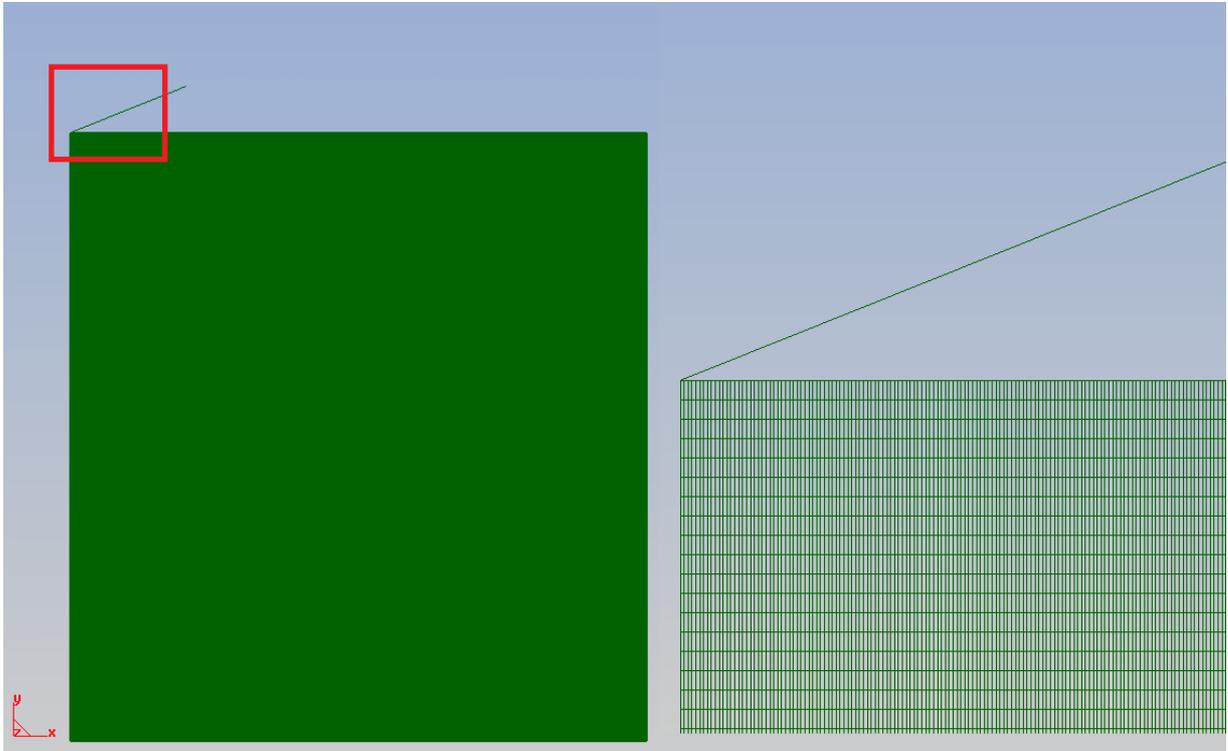


Figura 4.3: Malha do primeiro modelo com ampliação da área selecionada em vermelho.

#### 4.3.2.3. Malha do segundo modelo

O segundo modelo possui um indentador de ponta esférica e por isso é uma condição menos crítica na simulação em MEF. Para este caso foi utilizada uma malha com 200 elementos na direção horizontal  $x$ , para todas as camadas. Na direção vertical  $y$ , foram utilizados 4 elementos na primeira camada, 2 nas camadas seguintes e 15 elementos no substrato. O indentador possui 100 elementos, o primeiro apoio também 100 elementos e o segundo apoio possui 50 elementos. A Figura 4.4 mostra a malha do segundo modelo.

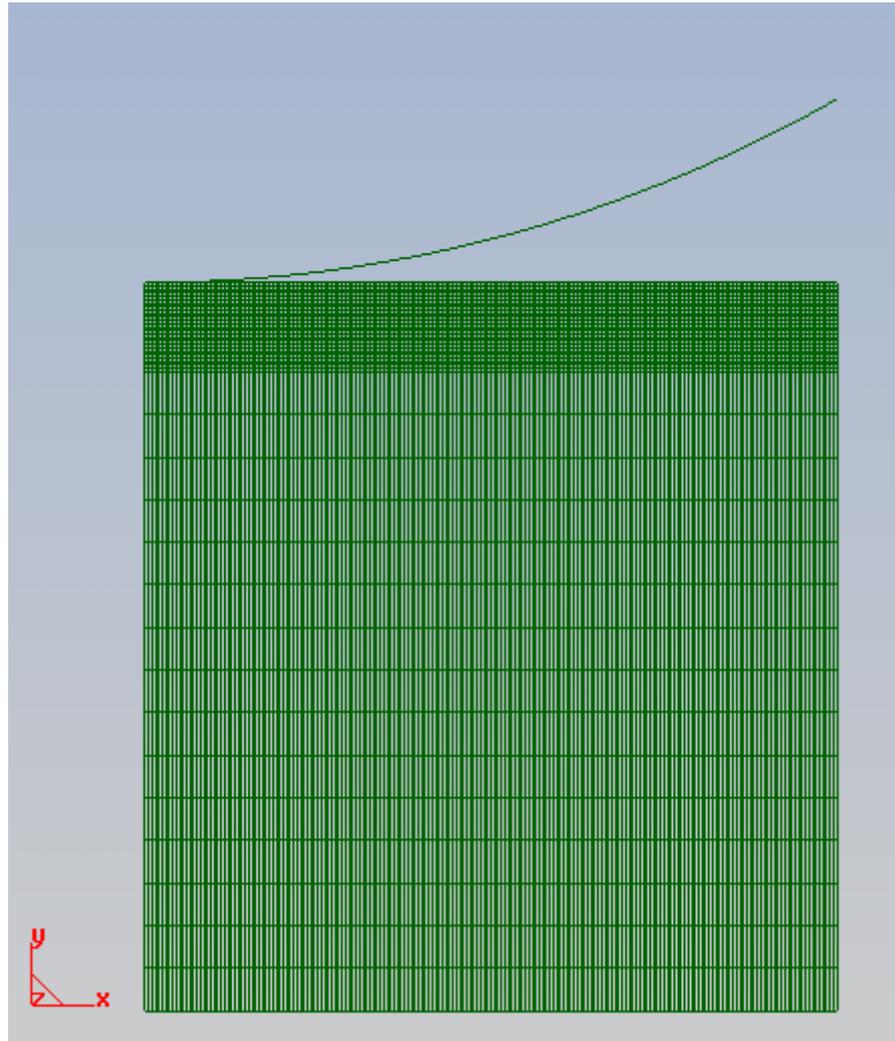


Figura 4.4: Malha do segundo modelo

#### 4.4. Determinação da Dureza da camada de CrN

O parâmetro utilizado para validar o método numérico em face do experimental foi a determinação da dureza pelos cálculos matemáticos propostos por Oliver e Pharr (2003), utilizando os dados de carga e profundidade de indentação das curvas de carregamento e descarregamento dos ensaios.

Para executar estes cálculos é necessário determinar o coeficiente angular de uma reta tangente à curva de descarregamento e a carga máxima do ensaio. Para automatizar os cálculos e plotar os gráficos foi elaborado um algoritmo em linguagem MatLab®, apresentado no APÊNDICE I.

O algoritmo busca os dados de descarregamento de um arquivo de texto e plota a curva de descarregamento ligando os pontos de tensão/deslocamento do punção, já considerando o fator de escala. O segundo passo do algoritmo é assumir um ponto 20% abaixo da carga máxima e a partir dele traçar uma reta tangente à curva de descarregamento. Este último procedimento é feito porque curvas experimentais não são contínuas, dificultando a obtenção do coeficiente angular da reta.

Com estes dados e as Equações 2.1, 2.2 e 2.3, é possível determinar o valor de dureza para o ensaio real, com base nos dados experimentais de Lara (2012), e para as simulações. Os valores fixos utilizados foram os mesmos usados por Lara (2012):

- $\beta=1$ . A geometria do indentador é de revolução, não existindo desvios devido a simetria.
- $E=1141$  GPa.
- $\nu_i =0,07$ .

#### 4.5. Planejamento das simulações

Primeiramente foi feita a simulação do primeiro modelo nas mesmas condições do proposto experimentalmente por Lara *et.al.* (2003), para, a partir da dureza, validar o método para este estudo. A segunda simulação foi feita com as mesmas condições do modelo experimental, porém com o segundo modelo.

O segundo parâmetro a ser estudado foi a influência da profundidade de indentação na resposta do ensaio e para isso foram feitos 5 ensaios com o segundo modelo e profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50% da espessura da camada de DLC.

Para analisar as tensões máximas, foi utilizada uma profundidade de indentação de 20% da camada de DLC. As camadas de DLC variaram em 7 espessuras (0,58; 0,86; 1,15; 1,44; 1,72; 2,01 e 2,30  $\mu\text{m}$ ) e as camadas de CrN também variaram em 7 espessuras (0,72; 1,44; 1,80; 2,16; 2,52; 2,88 e 3,24  $\mu\text{m}$ ). Foram feitos 49 ensaios, totalizando a análise combinatória das possibilidades de espessuras das camadas. A tabela 4.6 organiza e enumera os 49 ensaios.

Tabela 4.2: Organização dos ensaios

Nº da simulação	Camadas de DLC	Camadas de CrN	Nº da simulação	Camadas de DLC	Camadas de CrN
1	1	4	26	4	12
2	1	8	27	4	14
3	1	10	28	4	16
4	1	12	29	4	18
5	1	14	30	5	4
6	1	16	31	5	8
7	1	18	32	5	10
8	2	4	33	5	12
9	2	8	34	5	14
10	2	10	35	5	16
11	2	12	36	5	18
12	2	14	37	6	4
13	2	16	38	6	8
14	2	18	39	6	10
15	3	4	40	6	12
16	3	8	41	6	14
17	3	10	42	6	16
18	3	12	43	6	18
19	3	14	44	7	4
20	3	16	45	7	8
21	3	18	46	7	10
22	4	4	47	7	12
23	4	8	48	7	14
24	4	10	49	7	16
25	4	12	50	7	18

A tabela 4.7 faz a correspondência entre o número de camadas de cada material e sua respectiva espessura.

Tabela 4.3: Relação entre número de camadas e espessura

Camadas de DLC	Espessura ( $\mu\text{m}$ )	Camadas de CrN	Espessura ( $\mu\text{m}$ )
1	0,58	4	0,72
2	0,86	8	1,44
3	1,15	10	1,80
4	1,44	12	2,16
5	1,72	14	2,52
6	2,01	16	2,88
7	2,30	18	3,24

## CAPÍTULO V

### Resultados e Discussão

Primeiramente foi feita a análise dos resultados referentes à validação do método para o problema proposto. Validado o método, foi analisada a influência da profundidade de indentação na resposta de dureza da camada de CrN. Por fim foram analisadas as posições das tensões radiais e cisalhantes e o valor máximo da tensão radial.

#### 5.1. Validação do MEF

Primeiramente foram utilizados os dados da curva de descarregamento obtida por Lara *et.al.* (2012) para plotar a curva de descarregamento e a reta tangente a um ponto situado 20% abaixo do carregamento máximo da curva. A Figura 5.1 mostra o gráfico do ensaio de descarregamento experimental.

Além do gráfico, o algoritmo desenvolvido retorna as seguintes respostas:

$$m = 218.3889 \text{ [mN/}\mu\text{m]}$$

$$(x,y) \text{ máximo} = (0.2440, 19.9840)$$

$$(x,y) \text{ 20\% abaixo} = (0.2260, 16.0530)$$

$$(x,y) \text{ mínimo} = (0.0730, 0.3910)$$

$$x \text{ em } y=0 \text{ da reta} = (0.1525)$$

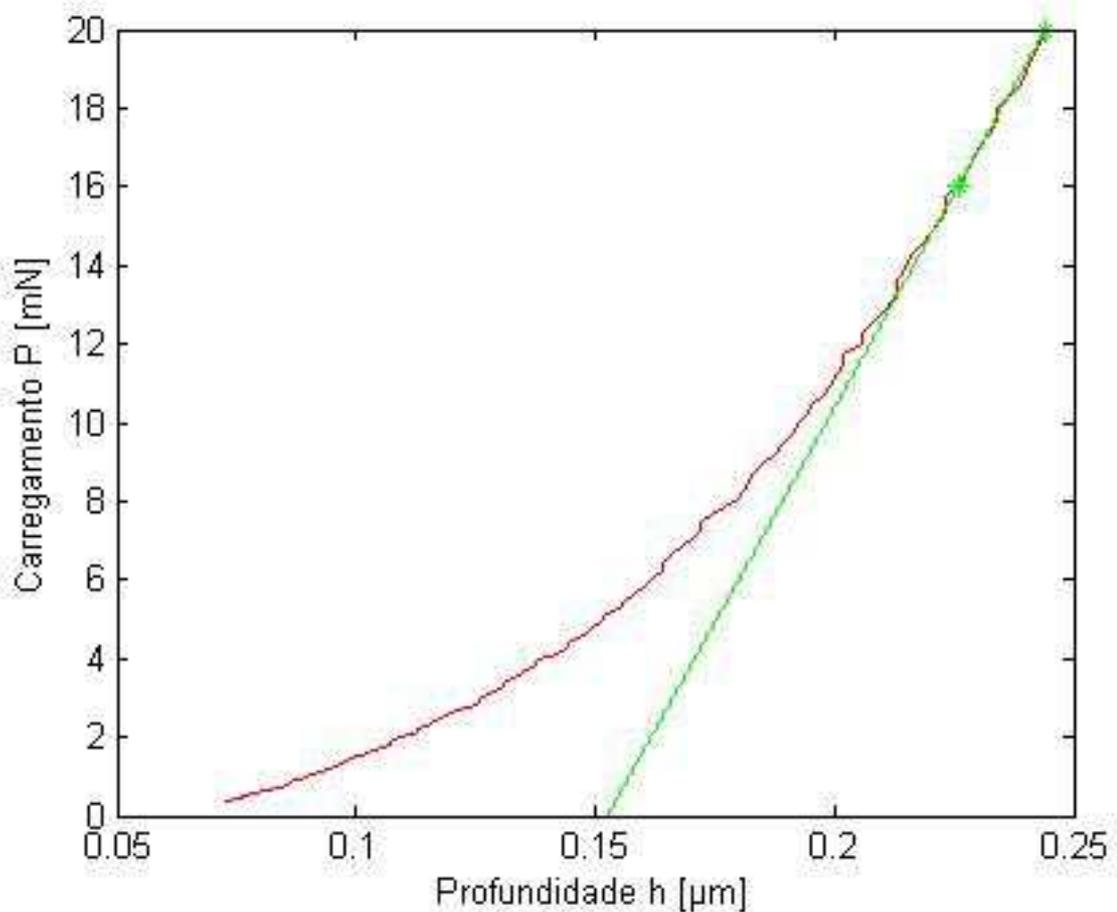


Figura 5.1: Gráfico do ensaio de descarregamento experimental.

Onde  $m$  é o coeficiente angular da reta. Com estes dados, calcula-se a dureza ( $H$ ) que para este ensaio foi  $H=18,1$  GPa. O mesmo procedimento é feito para a primeira simulação e a dureza encontrada neste caso foi  $H=18,5$  GPa. O erro encontrado é de aproximadamente 2%. A figura 5.2 mostra o gráfico do ensaio de descarregamento simulado.

Considerando os erros decorrentes do próprio experimento e os erros numéricos por ser a solução aproximada, é possível afirmar que o modelo de elementos finitos simula de forma adequada o ensaio de indentação de um material multicamadas. Feita essa validação, pode-se considerar confiáveis os resultados obtidos nas simulações subsequentes, onde foi alterada apenas a profundidade de indentação.

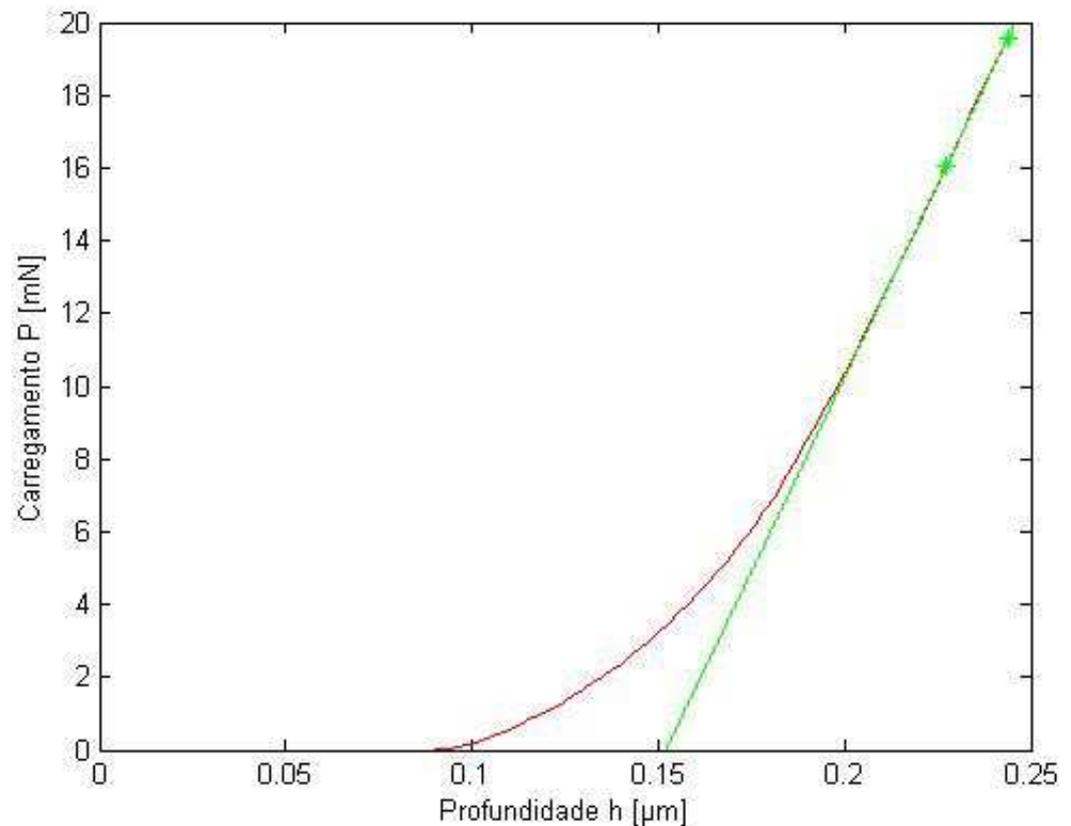


Figura 5.2: Gráfico do ensaio de descarregamento simulado.

## 5.2. Influência da profundidade de indentação nas respostas

A profundidade de indentação é um fator crítico na determinação das propriedades das camadas tribológicas, pois quanto maior for a profundidade de penetração, maior será a influência das propriedades do substrato na resposta do ensaio. Essa profundidade de penetração é escolhida com referência na espessura da camada e é importante quantificar até qual profundidade os resultados são válidos. Foram feitas simulações com profundidade de indentação de 10, 20, 30, 40 e 50% da espessura da camada de DLC.

Para as simulações feitas com o segundo modelo, alterando apenas a profundidade de indentação, foram traçadas as curvas e calculadas as durezas, para compará-las com a dureza do ensaio experimental. A tabela 5.6 mostra os valores de dureza obtidos para as diferentes profundidades de indentação.

Tabela 5.1. Valores de dureza para diferentes profundidades de indentação

	Dureza (GPa)	Erro (experimental como referência) [%]
Experimental (20%)	18,1	
10%	18,9	4,23
20%	18,6	2,69
30%	17,7	2,26
40%	16,8	7,74
50%	10,7	69,16

Segundo as recomendações feitas na literatura, a profundidade de penetração deve ser pequena para que as propriedades mecânicas do substrato não influenciem as respostas dos ensaios. A partir dos resultados obtidos, é clara esta influência na resposta do ensaio. Quanto maior a profundidade de penetração do indentador, maior a influência do substrato macio e, portanto, menor o valor da dureza da camada de CrN encontrada. A norma de ensaios de indentação requer que a máxima profundidade de indentação não ultrapasse 10% da espessura da primeira camada (COSTA, 2007), porém os resultados obtidos mostram que uma penetração de até 30% da espessura da camada mais externa ainda fornece bons resultados (erro de 2,26% entre as durezas experimental e numérica). Acima de 30% os erros relativos já se tornam grandes, evidenciando a influência do substrato macio no resultado da dureza, que decai em grande proporção.

Também é importante ressaltar que para o problema proposto a solução explícita, que leva em conta a possibilidade de deformações acima do limite elástico, é adequada, considerando que existe deformação plástica mesmo para o ensaio com profundidade de indentação de 10% da espessura da camada, conforme Figura 5.3. A deformação plástica ocorre no substrato na região próxima a interface deste com a camada de CrN. Nesta simulação a deformação plástica efetiva é da ordem de 3%.

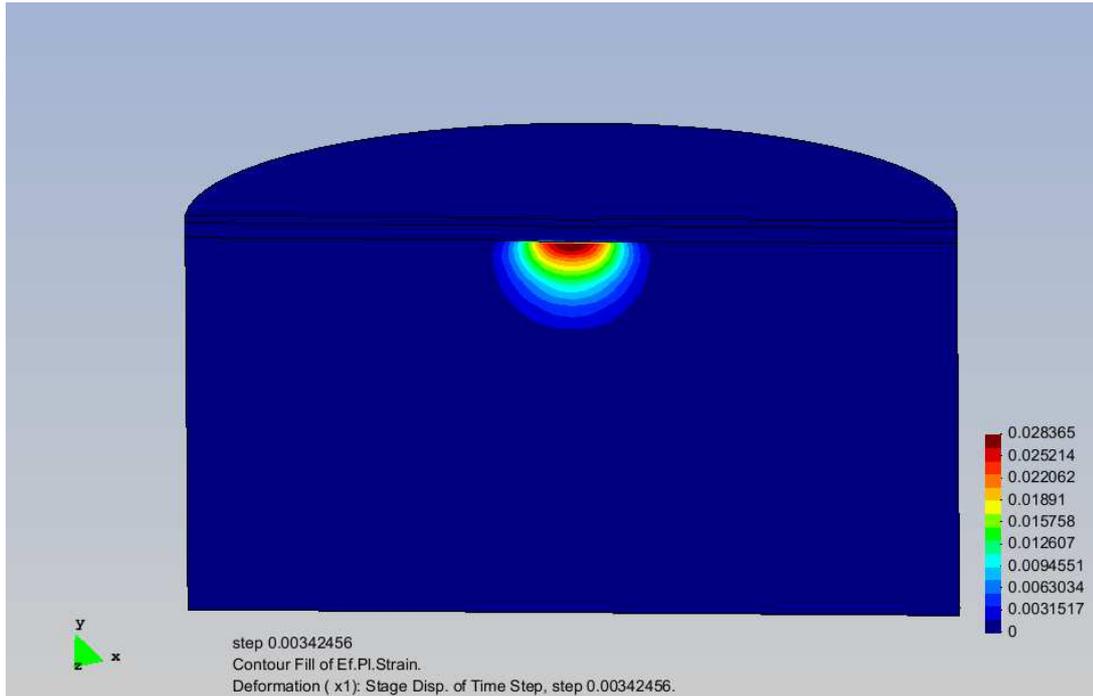


Figura 5.3: Deformação plástica efetiva para profundidade de indentação de 10% da espessura da camada

### 5.3. Análise de Tensões

As análises de tensões foram feitas para o segundo modelo, com profundidade de penetração de 20% da espessura da camada, seguindo o planejamento proposto pela tabela 4.6.

#### 5.3.1. Posição da tensão Radial ( $\sigma_{rr}$ )

A tensão radial é uma tensão normal cujo máximo valor ocorre próximo à interface entre a camada de CrN e o substrato. Um dos objetivos da otimização da espessura é fazer com que a tensão máxima radial ocorra o mais longe possível da interface, dentro da camada de CrN, que é aplicada justamente como uma camada intermediária para suporte mecânico.

Foi traçado um gráfico com a posição da tensão radial máxima relativa para cada um dos 49 ensaios. A posição da tensão máxima é relativa a interface entre o CrN e o substrato (interface 2), sendo negativa quando caminha para dentro da camada de CrN e positiva quando caminha para o substrato. A Figura 5.4 mostra o gráfico da posição da tensão Radial para todas as 49 simulações.

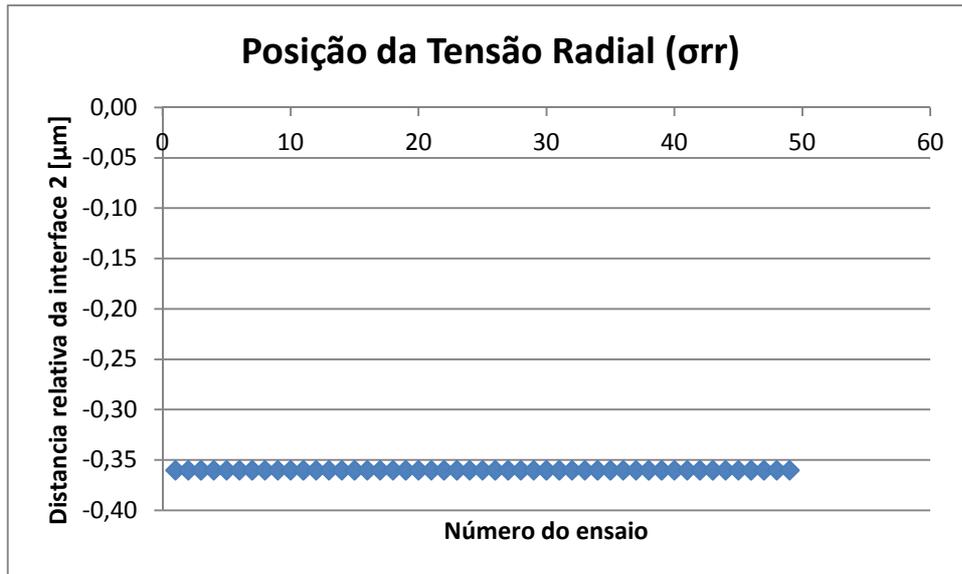


Figura 5.4: Gráfico da posição da tensão radial para cada simulação

A posição da tensão radial muda conforme o ensaio se considerada em função da coordenada da superfície, porém a posição relativa à interface permanece constante. A Figura 5.5 mostra a distribuição de tensão radial na simulação 7 já efetuada a rotação do modelo axissimétrico, juntamente com uma ampliação da região de interesse. A inversão de cores ocorre nessa simulação porque o modelo é axissimétrico e rotaciona em torno do eixo vertical localizado no centro da figura, mudando o sentido da tensão e consequentemente as cores do resultado, porém sem alterar a magnitude. A Figura 5.6 mostra a posição das tensões radiais máxima e mínima, também no ensaio 7, juntamente com o valor dessas tensões e o número do nó onde essa tensão ocorre. Foi escolhida a simulação 7 para a visualização dos resultados de campos de tensões radiais por ser esta simulação a que obteve melhores resultados e, para o caso das tensões radiais, não existe variação da posição nos campos de tensão para as diferentes simulações, apenas mudança na magnitude da tensão radial.

Os resultados presentes nas Figuras 5.5 e 5.6 estão em Pascal e os valores de tensão não se alteram com o fator de escala, pois a tensão é uma relação entre força e área, que já foram proporcionalmente afetadas pela ampliação do modelo.

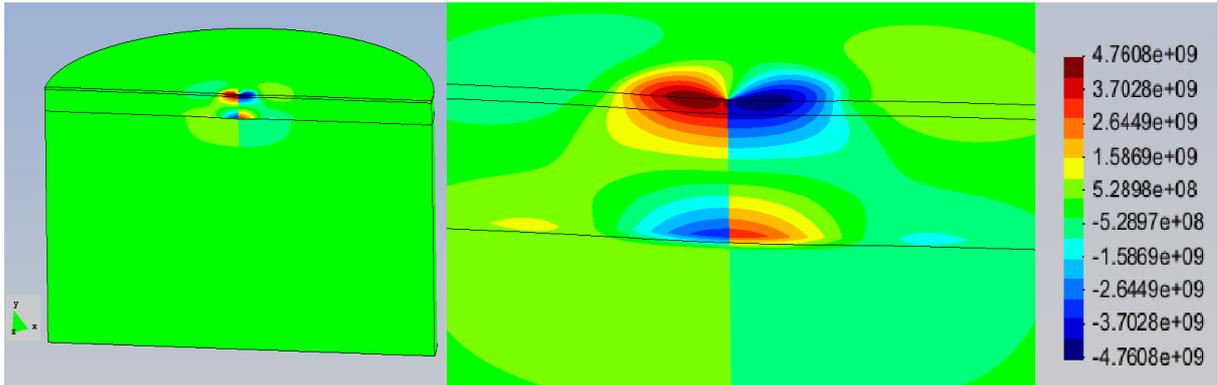


Figura 5.5: Distribuição da tensão radial na simulação 7.

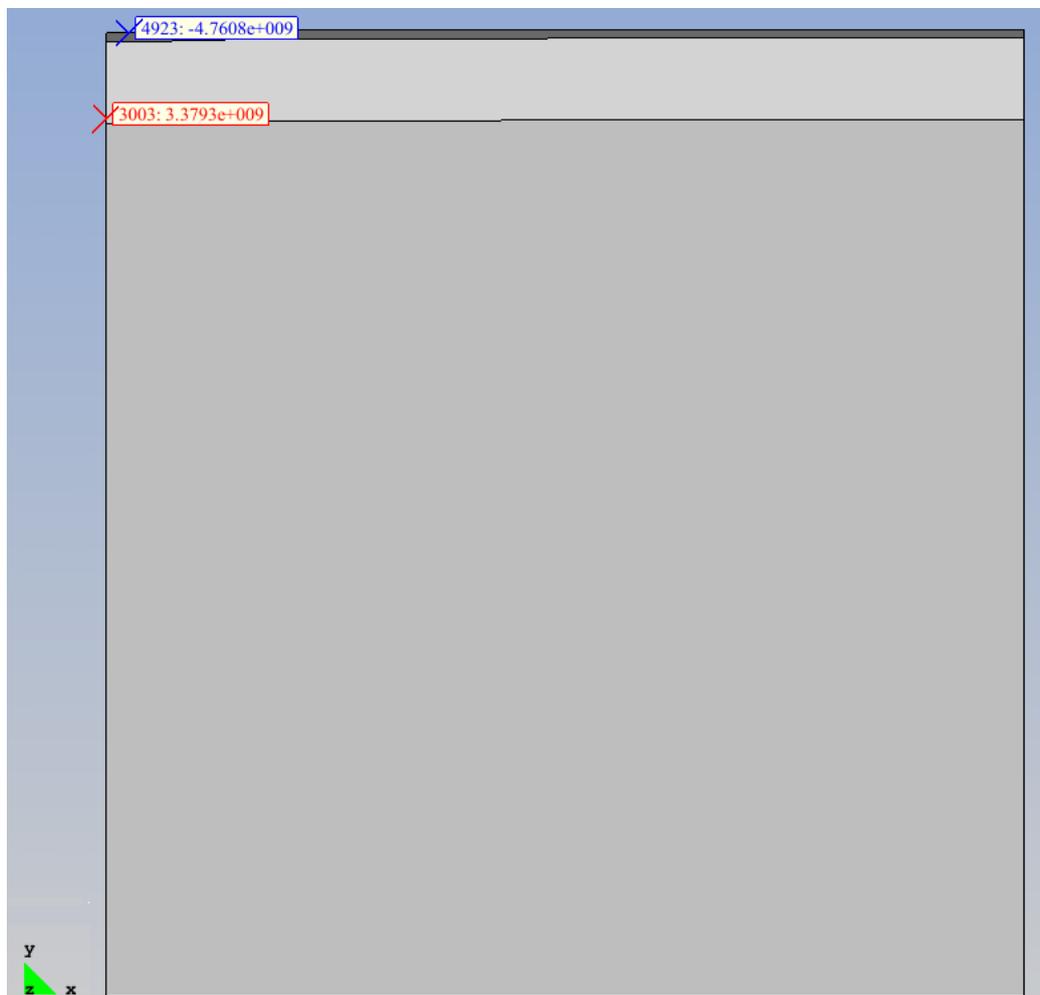


Figura 5.6: Posição das tensões radiais máxima e mínima na simulação 7.

A partir dos resultados obtidos, é possível ver que as tensões radiais máximas de tração no componente ocorrem próximas a interface entre o CrN e o substrato, entretanto não alteram sua posição relativa a esta interface quando são alteradas as espessuras das camadas de DLC e CrN. As tensões normais máximas de tração

são responsáveis pelo surgimento de trincas perpendiculares as interfaces entre as camadas. No Caso da camada de DLC, as tensões radiais de tração são críticas e serão analisadas posteriormente.

### 5.3.2. Posição da Tensão Cisalhante ( $\sigma_{rz}$ )

A tensão cisalhante, em interfaces, tende a arrancar material por delaminação. Nas simulações feitas, o valor máximo desta componente de tensão ocorre próximo à interface entre a camada de DLC e a camada de CrN (interface 1). Esta situação é muito crítica, pois a falha do componente ocorrerá preferencialmente na interface, delaminando partes da camada de DLC. As Figuras 5.7 e 5.8 mostram a posição da tensão cisalhante máxima (marcada em vermelho) e a distribuição das tensões cisalhantes, respectivamente, para a simulação 7, que obteve melhores resultados com relação a posição da tensão cisalhante máxima. A Figura 5.9 mostra a distribuição de tensões cisalhantes para a simulação 43, que obteve os piores resultados para o parâmetro analisado, evidenciando a máxima tensão cisalhante ocorrendo dentro da camada de DLC. A otimização de espessura visa também concentrar a tensão cisalhante máxima dentro da camada de CrN, já que esta camada intermediária possui maior capacidade de absorver deformações, dificultando a delaminação da camada de DLC.

Os valores de tensão cisalhante das figuras 5.7 a 5.9 estão em Pascal e correspondem aos valores reais de tensão.

A posição relativa neste caso se refere à distância da tensão máxima à interface entre a camada de DLC e a camada de CrN. O valor é positivo em direção à camada de CrN e negativo em direção à camada de DLC, ou seja, uma tensão máxima localizada na camada de DLC terá o valor da posição relativa negativa.

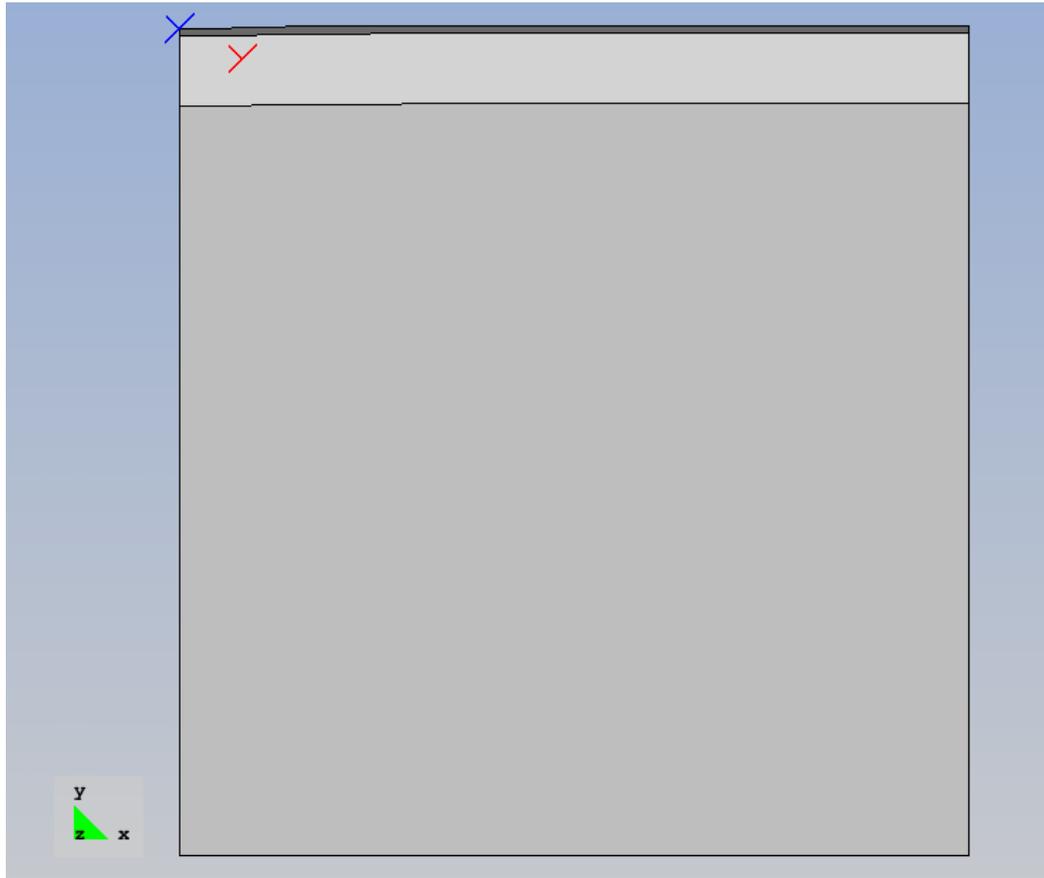


Figura 5.7: Posição da tensão cisalhante máxima para a simulação 7.

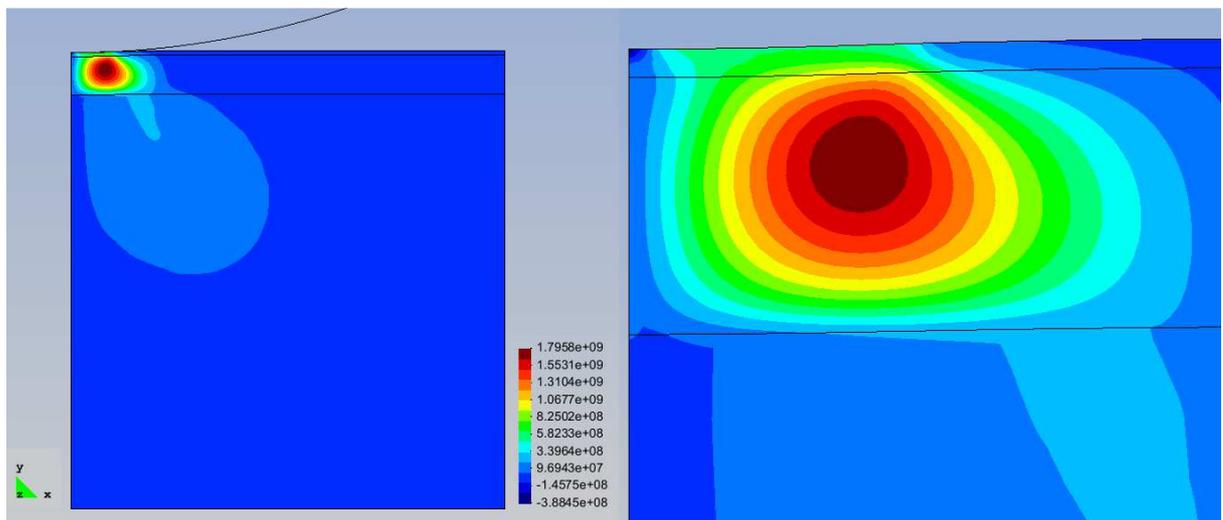


Figura 5.8: Distribuição das tensões cisalhantes na simulação 7.

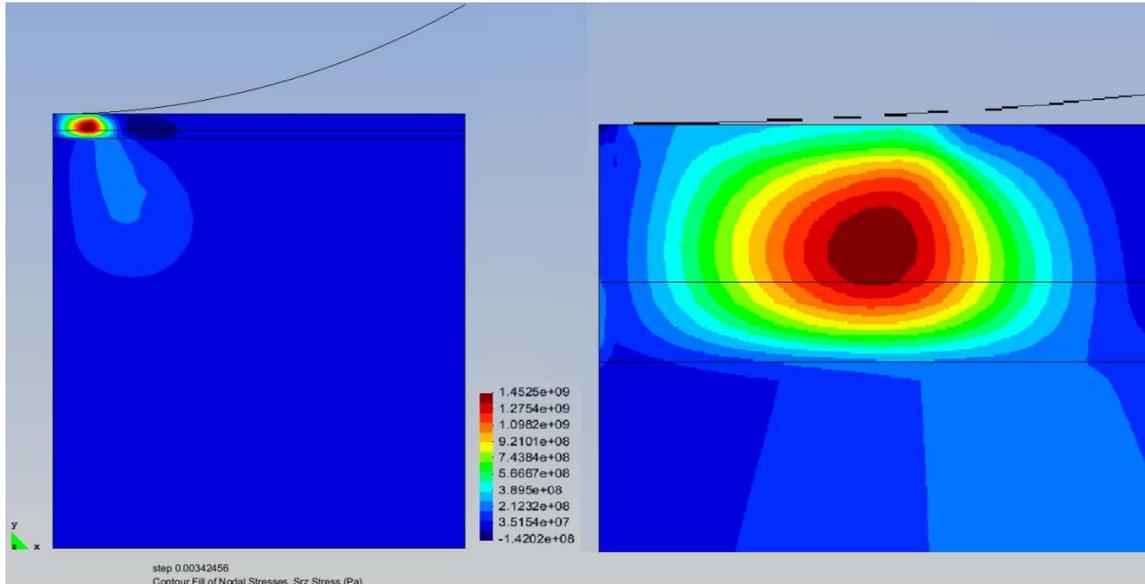


Figura 5.9: Distribuição das tensões cisalhantes na simulação 43.

As Figuras 5.10 à 5.16 mostram as posições relativas da tensão cisalhante para as sete variações de CrN e cada uma das espessuras da camada de DLC.

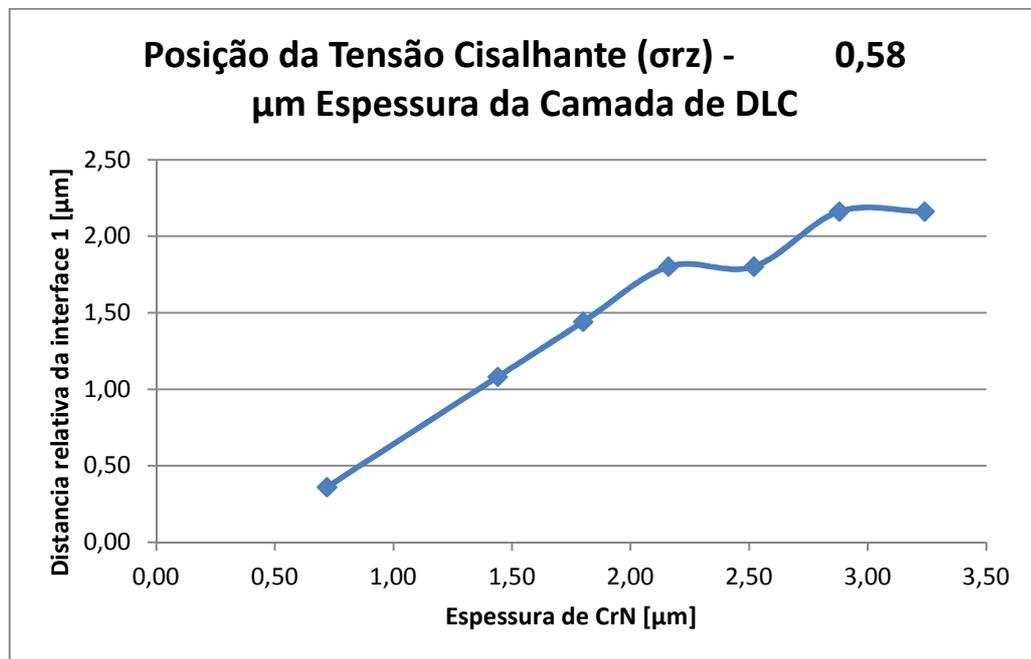


Figura 5.10: Posição da tensão cisalhante para as 7 variações de CrN e espessura de 0,58  $\mu\text{m}$  para o DLC.

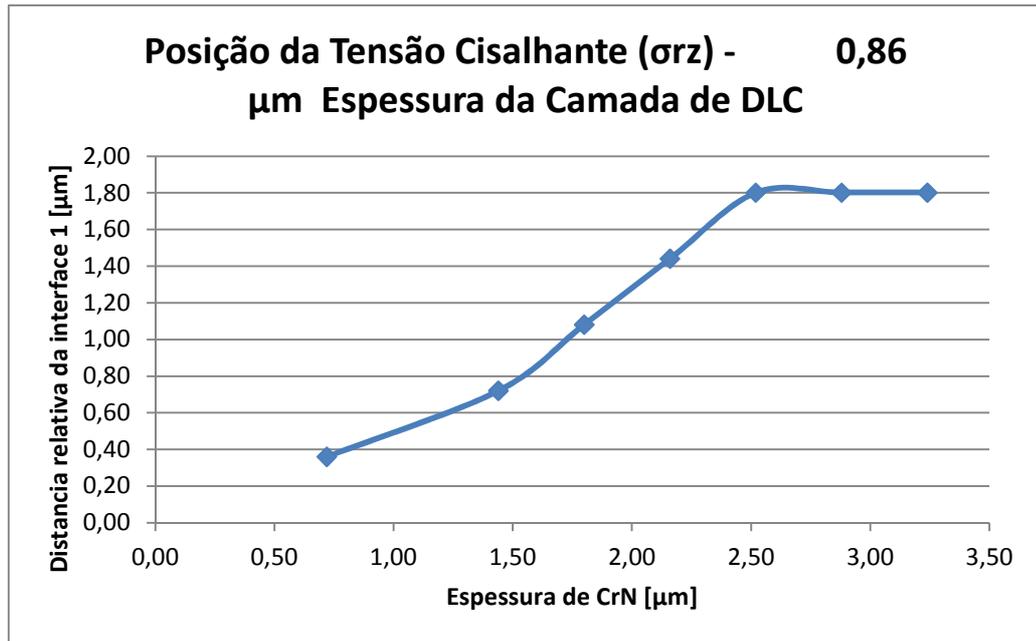


Figura 5.11: Posição da tensão cisalhante para as 7 variações de CrN e espessura de 0,86  $\mu\text{m}$  para o DLC.

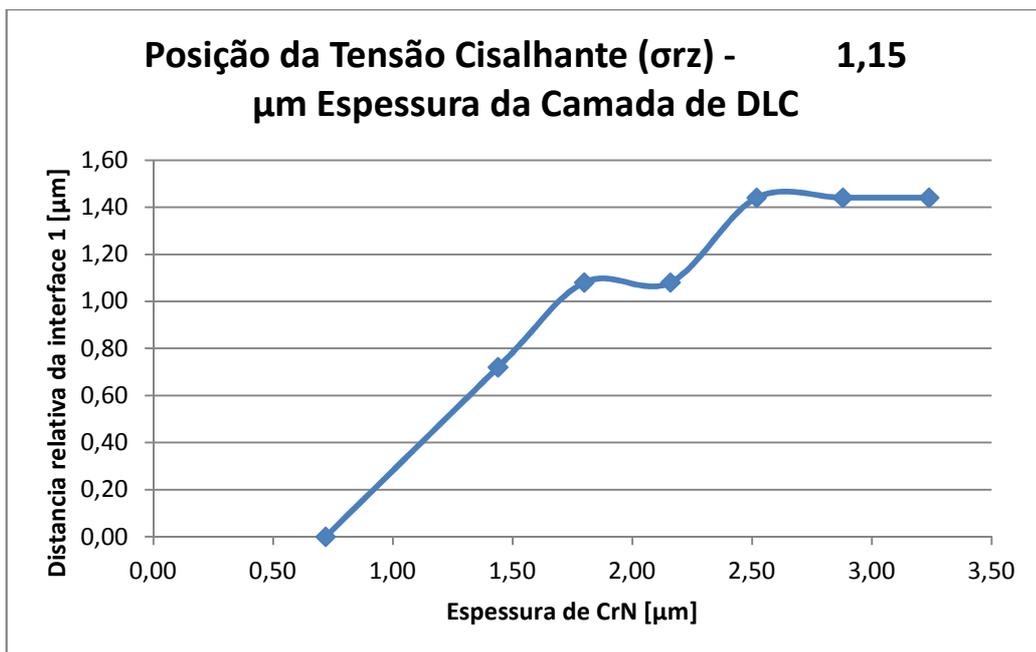


Figura 5.12: Posição da tensão cisalhante para as 7 variações de CrN e espessura de 1,15  $\mu\text{m}$  para o DLC.

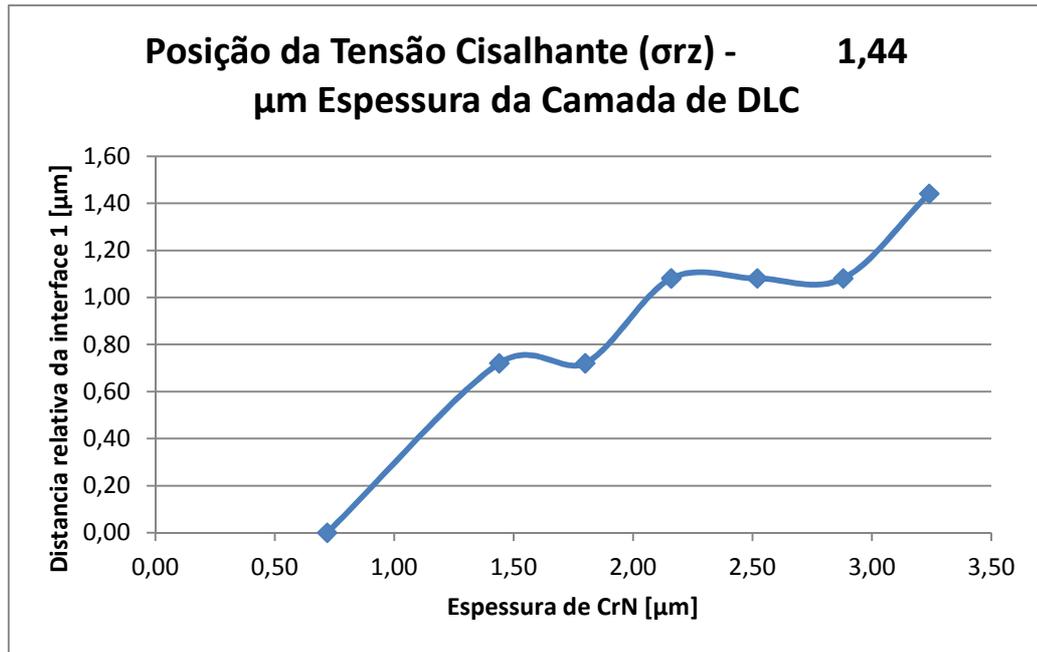


Figura 5.13: Posição da tensão cisalhante para as 7 variações de CrN e espessura de 1,44  $\mu\text{m}$  para o DLC.

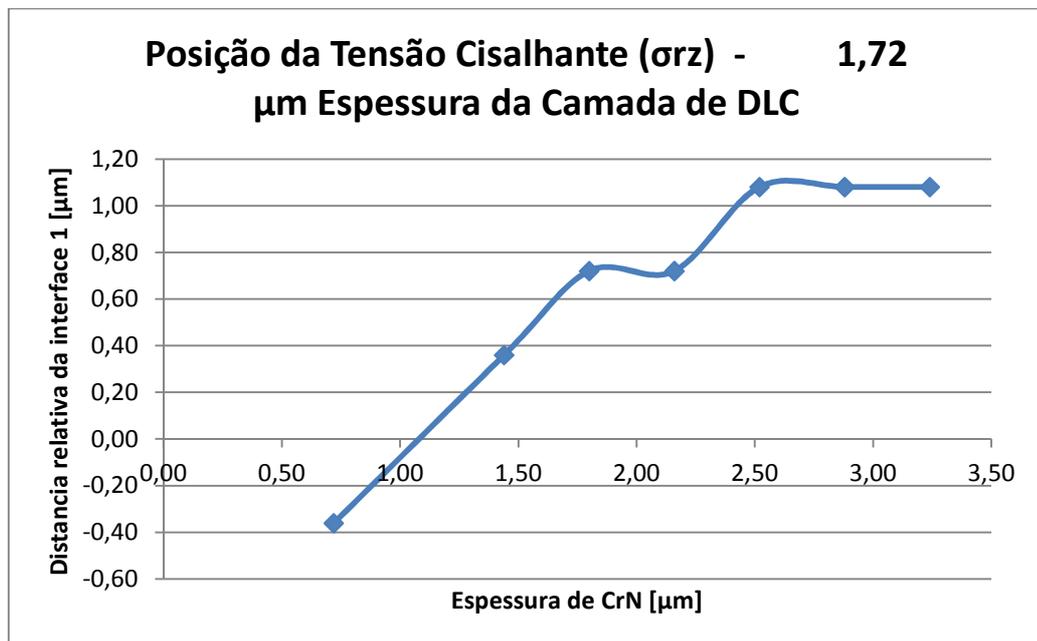


Figura 5.14: Posição da tensão cisalhante para as 7 variações de CrN e espessura de 1,72  $\mu\text{m}$  para o DLC.

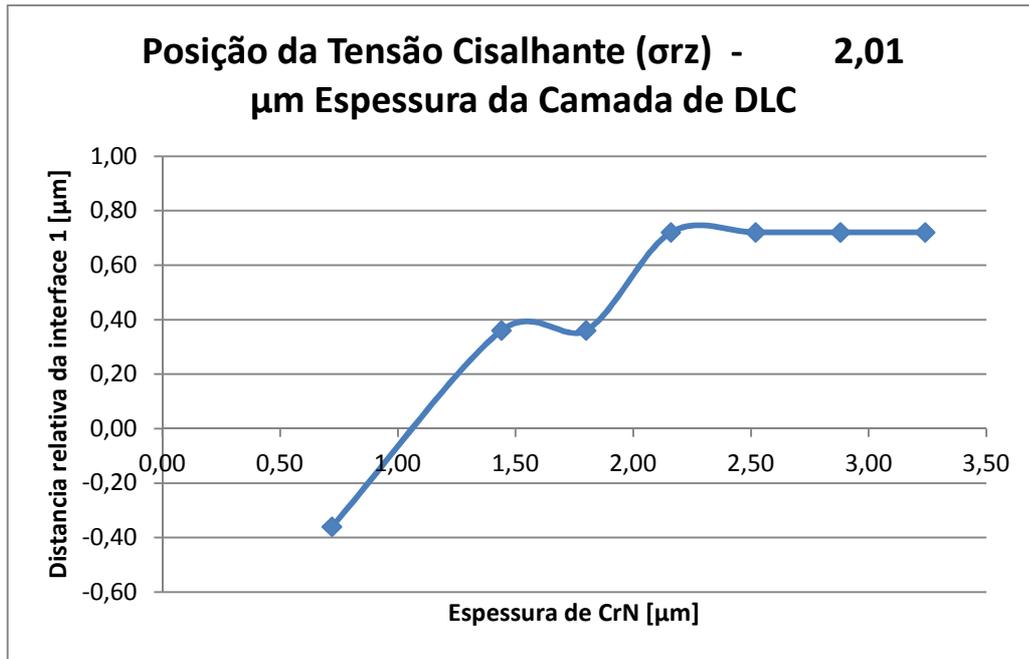


Figura 5.15: Posição da tensão cisalhante para as 7 variações de CrN e espessura de 2,01  $\mu\text{m}$  para o DLC.

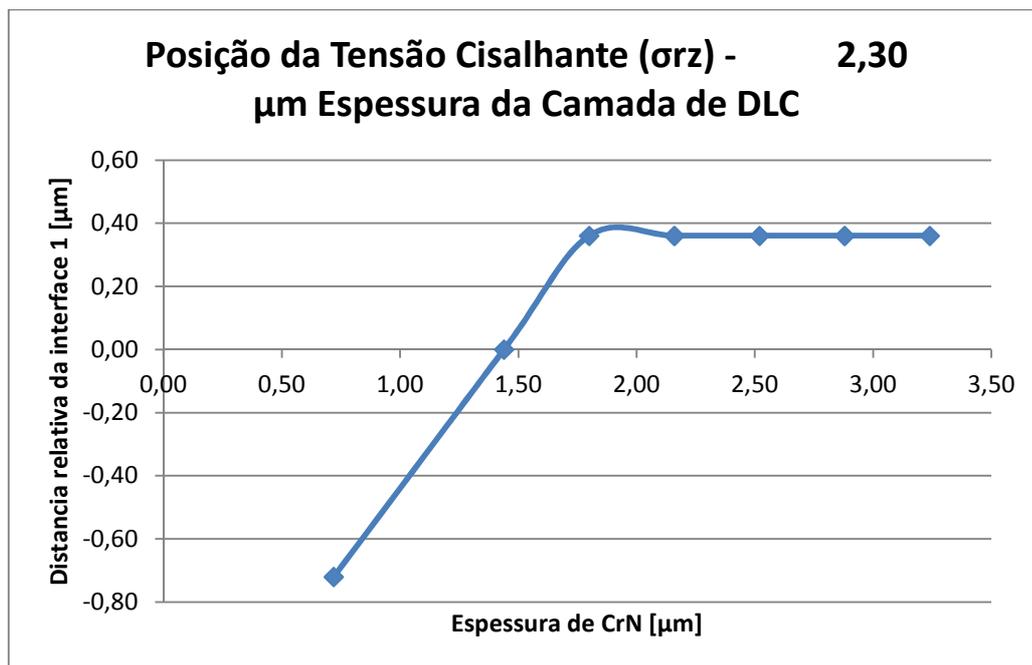


Figura 5.16: Posição da tensão cisalhante para as 7 variações de CrN e espessura de 2,30  $\mu\text{m}$  para o DLC.

É possível ver nos resultados uma tendência de estabilização da distância relativa após certo aumento da espessura da camada de CrN. Observa-se também que algumas configurações de espessuras resultam em tensão máxima cisalhante

dentro da camada de DLC, uma condição muito crítica por ser esta camada de material muito frágil.

As simulações 6 (0,58  $\mu\text{m}$  DLC e 2,88  $\mu\text{m}$  CrN) e 7 (0,58  $\mu\text{m}$  DLC e 3,24  $\mu\text{m}$  CrN) são as que apresentam tensão cisalhante máxima com maior distancia da interface. Já na simulação 43 (2,01  $\mu\text{m}$  DLC e 3,24  $\mu\text{m}$  CrN), a tensão cisalhante máxima está dentro da camada de DLC. As simulações que resultam na máxima tensão mais distante da interface são para a camada mais fina de DLC com as maiores espessuras de CrN. Isso sugere que a camada de suporte mecânico (CrN) deve ser proporcionalmente mais espessa que a camada mais externa para que a máxima tensão ocorra mais distante da interface.

### 5.3.3. Valor da tensão radial máxima ( $\sigma_{rr}$ ) na camada de DLC

Apesar da posição relativa da tensão radial máxima próxima à interface entre o substrato e a camada de CrN não se alterar quando as espessuras são alteradas, a tensão radial é crítica também na superfície, pois a camada depositada de DLC apresenta muitos defeitos e esta tensão normal tende a abrir estes defeitos na forma de trincas superficiais radiais.

Foram analisados então os valores máximos da tensão radial apenas na camada de DLC. As tensões radiais de tração ocorrem na superfície da camada de DLC, na região imediatamente após a área de contato, conforme exemplificado na Figura 5.17, que mostra a distribuição das tensões radiais. A Figura 5.18 mostra as posições das tensões radiais máxima e mínima. Os resultados mostrados nestas figuras são para o ensaio 7 e as Figuras 5.17 e 5.18 tem seus resultados em Pascal.

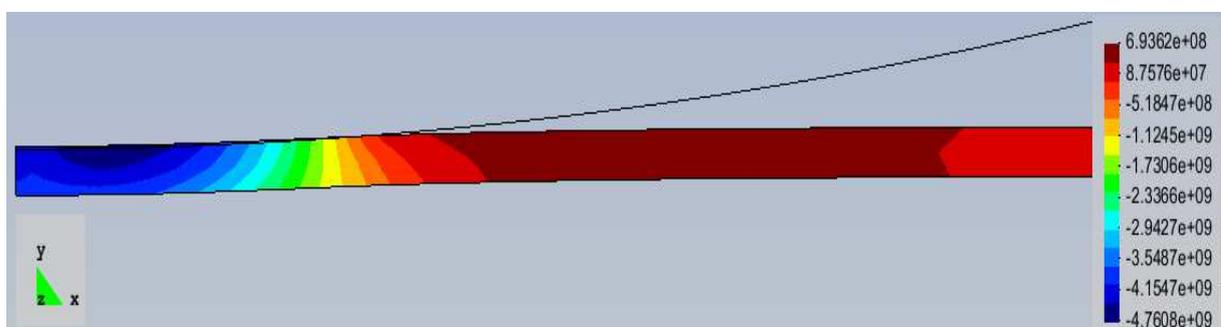


Figura 5.17: Distribuição das tensões radiais na camada de DLC na simulação 7.

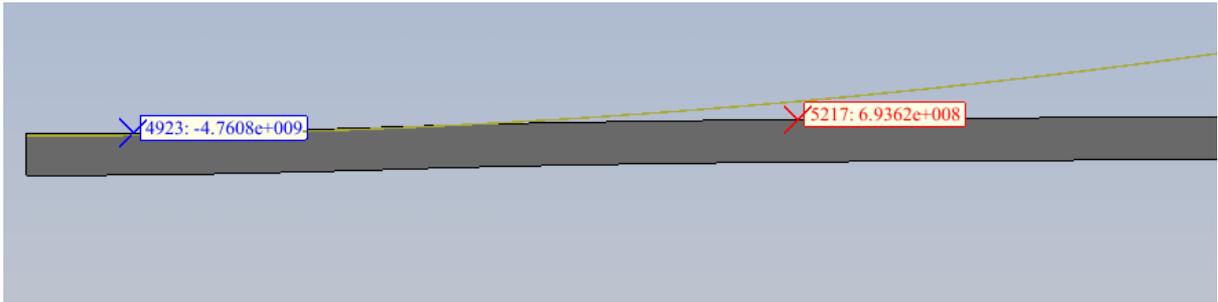


Figura 5.18: Posição das tensões radiais máxima e mínima na camada de DLC na simulação 7.

Segundo a Figura 5.18 a tensão radial de tração que ocorre na região justamente após a marca de indentação é de maior magnitude que a tensão radial de compressão que ocorre na área de contato, mostrando que as trincas radiais não tendem a ocorrer na região de indentação, pois a tensão radial compressiva é contrária a sua abertura. Já na região imediatamente fora da região de contato, a tensão radial trativa atua abrindo as trincas.

As Figuras 5.18 à 5.24 mostram as tensões máximas radiais na camada de DLC para as sete variações de CrN e cada uma das espessuras da camada de DLC.

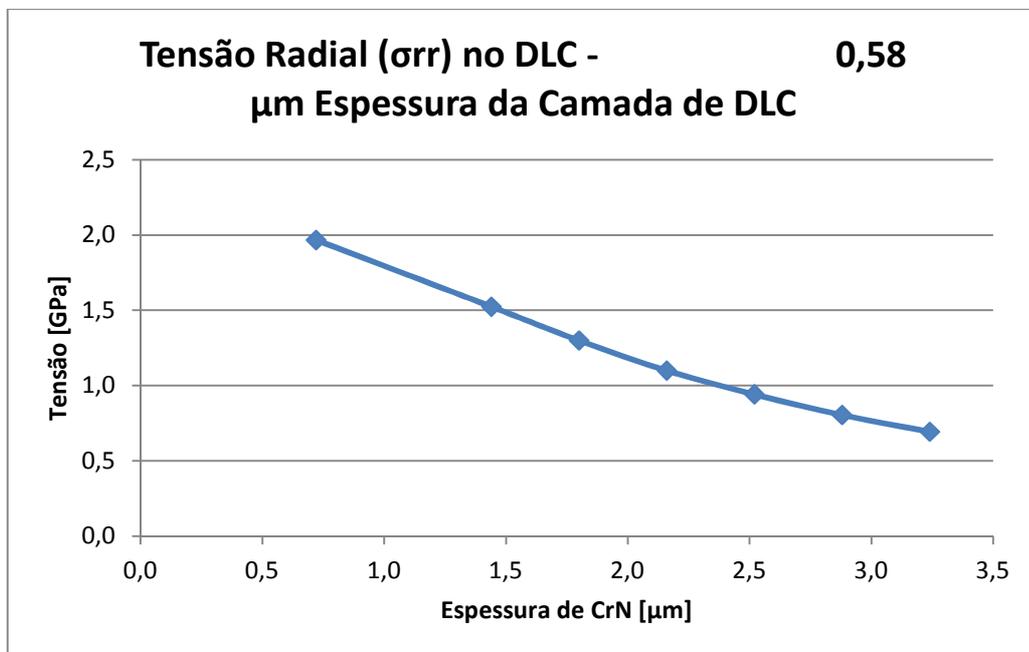


Figura 5.19: Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 0,58 µm da camada de DLC.

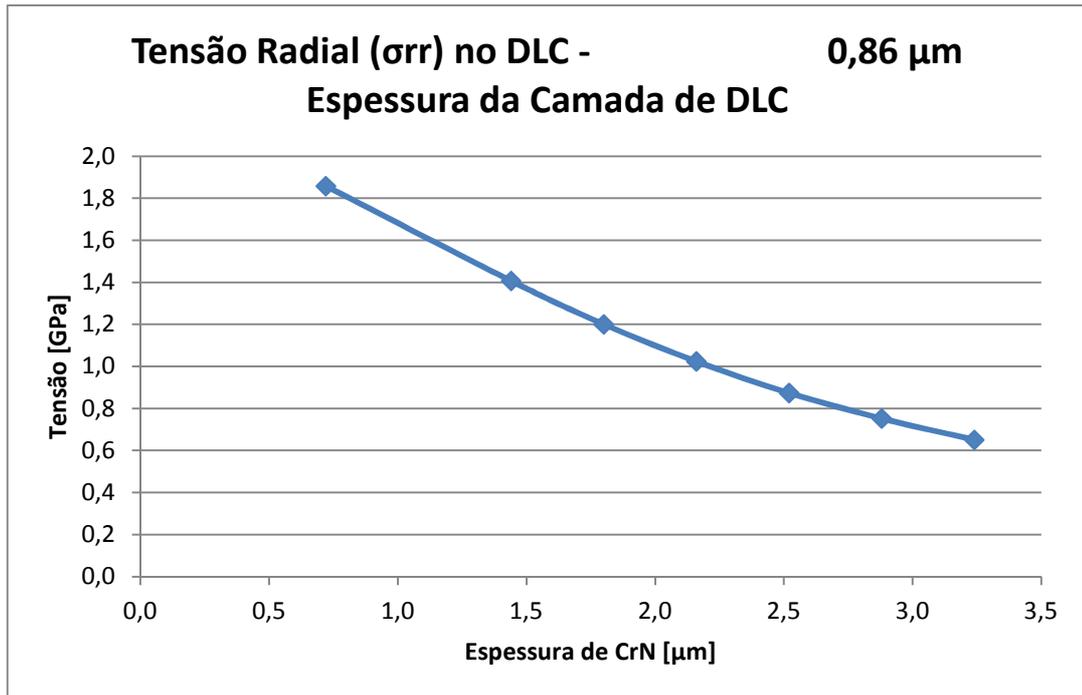


Figura 5.20: Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 0,86  $\mu\text{m}$  da camada de DLC.

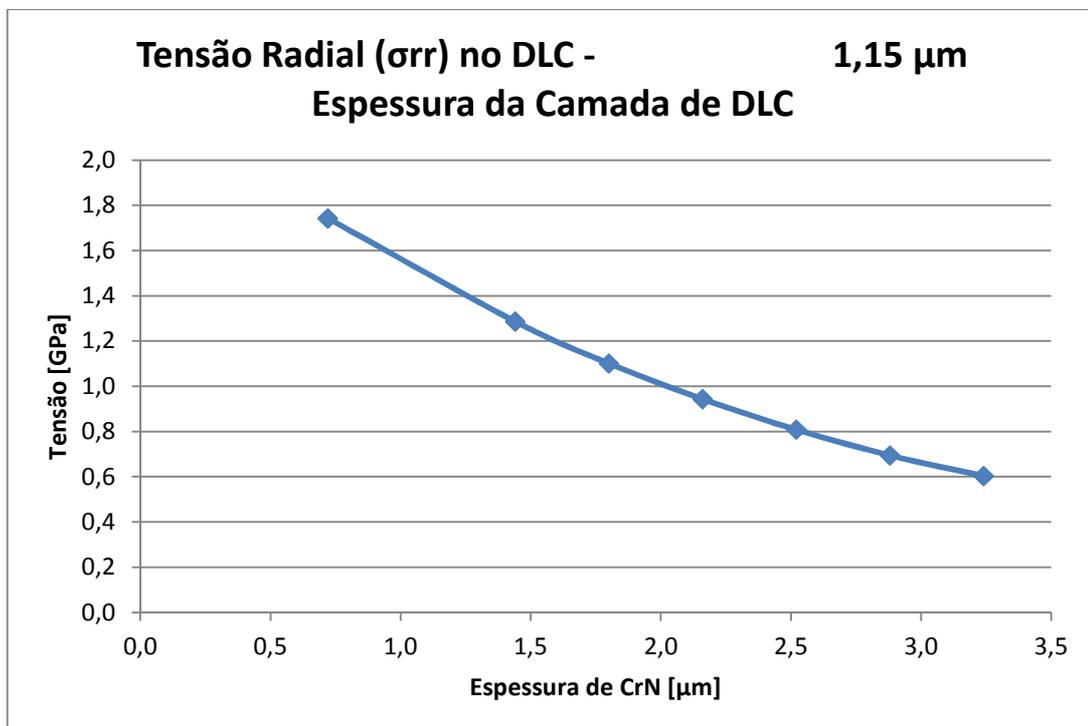


Figura 5.21: Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 1,15  $\mu\text{m}$  da camada de DLC.

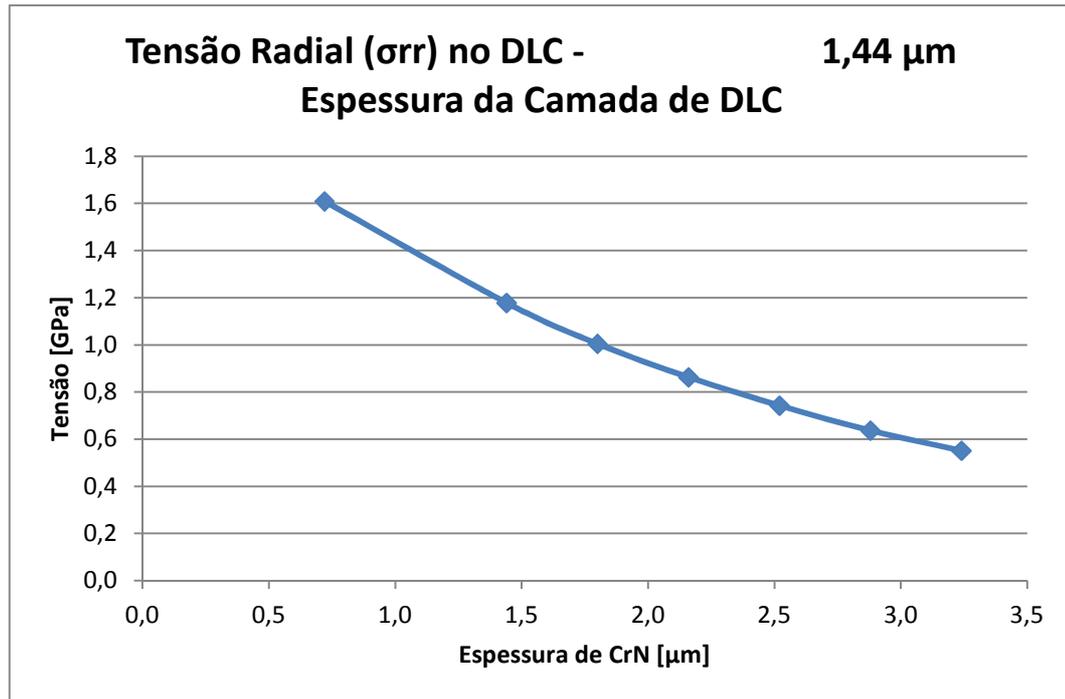


Figura 5.22: Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 1,44  $\mu\text{m}$  da camada de DLC.

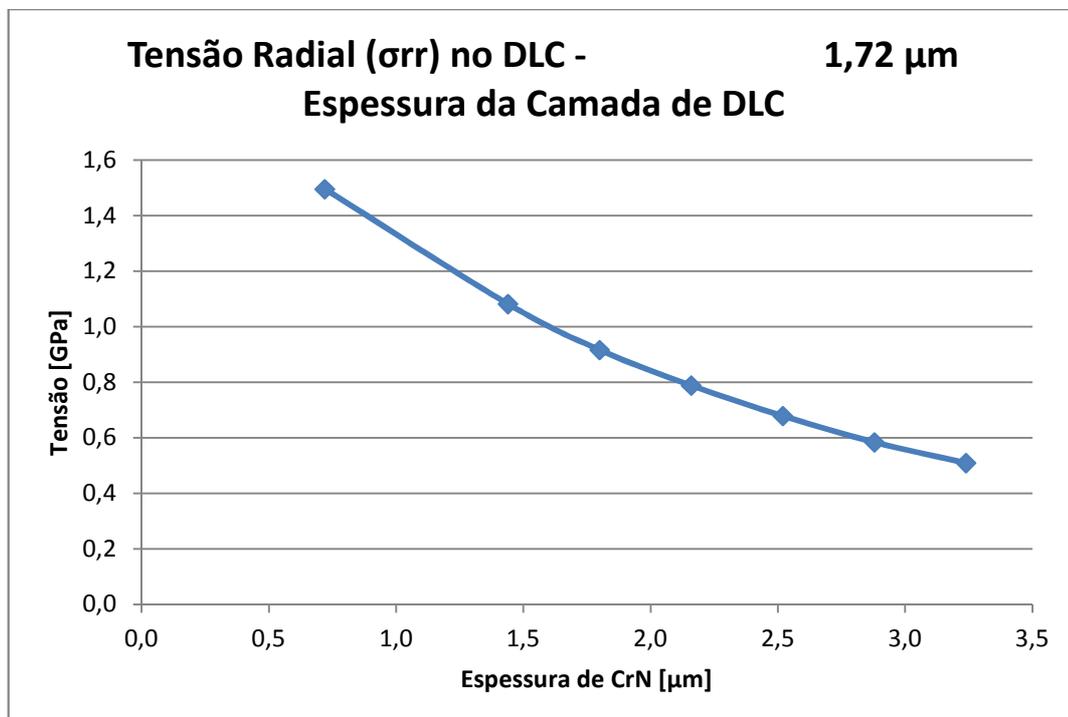


Figura 5.23: Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 1,72  $\mu\text{m}$  da camada de DLC.

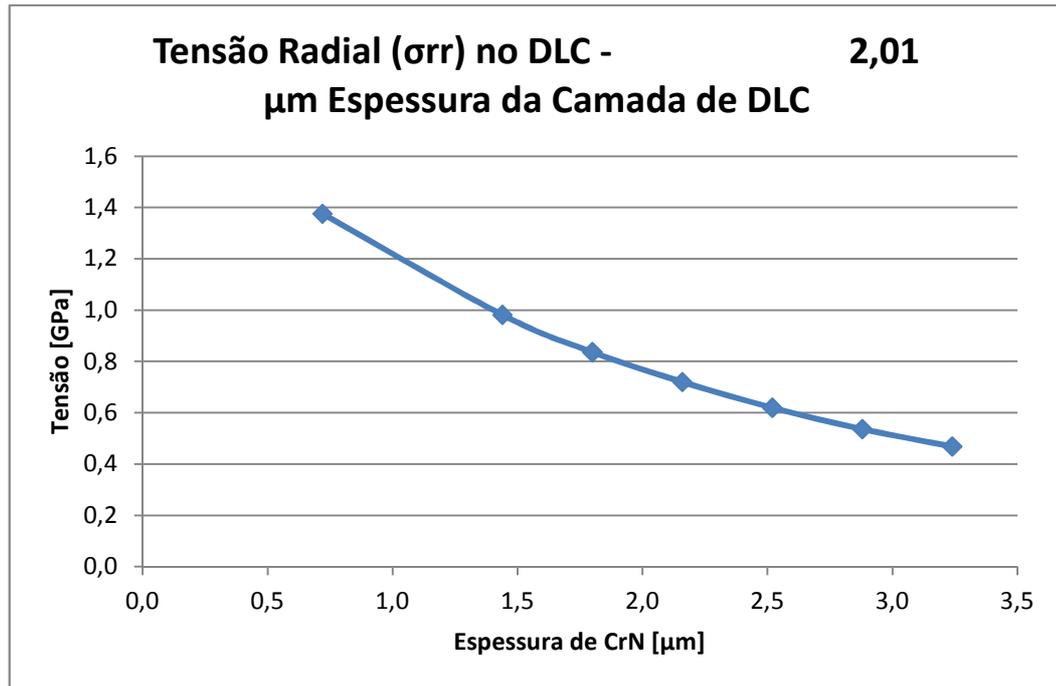


Figura 5.24: Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 2,01  $\mu\text{m}$  da camada de DLC.

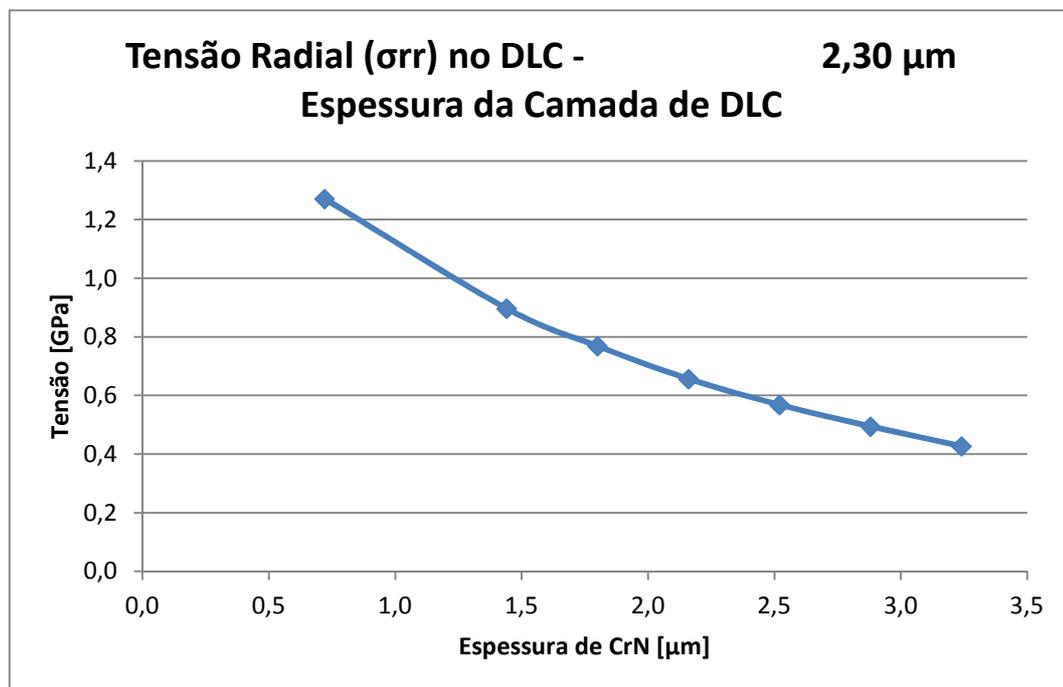


Figura 5.25: Tensões máximas radiais na camada de DLC para uma espessura de 2,30  $\mu\text{m}$  da camada de DLC.

O valor da tensão radial máxima na camada de DLC ocorre na superfície da amostra, logo após a marca de indentação e altera seu valor conforme são alteradas

as espessuras de DLC e CrN. A simulação que apresentou a menor tensão radial máxima na superfície é a simulação 49, porém esta simulação não apresenta bons resultados para a tensão cisalhante.

É possível notar que as tensões diminuem sua intensidade com o aumento das espessuras de DLC e CrN, porém é mais sensível a alteração de espessura da camada de suporte mecânico. Como as simulações 6 e 7 são as que obtiveram melhores resultados para tensão cisalhante, devem ser escolhidas as espessuras da simulação 7, pois esta apresenta maior camada de CrN, com resultados próximos dos obtidos na simulação 49, que tem a menor tensão radial na camada de DLC.

## CAPÍTULO VI

### Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

#### 6.1. Conclusões

A Primeira etapa deste trabalho foi comprovar a efetividade do MEF para o problema exposto, por meio da validação. O parâmetro utilizado para validação foi a dureza calculada para a camada de CrN. Comparando os resultados obtidos pelos dados experimentais e numéricos para a dureza, tem-se uma diferença de 18,1 GPa para o experimental e 18,5 GPa para o numérico, ou seja, aproximadamente 2% de diferença. O modelo então é válido para o problema proposto, já que existem erros relacionados à experimentação, aproximações feitas na simulação e erros matemáticos inerentes ao MEF e as formulações propostas para cálculo da dureza na camada.

A mesma validação é feita para o segundo modelo, com raio de ponta esférico, onde o erro encontrado foi de 2,69% no valor da dureza, comprovando a validade do segundo modelo para as demais simulações.

As tensões cisalhantes máximas ocorrem próximas a interface entre o CrN e o DLC e mudam de posição conforme as espessuras escolhidas para o DLC e CrN. A espessura ideal dentre as simuladas é então aquela onde a tensão cisalhante máxima ocorre mais distante da interface DLC/CrN em direção ao centro da camada de CrN, que são as simulações 6 (0,58  $\mu\text{m}$  DLC e 2,88  $\mu\text{m}$  CrN) e 7 (0,58  $\mu\text{m}$  DLC e 3,24  $\mu\text{m}$  CrN). É importante salientar que após uma certa proporção entre as espessuras de DLC e CrN, a posição da tensão cisalhante máxima tende a ser

constante, aumentando apenas sua magnitude, ou seja, para cada espessura de DLC deve ser aplicada uma camada de CrN mais espessa diretamente proporcional.

Em relação a tensão radial máxima na camada de DLC, esta diminui conforme se aumenta as espessuras, sendo mais sensível ao aumento da espessura de CrN. Apesar de a simulação 49 ser a que possui menor tensão radial na camada de DLC, todas as simulações feitas com a maior espessura de CrN apresentam resultados próximos.

Ao se comparar os resultados de posição da tensão cisalhante máxima e magnitude da tensão radial máxima na camada de DLC, pode-se afirmar que, para os parâmetros deste trabalho, as espessuras ideais para o DLC e CrN são as da simulação 7, ou seja, camada de DLC com 0,58  $\mu\text{m}$  de espessura e camada de CrN com 3,24  $\mu\text{m}$  de espessura

## **6.2. Sugestões para trabalhos futuros**

- Análise estatística para avaliar a influência relativa de cada uma das propriedades dadas como parâmetros de entrada da simulação, possibilitando um modelo que pode ser utilizado em outros materiais.
- Análise da relação entre as espessuras das camadas para determinar a proporção ideal entre a primeira e a segunda camada.

## CAPÍTULO VII

### Referências Bibliográficas

ASTM, Definition of terms relating to adhesion. D907-70, ASTM, Philadelphia, USA, 1970.

AZEVEDO, E. C., NETO, S. C., CHIERICE, G. O., LEPIENSKI, C. M., Aplicação de indentação instrumentada na caracterização mecânica de poliuretana derivada de óleo de mamona, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol.19, 2009.

BEZERRA, B. S. L., Estudo para prevenção de falhas de hastes de bombeio de petróleo através de aplicação de revestimento NiCr, *Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos, Universidade Tiradentes, Aracaju, 2007.*

BOHME, G.S., SOUZA, R.M., Análise por elementos finitos do contato em ensaios de indentação instrumentada, VIII Encontro de iniciação científica do LFS, Departamento de engenharia mecânica, escola politécnica, Universidade de São Paulo, 2007.

COSTA, R.F., Efeitos dos parâmetros de usinagem na formação da camada branca em torneamento duro nos aços-rolamento (DIN 100 CR6), *Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.*

DAO, M., CHOLLACOO, N., VAN VLIET, K.J., VENKATESH, T.A., SURESH, S., Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp

indentation. *Acta Materialia*, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2001.

DECHANDT, S. T., Caracterização de filmes duros de carbono amorfo DLC depositados em polietileno de peso molecular ultra-alto empregado em próteses ortopédicas, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

DESAI, C.S., ABEL, J. F., *Introduction to the Finite Element Method*, Van Nostrand, 1972.

DIAS, A. M. S., MODENESI, P. J., GODOY, G. C., CETLIN, P. R., Análise numérica do ensaio de indentação em WC-6Co, *Revista Matéria*, v. 0, n. 1, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

DUARTE, E.N., Estudo Analítico-Numérico de freios de estampagem em chapas metálicas, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

GIANNAKOPOULOS, A. E., SURESH, S., Theory of indentation of piezoelectric materials, *Acta Mater*, vol. 47, no 7, 1999.

GIANNAKOPOULOS, A. E., SURESH, S., Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation, *Scripta Materialia*, vol. 40, no. 10, 1999.

GRILL, A. Diamond-like carbon: State of the Art, *Diamond and Related Materials*, 1999.

HOLMBERG, K., MATTHEWS, A. *Coating Tribology: contact mechanics, deposition techniques and application – 2nd ed.* - Elsevier, 2009.

KIM, J., LEE, C., Dependence of the Physical Properties DLC films by PECVD on the Ar gas condition, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 42, 2003.

LARA, L. O. C., Otimização de tribo revestimentos multifuncionais: uma abordagem experimental/computacional, Tese de doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

LARA, L. O. C. De Mello, J.D.B, INFLUENCE OF LAYER THICKNESS ON THE PROPERTIES OF MULTIFUNCTIONAL TRIBOLOGICAL COATINGS, Proceedings of the ASME 2012 11th Biennial Conference On Engineering Systems Design And Analysis - ESDA2012, July 2-4, 2012, Nantes, France

MANHABOSCO, T. M., Tribocorrosão da liga Ti6Al4V, liga nitretada, Ti6Al4V revestida por filmes Diamond-like Carbon (DLC) e obtenção eletroquímica de filmes DLC. Tese de doutorado em engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

MEDEIROS, E. E., DIAS, A. M. S., MODENESI, P., Simulação numérica dos ensaios de indentação Vickers, anais do 12o encontro de iniciação científica e Pós - graduação do ITA, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2006.

MELDFORD, D. A., Quoted in: Future of Surface Engineering in UK, CEST, London, 1991.

MOSHFEG, A. Z., Sputtering Deposition: Physics and Technology, 3<sup>rd</sup> International Workshop on Physics and Technology of Thin Films, Physics Department, Sharif University of Technology, Iran, 2009.

OLIVER, W. C., PHARR, G.M., Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology, Journal of Materials Research, 2003.

RADE, D. A., Introdução ao Método dos Elementos Finitos, 2008.

ROBERTSON, J., Properties of diamond-like carbon. Surf. Coat. Technol., 1992.

RODRIGUEZ, S.A.P., Modelamento do ensaio de indentação instrumentada usando elementos finitos e análise dimensional: análise de unidade, variações experimentais, atrito e geometria e deformações do indentador, tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

ROYLANCE, D., Introduction to Fracture Mechanics, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2001.

SCHULIND, P., KINDERMAN, P., SCHULTE, R., SOCKEL, H.G., SCHLEINKOFER, U., GÖRTING, K., HEINRICH, W., Mechanical behavior of PVD/CVD-coated hard metals under cyclic loads.

SCHWARZER, N., CHUDOBA, T., PHARR, G.M., On the evaluation in coated materials during nanoindentation with sharp indenters, Surface & Coatings Technology, 200, 2006.

STAMPACK®, Basic Concepts, Version 5.5, Quantech ATZ S.A., Barcelona, Spain, 2003.

VICENTE, G.C.M., Caracterização de filmes DLC com potencial utilização em motores de combustão interna, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

VALLI, J., MÄKELÄ, U., Matthews, A., Assessment of coating adhesion. Surf. Engng, 2 (1986).

WEISS, H., Characterization and quality assurance of surfaces and surfaces coatings. 1<sup>st</sup> Australian Int. Conf. on Surface Engineering – Practice and prospects. Adeline, Australia, 1991.

ZIENKIEWICZ, O.C., The Finite Element Method, 3rd edition, McGraw-Hill Book Co., 1991.

## APÊNDICE I

### Algoritmo em MatLab® para determinar o coeficiente angular da reta

```
%%% Algoritmo para determinar o coeficiente angular de uma reta tangente a
um
%%% ponto 20% abaixo da curva e a carga máxima do ensaio.

clear all
close all
clc

load grafico2.txt; %busca o arquivo grafico2, que contém os dados de
carregamento e profundidade de indentação

n=200;
cont=1;
a=1;

while cont < n

    y(a,1)=(grafico2(cont,1));
    cont=cont+1;
    x(a,1)=(grafico2(cont,1));
    cont=cont+1;
    a=a+1;

end
```

```

a=1;
yc=0.8*y(1,1);

while y(a,1) >= yc

    y2=y(a,1);
    x2=x(a,1);
    a=a+1;

end

m=(y(1,1)-y2)/(x(1,1)-x2)
y3=0:0.001:20;
x3=(-(y(1,1)-y3)/m)+x(1,1);

fprintf('Curvas experimentais \n (x,y) máximo = (%4.4f,%4.4f)\n (x,y) 20%%
abaixo = (%4.4f,%4.4f)\n (x,y) mínimo = (%4.4f,%4.4f)\n (x,y) em 0 da reta
= (%4.4f,%4.4f)\n \n',x(1,1),y(1,1), x2, y2,x(100,1),y(100,1),x3(1),y3(1))

figure;
plot(x,y,'r-');
hold on;
plot(x2,y2,'g*');
hold on;
plot(x(1,1),y(1,1),'g*');
hold on;
plot(x3,y3,'g-');
hold on;
xlabel('Profundidade h [ $\mu\text{m}$ ]');
ylabel('Carregamento P [mN]');

```