

ISABELA COSTA SALMEN EVANGELISTA

ANÁLISE DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES EM
SÓLIDOS TEXTURIZADOS E REVESTIDOS



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2017

ISABELA COSTA SALMEN EVANGELISTA

**ANÁLISE DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES EM SÓLIDOS
TEXTURIZADOS E REVESTIDOS**

Dissertação 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.^a Dr.^a. Sonia Aparecida Goulart de Oliveira

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Henara Lillian Costa Murray

Uberlândia

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

E92a
2017 Evangelista, Isabela Costa Salmen, 1991-
Análise de tensões e deformações em sólidos texturizados e revestidos [recurso eletrônico] / Isabela Costa Salmen Evangelista. - 2017.

Orientadora: Sonia Aparecida Goulart de Oliveira.

Coorientadora: Henara Lilian Costa Murray.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2019.74>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. 2. Tensao e deformação. 3. Método dos elementos finitos. 4. Revestimentos. I. Oliveira, Sonia Aparecida Goulart de, 1959-, (Orient.). II. Murray, Henara Lilian Costa, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO
NÚMERO DE ORDEM: 485
DATA: 11/08/2017

Às nove horas do dia onze de agosto de dois mil e dezessete, no Anfiteatro A - Bloco 50, Campus Santa Mônica, reuniu-se a Banca Examinadora composta pelos Professores Dra. Sonia Aparecida Goulart Oliveira (orientadora) e Dr. Washington Martins da Silva Júnior, da Universidade Federal de Uberlândia, e Dr. Luiz Claudio Oliveira, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais/Campus Divinópolis, para, sob a presidência da primeira, desenvolver o processo de avaliação da dissertação intitulada “*Análise de Tensões e Deformações em Sólidos Texturizados e Revestidos*”, apresentada pela aluna **ISABELA COSTA SALMEN EVANGELISTA**, matrícula número **11512EMC005**, em complementação aos requisitos determinados pelo Regimento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para obtenção do título de Mestre. Após discorrer sobre seu trabalho, a candidata foi arguida pelos membros da Banca, diante das comunidades universitária e externa. Em seguida, a dissertação foi avaliada em seção privada pelos membros da Banca que, ao encerrar o processo, consideraram-na:

- () Aprovada
() Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação do orientador
() Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação da banca
() Reprovada

conferindo à aluna, em caso de aprovação, o título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos e Vibrações**; Linha de Pesquisa: **Projetos de Sistemas Mecânicos**. As demandas complementares observadas pelos examinadores deverão ser satisfeitas no prazo máximo de 30 dias, para dar validade a esta aprovação. Para constar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pela presidente e demais membros da Banca.

Assinaturas:

Profa. Dra. Sonia A. Goulart Oliveira (orientadora)

UFU

Prof. Dr. Washington Martins da Silva Júnior

UFU

Prof. Dr. Luiz Claudio Oliveira

CEFET-MG

Uberlândia, 11 de agosto de 2017

DEDICATÓRIA

À vovó Iracy (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, que sempre apoiou minhas decisões, e sempre esteve junto comigo para enfrentar todas as dificuldades e também comemorar todas as minhas conquistas.

À minha orientadora, professora Sonia, por toda a confiança, ensinamentos e a enorme disposição para ajudar em tudo que fosse necessário.

À minha co-orientadora, professora Henara, que mesmo de longe, sempre esteve à disposição para qualquer esclarecimento, e contribuiu bastante com seus conhecimentos para o desenvolvimento do projeto.

Aos colegas de laboratório, da sala FEMEC-CIMNE, sempre disponíveis a ajudar. Em especial ao Fábio, que me ajudou a resolver vários problemas encontrados ao longo do caminho.

Aos colegas do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), pelo auxílio durante a preparação da parte experimental, em especial ao Vinícius, que sempre esteve à disposição para auxiliar. Ao Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) e ao Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEst) pela disponibilidade e ajuda na realização dos experimentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento do Programa de Pós-graduação e o auxílio através da bolsa de estudos.

E à Universidade Federal de Uberlândia e ao Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, que juntamente com seus professores, colaboradores e técnicos propiciaram um grande aprendizado.

EVANGELISTA, I. C. S. **Análise de Tensões e Deformações em Sólidos Texturizados e Revestidos**. 2017. 73 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Materiais multicamadas são frequentemente utilizados para melhorar as propriedades tribológicas de regiões de contato. Estudos sugerem que introduzir texturizações superficiais específicas nesses componentes, não só podem manter um baixo coeficiente de atrito, como também podem prolongar substancialmente a vida útil do revestimento. Diferentes testes tribológicos comprovam a eficiência da texturização superficial nos aspectos de desgaste e atrito, mas pouco é conhecido sobre o comportamento dos campos de tensão e deformação desses materiais. Devido à complexidade destas análises, os métodos numéricos auxiliam na previsão e estudo desses comportamentos. Este trabalho tem como objetivo analisar os campos de tensão e deformação, através do Método de Elementos Finitos, de um sólido revestido e texturizado superficialmente com bolsos circulares, e avaliar a influência de alguns parâmetros geométricos neste comportamento. A texturização é composta por bolsos circulares com duas relações de diâmetro/profundidade, uma de 100/10 μm e outra com 200/20 μm e densidade de área texturizada mantida entre 20 e 30%. O material é composto de um substrato de aço de baixo carbono ABNT 1020, revestido com uma camada de nitreto de cromo (CrN) de 3,24 μm de espessura e recoberto por uma camada de DLC de espessura igual a 0,58 μm . Foram realizadas diversas análises elasto-plásticas em elementos finitos de um contato normal com amostras com superfícies lisa, texturizada e, texturizada e revestida para verificar a transição de comportamento para os diferentes cenários. As simulações foram realizadas com o *software* ABAQUS®, e os resultados foram analisados com base nos campos de tensões e deformações. Os resultados evidenciam que a presença da texturização aumenta os valores das tensões e deformações plásticas nos componentes, bem como gera regiões de concentração de tensão. Os componentes texturizados e revestidos apresentaram elevados valores de tensão, com menores deformações plásticas no substrato, que é protegido pelo revestimento. E a texturização com relação diâmetro/profundidade de 200/20 μm exibiu melhores resultados, apresentando valores inferiores de tensões e deformações comparada a outra configuração analisada.

Palavras Chave: Texturização Superficial, Revestimentos Tribológicos, Campos de Tensão e Deformação, Método dos Elementos Finitos

EVANGELISTA, I. C. S. **Stress and Strain Analysis of Textured Layered Solids**. 2017. 73 f. MSc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Multilayered media are often used to enhance tribological properties in contact regions. Studies show that the presence of some patterns in the surface of the components, not only can low the friction coefficient but also can increase the lifespan of the layers. Many tribological tests prove the efficiency of the surface pattern, however, relatively few studies discuss the stress and strain fields of those materials. Since these analyses take a lot of effort and are very complex, numerical methods are very useful to help the analyses of those behaviours. This study aims to investigate the influence of the textured surfaces, coated and uncoated, in the stress and strain fields, due to a spherical indentation, using Finite Elements Method , and also the influence of some geometric parameters. The patterned surface exhibits circular pockets regularly distributed in the surface with a density of 25% of the total area with two configurations, one with the ratio diameter/depth of 100/10 μm another with 200/20 μm . The solid is made of low carbon steel, coated with a chromium nitride (CrN) with 3.24 μm thickness, covered with a layer of diamond-like carbon (DLC) with 0.58 μm thickness. Several elastic-plastic finite element analysis of a sphere in normal contact with a flat, patterned and patterned and coated media were conducted in order to verify the transition of behaviour between the different scenarios. The simulations were performed with ABAQUS®, and the results are presented for the stress and deformation fields. Results shows that the pattern enhance the stress and deformation, as well create regions of stress concentration. The textured layered solid presented high values of stress with less plastic deformation in the substrate, which is protected by the layers. And the texture with the ratio diameter/depht of 200/20 μm exhibited better results, showing lower values for stress and plastic deformation when compared with the other geometry analysed.

Keywords: Patterned Surface, Tribological Coatings, Stress and Strain Fields, Finite Elements Method

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diferentes escalas de um contato texturizado (GROPPER; WANG; HARVEY, 2015)

Figura 2.2 - Relação entre as propriedades funcionais, aplicações e a tecnologia requerida (adaptada de BRUZZONE et al., 2008)

Figura 2.3 - Detalhe da superfície texturizada e super hidrofóbica da flor de lótus (William Thielicke, 2007)

Figura 2.4 - Microscopia ótica da seção transversal de uma peça de alumínio texturizada e recoberta com revestimento (LAMRAOUI et al., 2010)

Figura 2.5 - Implante Odontológico de fixação ortopédico (a) rosca do parafuso, (b) morfologia da superfície (DA SILVA, 2006)

Figura 2.6 - Vista do corte transversal de uma esfera deslizando sobre um plano (a) superfície lisa, (b) superfície texturizada (AHMED et. al., 2015)

Figura 2.7 - Diferentes geometrias de texturização (BRUZZONE; COSTA, 2013)

Figura 2.8 - Comparação entre as forças de atrito de amostras texturizadas com uma amostra lisa em condições de lubrificação mista (VLADESCU et al., 2014)

Figura 2.9 - Superfície texturizada com bolsos circulares produzida por Texturização a Laser (PFLEGING, 2015)

Figura 2.10 - Topografia da superfície texturizada com bolso circular (a) vista em perspectiva e (b) perfil linear (COSTA; HUTCHINGS, 2008)

Figura 3.1 - Fratura de um revestimento duro em um substrato macio ocorre na área de contato e suas extremidades (HOLMBERG; MATTHEWS, 2009)

Figura 3.2 - Representação de um processo CVD (HOLMBERG; MATTHEWS, 2009)

Figura 3.3 - Técnicas utilizadas para atomização de materiais no processo PVD (HOLMBERG; MATTHEWS, 2009)

Figura 3.4 - Modelo de uma superfície texturizada e revestida

Figura 4.1 - Representação de uma geometria discretizada em nós, ligados entre si, formando elementos, que por sua vez se unem formando a malha (FRIES; BELYTCHKO, 2010)

Figura 5.1 - Curva de Tensão *versus* Deformação, gerada durante o ensaio de tração

Figura 5.2 - Curva de Carga *versus* Deslocamento, típica de um ensaio de Indentação Instrumentada

Figura 5.3 - Detalhe do Equipamento utilizado no ensaio de Macroindentação Instrumentada, *PropInSitu 2*

Figura 5.4 - Amostras fabricadas para realização do ensaio (a) antes do lixamento e polimento e (b) após o lixamento e polimento superficial

Figura 5.5 - Modelo da geometria utilizada para validação

Figura 5.6 - Geometria e dimensões do modelo proposto

Figura 5.7 - (a) Malha do Modelo de Validação

Figura 5.8 - Detalhe dos Modelos texturizados com bolsos circulares (a) diâmetro de 100 μm e profundidade de 10 μm , (b) diâmetro de 200 μm e profundidade de 20 μm

Figura 5.9 - Amostra com as diferentes posições adotadas para o indentador

Figura 5.10 - Detalhes dos Modelos criados para as três diferentes posições (a) 1, (b) 2, (c)

Figura 5.11 - Malha do Modelo Texturizado com relação de profundidade/diâmetro de 100/10 μm , na posição 1 (a) completo, (b) em detalhe

Figura 5.12 - Detalhe da Malha do Modelo Texturizado e Revestido com relação de profundidade/diâmetro de 100/10 μm , na posição 3

Figura 5.13 - Nova geometria para o Modelo Texturizado e Revestido com relação de profundidade/diâmetro de 100/10 μm

Figura 5.14 - Novas posições relativas de indentação para os Modelos Texturizados e Revestidos

Figura 5.15 - Detalhe da malha do novo Modelo Texturizado e Revestido com relação de profundidade/diâmetro de 100/10 μm

Figura 6.1 - Curva Tensão *versus* Deformação obtida no ensaio de tração

Figura 6.2 - Curva Força *versus* Deslocamento com os resultados obtidos no Ensaio Experimental, e das Simulações com 82 μm e 75 μm de profundidade de indentação

Figura 6.3 - (a) Curva dos perfis das calotas de indentação lidas após o experimento e a simulação (b) Perfil tridimensional da calota esférica obtida após o ensaio de Indentação Instrumentada

Figura 6.4 - (a) Tensão Equivalente [MPa] e (b) Deformação Plástica Equivalente do modelo 100 P2

Figura 6.5 - Tensão Equivalente [MPa] para os modelos (a) liso, (b) 100 P1, (c) 100 P2 e (d) 100 P3

Figura 6.6 - (a) Distribuição das tensões cisalhantes na simulação de FELICE-NETO (2012) e (b) Distribuição das tensões cisalhantes no modelo liso e revestido proposto neste trabalho

Figura 6.7 - (a) Tensão Equivalente [MPa] para a amostra revestida lisa e (b) Tensão Equivalente para a amostra com bolso de 100 μm na posição 2, na condição de carregamento

Figura 6.8 - Tensão Equivalente para as amostras texturizadas com bolsos de 100 μm e 200 μm , e para as amostras texturizadas e revestidas com bolsos de 100 μm e 200 μm de diâmetro

Figura 6.9 - Tensão Equivalente[MPa] para a amostra texturizada e revestida na posição 1/16 (a) com bolso de 100 μm de diâmetro e 10 μm de profundidade (b) com bolso de 200 μm de diâmetro e 20 μm de profundidade, na situação de carregamento

Figura 6.10 - Tensão equivalente[MPa] para a amostra texturizada e revestida (a) com bolso de 200 μm de diâmetro, na posição 1/16 e (b) com bolso de 100 μm de diâmetro, na posição da borda, na situação de carregamento

Figura 6.11 - Deformação Plástica Equivalente para as amostras texturizadas com bolsos de 100 μm e 200 μm , e para as amostras texturizadas e revestidas com bolsos de 100 μm e 200 μm de diâmetro

Figura 6.12 - Deformação Plástica Equivalente para a amostra texturizada com bolsos de 100 μm , na posição 1/8, na situação de carregamento

Figura 6.13 - Máxima Tensão Cisalhante a amostra texturizada e revestida com bolsos de 200 μm , na posição 1/8, na situação de descarregamento

Figura 6.14 - Máxima Tensão Cisalhante para as amostras texturizadas com bolsos de 100 μm e 200 μm , e para as amostras texturizadas e revestidas com bolsos de 100 μm e 200 μm de diâmetro

Figura 6.15 - Máxima Tensão de Tração [MPa] para a amostra texturizada e revestida com bolsos 200 μm de diâmetro, na posição 1/4, na situação de carregamento

Figura 6.16 - Máxima Tensão de Tração para as amostras texturizadas com bolsos de 100 μm e 200 μm , e para as amostras texturizadas e revestidas com bolsos de 100 μm e 200 μm de diâmetro

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 Propriedades utilizadas nas Simulações

Tabela 5.2 Propriedades utilizadas nas Simulações das Amostras Texturizadas e Revestidas

Tabela 5.3 Planejamento das Simulações

Tabela 6.1 Resultados das Tensões e Deformações Plásticas Equivalentes para os Modelos Texturizados, nas situações: Carregado e Descarregado

Tabela 6.2 Resultados nas situações Carregado e Descarregado

Tabela 6.3 Resultados nas novas posições, nas situações: Carregado e Descarregado

Tabela 6.4 Resultados para os Modelos Texturizados, nas novas posições, nas situações: Carregado e Descarregado

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Módulo de Elasticidade
S_{ut}	Limite de Resistência a Tração
S_y	Limite de Escoamento
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Densidade

Sumário

CAPÍTULO I	1
Introdução	1
CAPÍTULO II	5
Texturização Superficial	5
2.1 Propriedades funcionais das superfícies	6
2.1.1 Propriedades tribológicas	9
2.2 Técnicas de Texturização	11
2.3 Parâmetros de texturização	12
CAPÍTULO III	17
Revestimentos Tribológicos	17
3.1 Materiais Multicamadas	18
3.2 Métodos de Deposição	19
3.2.1 Deposição Química de Vapor (CVD)	19
3.3 Carbono Tipo Diamante (DLC)	22
3.4 Revestimentos em Superfícies Texturizadas	23
CAPÍTULO IV	25
Método de Elementos Finitos	25
4.1 Solução Explícita	26
4.2 Solução Implícita	27
4.3 ABAQUS®	27
CAPÍTULO V	29
Metodologia	29
5.1 Validação do Modelo	29
5.1.1 Ensaio de Tração	30
5.1.2 Indentação Instrumentada	31
5.1.3 Modelo em Elementos Finitos: Validação	33
5.1.3.1 Simplificações	33
5.1.3.2 Parâmetros Utilizados	34
5.1.3.3 Malha Utilizada	36
5.2 Modelos Texturizados	37

5.2.1 Simplificações	38
5.2.2 Parâmetros Utilizados	38
5.2.3 Malha Utilizada	40
5.3 Modelos Texturizados e Revestidos em Elementos Finitos	41
5.3.1 Parâmetros Utilizados	41
5.3.2 Malha Utilizada	42
5.3.3 Análises de Novas Posições	43
5.3.3.1 Parâmetros Utilizados	44
5.3.3.2 Malha Utilizada	45
5.4 Planejamento das Simulações	45
CAPÍTULO VI	47
Resultados e Discussão	47
6.1. Validação do Modelo e Propriedades	47
6.2. Análises dos Modelos Texturizados	51
6.3. Análises dos Modelos Texturizados e Revestidos	54
6.4. Novas Análises dos Modelos Texturizados e Revestidos	56
6.4.1 Tensão Equivalente	59
6.4.2. Deformação Plástica Equivalente	61
6.4.3. Máxima Tensão Cisalhante	62
6.4.4 Máxima Tensão de Tração	64
6.5. Análises dos Resultados	65
CAPÍTULO VII	67
7.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	68
CAPÍTULO VIII	69
Referências Bibliográficas	69

CAPÍTULO I

Introdução

Devido à forte competição internacional, as exigências de mercado para componentes mais eficientes e os acordos realizados para redução de emissão de gases e consumo de combustível, o aumento da vida útil dos componentes e a redução de perdas por atrito têm se tornado cruciais. Ao longo dos últimos anos, as condições de operação dos componentes em contato tornaram-se cada vez mais severas, em vista do crescente desenvolvimento industrial e tecnológico, exigindo maiores esforços para garantir uma boa lubrificação e diminuir o atrito e o desgaste.

Os revestimentos são frequentemente utilizados para melhorar as propriedades tribológicas de regiões de contato. São encontradas diversas literaturas que oferecem diferentes opções para análise de contato de componentes revestidos, tanto numéricas quanto analíticas (DJABELLA; ARNELL, 1993, PETTERSON; JACOBSON, 2004, HOLMBERG et al., 2005; LARA; DE MELLO, 2012). Um objetivo comum destes estudos tem sido a investigação dos efeitos do coeficiente de atrito, da espessura do revestimento e das propriedades mecânicas sobre a tensão de contato e os campos de deformação.

Outra alternativa de modificação superficial que tem sido amplamente utilizada na otimização do desempenho tribológico de componentes mecânicos é a texturização superficial. Ela consiste em alterar-se a topografia de uma superfície de forma a criar um arranjo, quase sempre regular, de picos e/ou vales, de geometria geralmente controlada, os quais possam conferir alguma propriedade funcional à superfície (BRUZZONE et al., 2008, COSTA; HUTCHINGS, 2015, GACHOT et al., 2017).

No entanto, a vasta maioria dos estudos sobre o contato de superfícies revestidas são realizados para sólidos com superfícies planas. Sabe-se muito pouco sobre o papel das características geométricas da texturização superficial sobre o comportamento dos campos de tensão e deformação de componentes revestidos e texturizados (GONG; KOMVOPOULOS, 2003).

A partir dos anos 90, a texturização superficial apareceu como uma opção viável para superfícies utilizadas na engenharia, apresentando melhoras significativas na capacidade de suportar cargas, na resistência ao desgaste e coeficiente de atrito em componentes mecânicos (ETSION, 2005). Contrariando a ideia de que superfícies lisas garantem um menor atrito, resultados sugerem que introduzir texturizações superficiais específicas em componentes revestidos, não só pode ajudar a manter um baixo coeficiente de atrito, como também pode prolongar substancialmente a vida útil do revestimento, influenciando no seu comportamento de delaminação (DING et. al, 2010).

O comportamento tribológico das superfícies texturizadas está sendo bastante estudado atualmente do ponto de vista de comportamento de lubrificação, atrito e desgaste (COSTA, 2014; ETSION, 2005), mas ainda há poucos estudos sobre os comportamentos dos campos de tensão e deformação desses sólidos, e como isso afeta o comportamento e a vida útil do componente.

Os bolsos e depressões constituintes dos padrões de texturização atuam aprisionando os debris de desgaste, retirando-os da interface de contato e reduzindo o desgaste dos componentes. Outra importante função que desempenham é que agem como reservatórios de lubrificante, capazes de alimentar o contato com lubrificante direto na interface entre as superfícies, diminuindo o atrito (PETTERSSON; JACOBSON, 2004), e podem atuar também no aumento da pressão hidrodinâmica entre as superfícies (BRUZZONE; COSTA, 2013).

Devido à complexidade de análise do fenômeno de contato, a maioria dos trabalhos encontrados sobre o comportamento de superfícies com texturização é experimental, com apenas casos específicos descritos analiticamente. Mas, apesar disso, diversos autores já obtiveram resultados notáveis em termos de redução de atrito e desgaste com a utilização de superfícies texturizadas (BRUZZONE et al., 2008, DING et al., 2010, DA SILVA; COSTA, 2017).

A utilização de análises numéricas é apropriada para problemas complexos de contato, nas quais as soluções analíticas para os campos de tensão e deformação superficiais e subsuperficiais são extremamente difíceis de obter (GONG;

KOMVOPOULOS, 2003). As análises numéricas também oferecem a possibilidade de obtenção de resultados a menores custos. Porém, para garantir a representatividade do modelo, os resultados devem sempre ser contrastados com valores obtidos experimentalmente ou analiticamente, para garantir sua validade e representabilidade.

Este trabalho tem como objetivo analisar o efeito da texturização superficial nos campos de tensão e deformação de um sólido, com e sem a presença de revestimento, e desenvolver uma metodologia de análise para o problema. As análises foram feitas através de ensaios simulados pelo Método de Elementos Finitos, realizados no software Abaqus®, devido ao contato normal de uma esfera rígida contra a superfície, simulando um ensaio de indentação instrumentada. Segundo Azevedo et al. (2009), esse 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.

Foram realizadas simulações de indentação em superfícies lisas e texturizadas, utilizando os mesmos parâmetros de propriedades e profundidade de indentação. As simulações foram feitas com o intuito de verificar como a presença da texturização, em três diferentes posições, afeta os campos de tensão e deformação do material. Em seguida, foram adicionados revestimentos nos modelos texturizados, e novas simulações foram desenvolvidas, para verificar a mudança de comportamento dos campos de tensão e deformação de um componente com uma superfície texturizada e revestida. E, por fim, foram desenvolvidos novos modelos para verificar a influência de diferentes novas posições de indentação nos sólidos texturizados e revestidos. Para todas as análises foram observadas as tensões equivalentes segundo Von Mises e deformações plásticas do substrato. Nos componentes revestidos foram observadas também as tensões máximas cisalhantes e tensões de tração máximas nas camadas de revestimentos.

As amostras utilizadas são de aço de baixo teor de carbono ABNT 1020 e apresentam diferentes configurações, com a superfície lisa, com a superfície texturizada, e por fim, com a superfície texturizada e revestida. A texturização é composta de dois diferentes padrões de bolsos circulares igualmente espaçados, com uma densidade de área texturizada entre 20-30%. A primeira é formada por bolsos de diâmetro de 100 μm e profundidade de 10 μm , e outra com bolsos de diâmetro de 200 μm e profundidade de 20 μm .

Foram gerados dois modelos com as duas diferentes configurações da textura, bem como utilizando diferentes posições de aplicação da carga, afim de identificar as situações e regiões mais críticas. Os resultados para as diferentes dimensões foram comparados entre si para avaliar a influência dos parâmetros geométricos nos campos de tensões e deformações das amostras, em comparação com uma superfície lisa. Esses modelos serviram para verificar o papel da texturização na distribuição de tensão/deformação.

Após verificar a influência da texturização superficial no comportamento das tensões e deformações da amostra, foram simulados modelos para avaliar a influência da textura na presença de um revestimento superficial. Nestes modelos, foi inserido em sua superfície um revestimento composto por uma camada de CrN (nitreto de cromo), recoberta por uma camada de Carbono tipo diamante (DLC - diamond-like carbon), com espessuras de 3,24 μm e 0,58 μm , respectivamente. Esses revestimentos com suas respectivas dimensões foram encontrados por Felice-Neto (2012) como valores ótimos para um substrato de aço de baixo teor de carbono, através de análises das intensidades e posições das tensões radiais e cisalhantes, que permitissem o retardamento de trincas, e, conseqüentemente, a falha do componente.

Os resultados mostram que a introdução da texturização superficial na amostra eleva os valores das tensões e deformações plásticas, resultantes da descontinuidade de material imposta na superfície. É observado esse comportamento nas amostras com e sem o revestimento, e nota-se que o revestimento continua desempenhando o papel de proteger o substrato, mesmo com a presença da texturização.

Esta dissertação foi estruturada em oito capítulos, distribuídos da seguinte maneira: o segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre as texturizações superficiais, destacando os resultados obtidos até o momento e suas aplicações e vantagens. Em seguida, a mesma revisão é realizada para o próximo assunto de interesse, que são os revestimentos tribológicos, seguida pelo capítulo quatro, que apresenta uma síntese do Método de Elementos Finitos, utilizado no trabalho. O quinto capítulo explica a metodologia adotada para desenvolvimento dos ensaios experimentais e numéricos realizados durante o desenvolvimento do estudo. O capítulo seis apresenta e discute os resultados obtidos, encerrando com o capítulo de conclusões e sugestões para trabalhos futuros. Por fim, as referências bibliográficas estão listadas no capítulo oito.

CAPÍTULO II

Texturização Superficial

A texturização superficial consiste na modificação da topografia superficial com a introdução intencional de padrões geométricos bem definidos na superfície dos componentes, podendo ser utilizada em escala macro ou micrométrica. Essa técnica consiste em adicionar ou remover material da superfície, e não deve ser confundida com a rugosidade superficial, que é a caracterizada, de acordo com Hutchings (1992), como as irregularidades de pequena escala em uma superfície, como pode ser observado na Fig. 2.1.

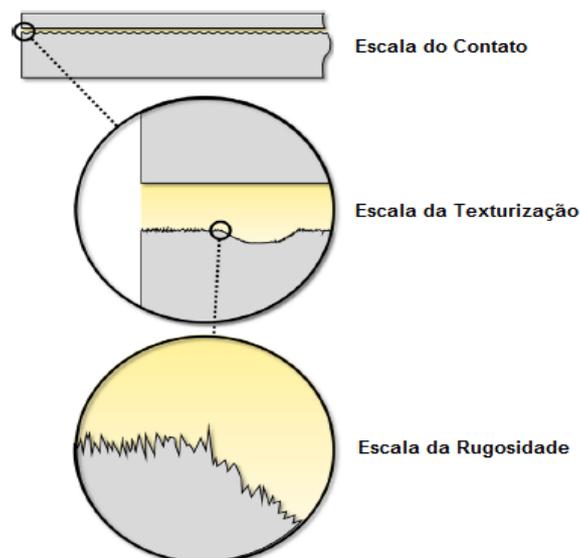


Figura 2.1 - Diferentes escalas de um contato texturizado (GROPPER; WANG; HARVEY, 2015)

As modificações superficiais apresentam a natureza como fonte de inspiração, como, por exemplo, algumas espécies de sapos que apresentam estruturas superficiais especiais em suas patas, que provocam o aumento da adesão às demais superfícies, permitindo-os escalar árvores. Outro exemplo é a superfície formada pelas escamas do tubarão, que reduzem o arrasto aerodinâmico e deixam seu movimento na água mais eficiente. (GROPPER; WANG; HARVEY, 2015).

As superfícies texturizadas são utilizadas para um melhor controle das características superficiais dos componentes, com o objetivo de obter o desempenho desejado. De acordo com Bruzzone e coautores (2008), o entendimento desse fenômeno superficial é de extrema importância no desenvolvimento dos campos avançados de eletrônica, tecnologia da informação, energia, biomedicina, etc.

O desafio na determinação de qual tipo de modificação superficial deve ser aplicado é conseguir conciliar o campo de aplicação, quais as propriedades funcionais são desejadas para o componente e qual a tecnologia necessária e disponível para que o projeto seja realizado (Fig. 2.2).

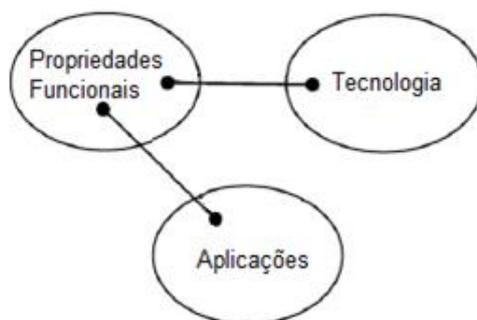


Figura 2.2 - Relação entre as propriedades funcionais, aplicações e a tecnologia requerida (adaptada de BRUZZONE et al., 2008)

2.1 Propriedades funcionais das superfícies

Devido ao grande número de fenômenos físicos, envolvendo troca de energia, que ocorre na superfície dos materiais, seu estudo e correta caracterização são fundamentais para entender em detalhes como a superfície influencia o desempenho funcional de um componente.

De acordo com Bruzzone e coautores (2008), as principais propriedades funcionais relacionadas às superfícies na engenharia podem ser classificadas em propriedades físicas, biológicas e tecnológicas. Dentre as propriedades físicas, as que envolvem energia superficial são de grande importância em diferentes aplicações, e considerando os fenômenos governados por ela, a molhabilidade é o que mais se destaca.

A utilização das texturizações superficiais nos componentes auxilia no controle da molhabilidade das superfícies, colaborando para a obtenção de superfícies mais hidrofílicas ou hidrofóbicas, de acordo com a aplicação. Esse mecanismo auxilia na produção de superfícies super hidrofóbicas, que simulam a propriedade de autolimpeza, características de algumas plantas, como a flor de lótus (Fig. 2.3) (BHUSHAN; JUNG, 2008).

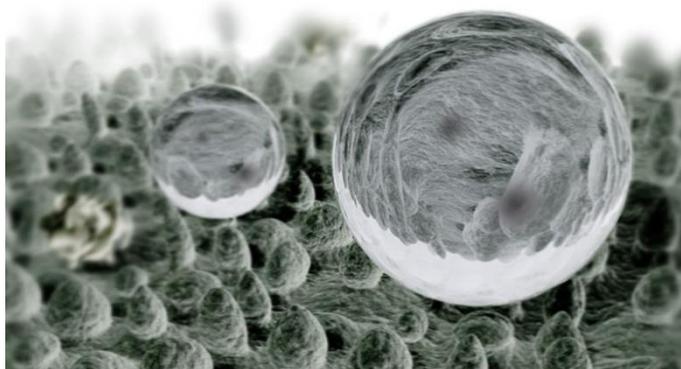


Figura 2.3 - Detalhe da superfície texturizada e super hidrofóbica da flor de lótus (William Thielicke, 2007)

Similar à molhabilidade, a adesão entre superfícies também é dependente das interações moleculares entre os corpos em contato e a energia superficial. Além dessas propriedades, ela também é controlada pela rugosidade da superfície e propriedades de travamento. Dessa maneira, a texturização superficial pode ser utilizada para aumentar a área de contato entre as superfícies, e, conseqüentemente, sua energia livre, e ainda auxiliar no intertravamento entre os materiais.

Essa propriedade se destaca na utilização de revestimentos, em que o tratamento das superfícies apresenta papel fundamental na adesão dos materiais, além da compatibilidade química entre eles. A texturização superficial favorece o intertravamento mecânico, aumentando a área de contato entre os dois materiais,

formando uma adesão mais forte, dificultando o deslocamento do revestimento (Fig. 2.4).



Figura 2.4 - Microscopia ótica da seção transversal de uma peça de alumínio texturizada e recoberta com revestimento (LAMRAOUI et al., 2010)

Dentre as propriedades biológicas, destaca-se a adsorção, que se caracteriza pelo processo de retenção de átomos e moléculas na superfície dos sólidos, através de interações químicas e físicas. No campo da biomedicina pode-se destacar o papel da texturização superficial na osseointegração. A textura auxilia o mecanismo de adsorção desse fenômeno biológico, caracterizado pela deposição óssea sobre as superfícies de titânio, em determinadas condições clínicas, que possibilita a ancoragem de implantes dentários e ortopédicos (BRÄNEMARK, 1985). O tratamento da superfície torna-se ainda mais importante considerando que as reações primárias na interface osso-implante ocorrem a nível atômico e são dependentes da composição química da superfície e da sua microestrutura (BARBOSA, 2016), apresentada na Fig. 2.5.

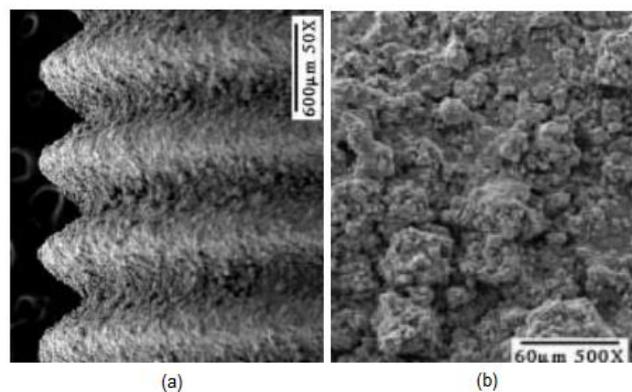


Figura 2.5 - Implante Odontológico de fixação ortopédico (a) rosca do parafuso, (b) morfologia da superfície (DA SILVA, 2006)

Em meio a diversas aplicações, há também a utilização da texturização superficial na área termodinâmica para melhorar a dissipação de calor em ferramentas de usinagem e componentes eletrônicos. Com a textura, a área superficial disponível para troca de calor é aumentada, propiciando uma troca mais eficiente, e, por consequência, diminui seu desgaste e aumenta sua vida útil.

Além das aplicações já descritas, a texturização superficial também é utilizada para realizar modificações nas superfícies de rolos de laminação para melhorar o acabamento das chapas produzidas, redução do atrito estático em discos rígidos de gravação magnética, orientação de grãos abrasivos em ferramentas de corte, melhoria da aparência estética dos produtos, controle das forças de arrasto em aplicações aerodinâmicas e controle de tensões superficiais (COSTA, 2005).

Neste trabalho, o foco das propriedades funcionais será dado às propriedades tecnológicas, especificamente as relacionadas aos aspectos tribológicos das superfícies.

2.1.1 Propriedades tribológicas

Hutchings (1992) define a tribologia como a ciência e tecnologia de superfícies interagindo em movimento relativo, e abrange os assuntos e práticas a ela relacionados, como o estudo do atrito, desgaste e lubrificação.

Atualmente, apesar do avanço da tecnologia, ainda há um grande gasto de energia para vencer o atrito, e na vasta maioria dos componentes mecânicos, o desgaste é o responsável por sua falha. Desta maneira, o estudo destes fenômenos é de extrema importância para reduzir os custos envolvidos com essas perdas. Mas, devido a sua localização na interface de contato entre as superfícies, eles são bastante complexos, irreversíveis em sua maioria, e se desenvolvem ao longo do tempo, tornando-os altamente sistêmicos (BRUZZONE et al., 2008).

De acordo com Jacobson e Hogmark (2008), a característica de quase todo contato seco ou com lubrificação limite é a mudança da composição e propriedades tribológicas da interface original no decorrer do desenvolvimento do contato. Essas modificações incluem mudanças de topografia, transformação de fases, formação de micro trincas, formação de óxidos, deformações plásticas, entre outros. Assim, os componentes mecânicos submetidos a estes regimes demandam um cuidadoso

estudo sobre essas superfícies modificadas e como elas influenciam no comportamento do tribosistema.

O atrito é definido como a resistência que um corpo oferece quando se encontra em movimento em relação a outro, e ocorre em virtude das interações entre as asperidades das superfícies em contato. Ele é dependente das propriedades dos materiais envolvidos no contato e do sistema tribológico no qual estão inseridos. Quando o atrito é elevado, ele pode levar ao desgaste dos componentes, que é a principal causa da perda de eficiência ou até mesmo sua falha.

A presença de um filme de lubrificante entre duas superfícies deslizantes reduz o atrito, e, conseqüentemente, o desgaste dos componentes em contato. Se as superfícies estão deslizando uma contra a outra com uma determinada velocidade, na presença de um lubrificante, pode ser formado espontaneamente nessa interface um filme de lubrificação hidrodinâmica.

Além da utilização de lubrificantes para reduzir as perdas com o atrito e o desgaste, estudos mostram (ETSION, 2005) que a introdução de texturizações superficiais nos componentes, pode diminuir o atrito e o desgaste das superfícies em contato, e pode melhorar a capacidade de lubrificação do tribosistema.

As geometrias constituintes dos padrões de texturização podem atuar aprisionando os debris de desgaste, principalmente em casos de deslizamento seco ou com lubrificação limite, retirando-os da interface de contato, e reduzindo o desgaste abrasivo ou adesivo (Fig. 2.6).

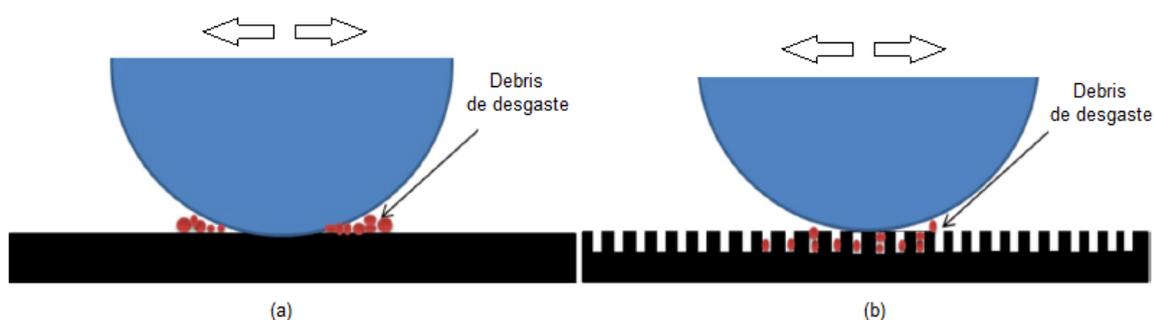


Figura 2.6 - Vista do corte transversal de uma esfera deslizando sobre um plano (a) superfície lisa, (b) superfície texturizada (AHMED et. al., 2015)

Essas descontinuidades da geometria também desempenham a função de reservatórios de lubrificante, capazes de alimentar o contato com lubrificante direto na

interface entre as superfícies, diminuindo o atrito (PETTERSSON; JACOBSON, 2004). Podem atuar também no aumento da pressão hidrodinâmica entre as superfícies e comportar-se como micro rolamentos hidrodinâmicos em casos de lubrificação mista ou hidrodinâmica (ETSION, 2005).

As aplicações tribológicas das superfícies funcionais apoiam-se na modificação controlada da topografia da superfície, com o intuito de melhorar a lubrificação e reduzir o atrito e o desgaste. Atualmente, vários autores (LAMRAOUI et al., 2010, PETERSON; JACKOBSON, 2004, HOLMBERG; MATTEWS, 2009) têm estudado esses comportamentos tribológicos das superfícies texturizadas, mas devido as diferentes variáveis presentes na texturização, ele ainda não é muito bem compreendido (BRUZZONE; COSTA, 2013, GACHOT et al., 2017).

Em sua maioria, os trabalhos encontrados sobre texturização superficial são experimentais, em vista da complexidade de análise do fenômeno, que apenas em casos específicos pode ser descrito analiticamente. Mas, apesar disso, foram obtidos resultados notáveis em termos de redução de atrito e desgaste utilizando diferentes padrões de textura (ETSION, 2005).

2.2 Técnicas de Texturização

Para a produção de superfícies texturizadas, diversas técnicas são utilizadas e estão sendo desenvolvidas para otimizar a produção em escala. Basicamente, as técnicas de texturização se baseiam em quatro diferentes princípios: remoção de material, adição de material, deslocamento de material e o chamado *self-forming* (BRUZZONE et al., 2008).

A remoção de material é o método mais utilizado, e o que apresenta mais avanços em termos de técnicas e tecnologias de aplicação. Ele baseia-se na criação de padrões de textura através da remoção de material da superfície, criando pequenas depressões. Já a adição de material é normalmente relacionada à deposição de revestimentos texturizados. O deslocamento de material é caracterizado quando a textura é produzida por deformações plásticas no material, redistribuindo o material de sua superfície. E o *self-forming* é classificado quando o padrão de texturização é formado pelo próprio desgaste da superfície, que forma áreas mais resistentes ao desgaste na interface de contato entre os corpos.

Das diversas técnicas que podem ser utilizadas para a produção de superfícies texturizadas, a *Texturização Superficial a Laser* é um dos principais métodos utilizados, pois possui um curto tempo de processamento, não agride o meio ambiente, e propicia um excelente controle da forma e tamanho da geometria da textura (COSTA; HUTCHINGS, 2014). E com o correto controle da densidade de energia do laser, é possível texturizar até materiais mais duros, como cerâmicas e aços endurecidos (ETSION, 2005).

Diversas técnicas são eficientes para a obtenção de padrões de texturização superficial, tais como a texturização química por litografia ou a texturização fotoquímica (GACHOT et al., 2017). Mas normalmente elas são inviáveis para a reprodução industrial em alta escala, por apresentarem um alto custo e baixa produtividade.

Novas técnicas para fabricação de texturizações superficiais vem sendo estudadas nos últimos anos para otimização dos tempos de produção e minimização dos custos. A técnica de texturização eletroquímica sem mascaramento tem se apresentado como uma alternativa barata e eficiente, em relação a texturização a laser. E apesar de ainda não ser implementada industrialmente, apresenta alto potencial para melhorar as práticas atuais. (COSTA; HUTCHINGS, 2009, PARREIRA et al., 2012, COSTA; HUTCHINGS, 2014).

2.3 Parâmetros de texturização

Diferentes tipos de texturas são produzidos para suas diferentes aplicações, e os parâmetros da geometria do padrão utilizado, suas dimensões e sua distribuição ao longo da superfície produzem diferentes comportamentos tribológicos em relação ao atrito e desgaste. Estas modificações podem melhorar ou piorar seu comportamento de acordo com a configuração escolhida, e são dependentes do regime ao qual serão submetidos e do comportamento esperado (Fig. 2.7).

Outro fator que deve ser considerado na escolha do padrão de texturização é a direção de deslizamento do contato. Para padrões de textura não uniformes, como sulcos paralelos, de acordo com diferentes orientações de deslizamento, a textura desempenhará papéis distintos, influenciando no comportamento tribológico da superfície de maneira benéfica ou prejudicial.



Figura 2.7 - Diferentes geometrias de texturização (BRUZZONE; COSTA, 2013)

De acordo com experimentos realizados por Costa e Hutchings (2008), para sulcos orientados perpendicularmente à direção de deslizamento durante ensaios de estiramento a frio utilizando ferramentas texturizadas, a força de atrito foi reduzida consideravelmente, em relação à superfície lisa. Essa melhora no comportamento da superfície deve-se ao comportamento da textura como reservatório de lubrificante. E quando os sulcos estavam orientados paralelamente à direção de deslizamento do contato, a força de atrito aumentou significativamente. Essa mudança de comportamento prejudicial ao contato provavelmente ocorreu pois os sulcos permitiram que o lubrificante escapasse do contato.

Vladescu e coautores (2014) realizaram testes de contato deslizantes, simulando o contato linear pistão-anel, para medir o atrito em diferentes amostras com diferentes parâmetros de geometria, mas com profundidades dos sulcos constantes. Foram consideradas diferentes direções de deslizamento, através da utilização de sulcos angulares, paralelos, cruzados e transversais, e foi possível verificar como cada textura se comportou no teste com as mesmas condições de operação. E, finalmente, esses resultados foram comparados com os obtidos para uma superfície lisa sujeita às mesmas condições de operação, e são apresentados nas Fig. 2.8.

Os resultados obtidos para as diferentes orientações de deslizamento foram semelhantes aos apresentados por Costa e Hutchings (2008). A superfície com os sulcos paralelos apresentou um atrito superior ao da superfície lisa, e a configuração que apresentou melhores resultados foi a com sulcos transversais, como esperado.

Apesar da texturização superficial estar sendo extensivamente investigada nos últimos anos, e dos resultados positivos obtidos na redução de atrito e desgaste, os exatos parâmetros geométricos e as condições de operação que melhoram a capacidade de suportar cargas e aumento da espessura do filme de lubrificante ainda não foram demonstrados (VLADESCU et al., 2014). De acordo com Etsion (2005),

geralmente, a otimização das dimensões da geometria do padrão de texturização é feita através do processo de tentativa e erro, devido as diferentes particularidades de cada condição de operação.

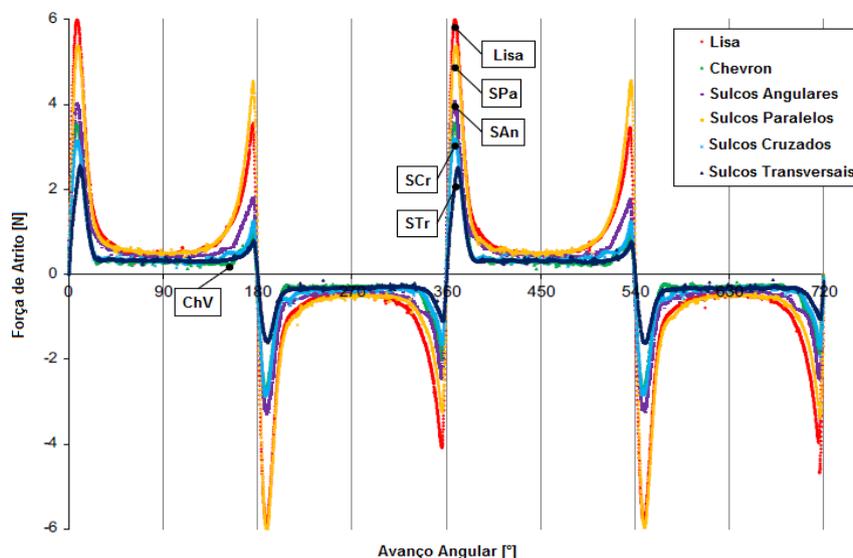


Figura 2.8 - Comparação entre as forças de atrito de amostras texturizadas com uma amostra lisa em condições de lubrificação mista (VLADESCU et al., 2014)

Resultados sugerem que existe uma densidade de texturização mínima da superfície para que ela influencie o contato positivamente, pois se os bolsos ou sulcos forem muito pequenos, eles não conseguirão atuar como reservatório de lubrificante, nem aprisionar os debrís de desgaste, influenciando o contato negativamente, pois apenas ocasionarão a diminuição da área de contato, provocando o aumento das pressões de contato (COSTA; HUTCHINGS, 2008). Por outro lado, se forem grandes quando comparados à largura de contato, não conseguirão atuar como micromancais e poderão colaborar com a retirada de lubrificante do contato.

De acordo com Bruzzone e coautores (2008), dentre os diferentes padrões de texturização, a micro topografia que apresentou melhores resultados do ponto de vista tribológico, foi a composta por pequenos bolsos circulares uniformemente distribuídos ao longo da superfície, como mostrada na Fig. 2.9. Além de atuar no aprisionamento de debrís e como reservatório de lubrificante, a pressão hidrodinâmica gerada nos diversos bolsos assemelha-se ao comportamento de micro rolamentos.

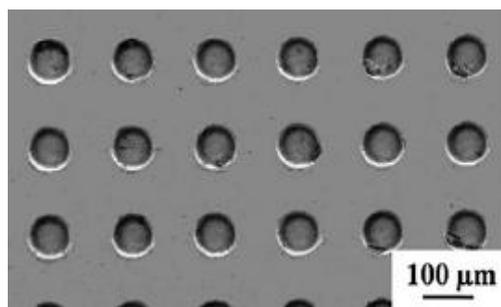


Figura 2.9 - Superfície texturizada com bolsos circulares produzida por Texturização a Laser (PFLEGING, 2015)

Ding e coautores (2010) obtiveram ótimos resultados em termos de coeficiente de atrito quando a densidade de área texturizada se encontrava entre 15 e 25%. Braun e coautores (2014) obtiveram reduções de mais de 80% nas forças de atrito em experimentos realizados utilizando superfícies texturizadas com bolsos circulares sob regime de lubrificação mista, mas enfatizam a ideia de que não existem parâmetros geométricos ótimos de textura, sendo estes fortemente dependentes da aplicação do componente, bem como do regime de trabalho ao qual será submetido.

Os padrões de textura com geometria circular são os mais comuns pois, além dos bons resultados apresentados em termos de redução de atrito e desgaste, sua fabricação é relativamente simples, com um baixo custo (IBATAN et al., 2015). Eles também apresentam a vantagem de formarem um padrão de geometria uniforme, não sendo necessário se preocupar com a direção de deslizamento.

Devido ao bom comportamento apresentado pela texturização com bolsos circulares e sua facilidade de fabricação, os modelos geométricos desenvolvidos neste trabalho utilizam esta configuração, com densidade de texturização de aproximadamente 25%. Foram utilizados bolsos com dois diferentes parâmetros geométricos, o primeiro apresenta bolsos circulares com 100 μm de diâmetro, e 10 μm de profundidade, e o outro, com bolsos de diâmetro de 200 μm e 20 μm de profundidade. A geometria do bolso circular utilizada foi definida com o formato cilíndrico, visto que a representação real do bolso, devido às limitações de processo, é uma forma intermediária entre uma calota esférica e um bolso cilíndrico, como pode ser visto na Fig. 2.10.

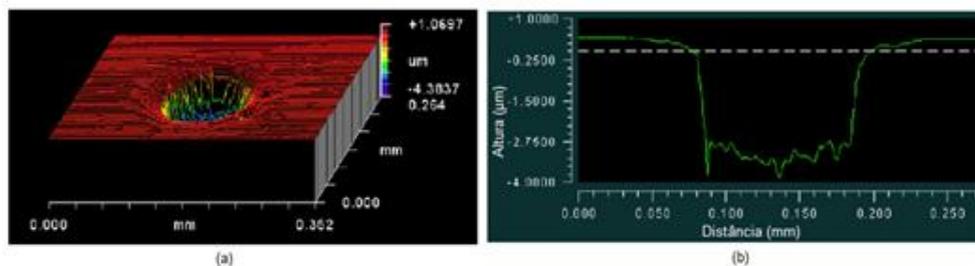


Figura 2.10 - Topografia da superfície texturizada com bolso circular (a) vista em perspectiva e (b) perfil linear (COSTA; HUTCHINGS, 2008)

Dessa maneira foram analisadas situações que já estão sendo estudadas, e que apresentaram bom desempenho do ponto de vista tribológico. Com essas análises, foi possível verificar a influência dos dois padrões de texturização nos campos de tensões e deformações gerados pela indentação de uma esfera. Esses resultados foram contrastados com os resultados apresentados por uma superfície lisa submetida ao mesmo carregamento.

CAPÍTULO III

Revestimentos Tribológicos

Os revestimentos tribológicos são caracterizados por camadas de materiais depositados sobre a superfície dos componentes, com propriedades mecânicas particulares e espessuras suficientemente finas para que elas não atuem independente do substrato no contato tribológico. O revestimento e o substrato devem funcionar como um sistema, combinando as propriedades de cada material.

Devido às altas exigências de mercado para componentes mais eficientes e com uma vida útil bastante extensa, os revestimentos estão sendo cada vez mais utilizados nos produtos para melhorar seu comportamento tribológico (HOLMBERG et al, 2005). Esses revestimentos são frequentemente utilizados em ferramentas de corte, instrumentos de precisão, componentes eletrônicos, automobilísticos e biomédicos, entre diversas outras aplicações.

Os revestimentos são usualmente utilizados para proteger os componentes sujeitos a tensões de contato, melhorando seu desempenho tribológico, reduzindo o atrito e o desgaste, e otimizando a funcionalidade das superfícies em interação. Segundo Holmberg e coautores (2005), em alguns casos, as camadas de revestimentos conseguem diminuir o coeficiente de atrito e desgaste em até duas ordens de magnitude.

3.1 Materiais Multicamadas

Para obtenção de uma combinação de diferentes propriedades desejáveis ao componente, como alta resistência ao desgaste, elevada dureza e baixo atrito, é possível utilizar camadas de revestimentos multifuncionais sobrepostas (HOLMBERG et al., 2005). Essas estruturas multicamadas geralmente apresentam distribuições de tensão menos severas que materiais com apenas uma camada de revestimentos, para mesma dureza e a mesma razão de dureza entre o revestimento e o substrato (DJABELLA; ARNELL, 1993, FELICE-NETO, 2012).

Para garantir a boa funcionalidade das multicamadas, é necessário entender as interações entre as propriedades dos materiais em contato. Dessa maneira, pode-se garantir que haja a combinação das propriedades de cada material e que as camadas apresentem uma melhor adesão entre si. Quando o substrato possui dureza bastante inferior ao revestimento, camadas com propriedades intermediárias devem ser introduzidas para melhor adesão do revestimento e suavização da transição de propriedades, para que não haja formação de trincas devido a grandes deformações, como apresentado na Fig. 3.1 (LARA; DE MELLO, 2012).

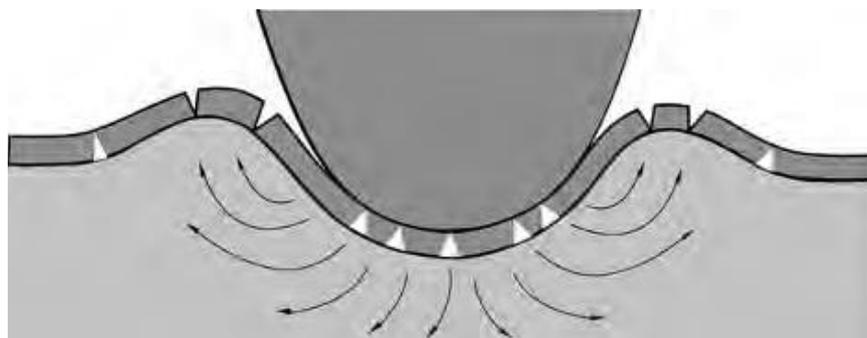


Figura 3.1 - Fratura de um revestimento duro em um substrato macio ocorre na área de contato e suas extremidades (HOLMBERG; MATTHEWS, 2009)

A adesividade entre os revestimentos e entre o revestimento e o substrato é dependente da afinidade química entre os materiais, a forma com que foram depositados, e a geometria da superfície na qual foram depositados. Essa propriedade é de bastante importância, pois ela não depende apenas de fatores químicos. Regiões de interface podem sofrer maiores tensões e falhar primeiro, independente das forças de ligação. A delaminação do revestimento é bastante crítica do ponto de vista tribológico, porque, além de retirar a proteção do componente, partículas do

revestimento podem penetrar no contato, atuando como abrasivos e tornando o desgaste mais severo (HOLMBERG; MATTHEWS, 2009).

3.2 Métodos de Deposição

Os métodos existentes de deposição de revestimentos são diversos, e variam de acordo com as características do material do substrato e do revestimento, bem como as propriedades desejadas, tais como espessura, rugosidade e uniformidade do filme. As principais formas de deposição são através dos processos em soluções, em estado fundido ou semifundido, e no estado gasoso. Nas últimas décadas, as técnicas de deposição se desenvolveram significativamente, e oferecem uma variedade de possibilidades de produção de revestimentos com diferentes estruturas e materiais (HOLMBERG; MATTHEWS, 2009).

Devido à possibilidade de obtenção de revestimentos finos com espessuras mínimas de 0,01 μm , os processos de deposição no estado gasoso são amplamente utilizados para a criação de filmes finos e duros de materiais metálicos e cerâmicos. Dentre esses principais métodos de deposição, destacam-se os processos de Deposição Química de Vapor (CVD) e Deposição Física de Vapor (PVD).

3.2.1 Deposição Química de Vapor (CVD)

O processo de CVD é uma técnica de deposição na qual o material a ser depositado reage na fase de vapor sobre a superfície do substrato para formar um filme sólido estável. O método envolve a dissociação dos materiais reagentes, que são introduzidos juntamente com um gás de arraste em uma câmara de reação, conforme representação esquemática da Fig. 3.2. Os gases difundem até a superfície do substrato. O material depositado reage com a superfície formando um filme uniforme e com boa adesão, e os subprodutos são reabsorvidos e removidos da câmara.

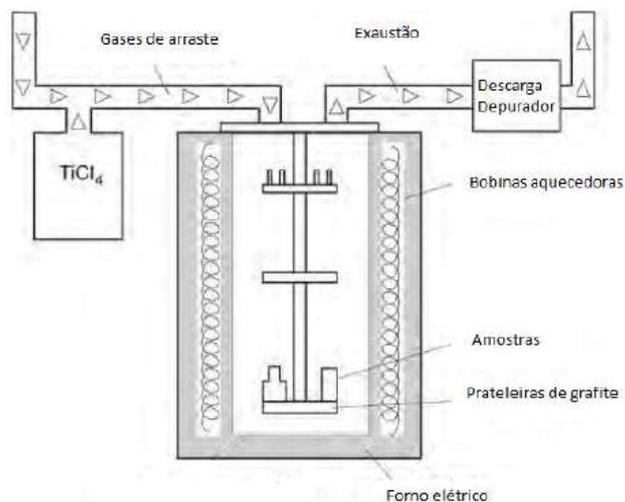


Figura 3.2 - Representação de um processo CVD (HOLMBERG; MATTHEWS, 2009)

A Deposição Química de Vapor apresenta como principais características a boa qualidade e taxa de deposição, a produção de filmes com boa reprodutibilidade e adesão ao substrato e a capacidade de revestir superfícies em três dimensões com qualidade. O processo utiliza baixos níveis de pressão, mas necessita de altas temperaturas para garantir a eficiência do processo, o que pode gerar tensões e trincas térmicas no substrato.

3.2.2 Deposição Física de Vapor (PVD)

O processo de PVD consiste em um método de deposição física no qual o material a ser depositado é vaporizado ou atomizado por vaporização térmica ou impacto de íons (*sputtering*) e transportado em forma de vapor sob baixa pressão ou a vácuo até o substrato, onde se condensa na forma de um filme fino de elevada resistência mecânica e química. Existem várias técnicas para atomização de materiais no processo PVD, como mostrado na Fig. 3.3

Dentre as vantagens do processo há a possibilidade de utilizar uma vasta gama de materiais, que podem ser depositados sem a utilização de gases poluentes e não há a necessidade de elevadas temperaturas. Contudo, o filme de revestimento criado não é tão uniforme quanto o produzido pelo processo CVD devido ao choque desordenado das partículas contra a superfície do substrato.

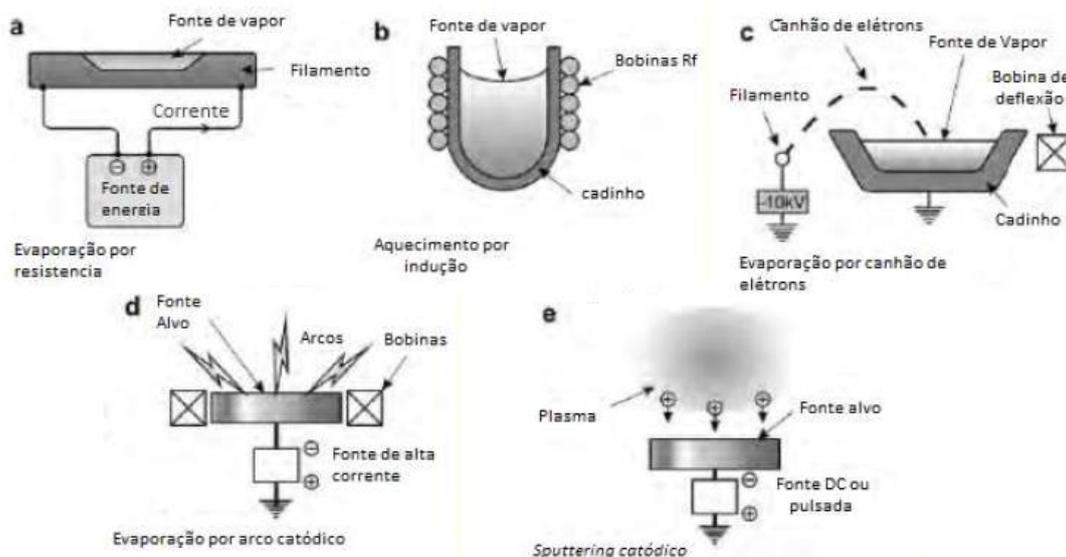


Figura 3.3- Técnicas utilizadas para atomização de materiais no processo PVD (HOLMBERG; MATTHEWS, 2009)

3.2.3 Comparação entre os processos CVD e PVD

Ao comparar os processos de CVD e PVD, verifica-se que o primeiro, por sua natureza química, apresenta uma maior adesividade que o PVD, apesar de possuir também uma rugosidade maior. O processo PVD, apesar de formar um revestimento fino de alta resistência mecânica, para apresentar boa uniformidade, é necessário que a peça seja movimentada ao longo do processo.

No processo CVD, por necessitar de altas temperaturas de processamento, são geradas tensões térmicas no material, que podem evoluir para trincas térmicas. Dessa maneira, o processo insere no material tensões residuais de tração, enquanto o processo PVD gera tensões residuais de compressão.

Apesar das semelhanças entre os processos, eles não competem entre si, e, em alguns projetos, eles são empregados de forma integrada, a fim de potencializar as vantagens de cada método. Usualmente, o processo de CVD é o mais utilizado, devido a sua alta taxa de deposição, e a possibilidade da deposição simultânea de mais um elemento, de maneira controlada.

3.3 Carbono Tipo Diamante (DLC)

Segundo Holmberg e Matthews (2009), revestimentos finos e duros aplicados sobre um substrato resistente e mais macio têm provado ser uma combinação de materiais bastante benéfica, do ponto de vista tribológico. Diversos novos materiais para revestimentos vêm sendo investigados e desenvolvidos nos últimos anos, e os filmes duros são especialmente vantajosos em aplicações que envolvem desgaste abrasivo e erosivo.

Filmes duros, como os compostos de carbono tipo diamante (*diamond-like carbon* - DLC), têm sido bastante estudados por apresentar propriedades próximas às do diamante, e podem ser obtidos com processos tecnológicos mais simples. O DLC apresenta elevada dureza, é inerte quimicamente, possui baixo atrito, baixo coeficiente de expansão térmica, alta condutividade térmica e boa resistência ao desgaste (DING et. al., 2010).

Devido a limitações de processos e à característica frágil do DLC, as espessuras das camadas variam entre 0,01 e 2 μm (HOLMBERG; MATTHEWS, 2009), e normalmente são utilizadas camadas intermediárias, que apresentem elevada tenacidade, para transição de propriedades, redução da concentração de tensão e dissipação de energia (DING et. al., 2010).

Felice-Neto (2012) investigou valores ótimos de espessuras de revestimentos para camadas de nitreto de cromo e carbono tipo diamante (DLC), em um substrato de aço de baixo teor de carbono. Foram realizadas simulações numéricas, e analisadas as intensidades e posições das tensões radiais e cisalhantes, de maneira que as máximas tensões cisalhante ocorressem distantes da interface entre as camadas e as tensões radiais de tração fossem minimizadas na camada de DLC. Dessa maneira foram encontrados os valores de espessura de 3,24 μm para o nitreto de cromo, e 0,58 μm para o DLC. De acordo com este autor, essa configuração produz um componente com menor probabilidade de geração de trincas e deslocamento, e conseqüentemente, maior vida útil.

Para o trabalho proposto foi escolhida a mesma configuração usada por Felice-Neto (2012): o DLC como o material da camada de revestimento superior do substrato de aço ANBT 1020, sobreposto a uma camada intermediária de nitreto de cromo. Foram utilizados os parâmetros dos materiais e espessuras das camadas de acordo com os valores ótimos encontrados no trabalho citado anteriormente.

3.4 Revestimentos em Superfícies Texturizadas

Devido aos bons resultados obtidos com a utilização de superfícies texturizadas e revestimentos, do ponto de vista tribológico, há um grande interesse em combinar as excelentes propriedades dos revestimentos com os benefícios trazidos pela texturização superficial.

Petterson e Jacobson (2004) apresentam ótimos resultados com a introdução de filmes finos de DLC em uma superfície texturizada. Resultados mostram que a combinação de revestimentos duros com a texturização superficial além de diminuir o coeficiente de atrito e de desgaste, também aumenta significativamente a vida útil do revestimento, atuando no seu comportamento de delaminação (DING et al., 2010). A Figura 3.4 apresenta em detalhe, um substrato de aço texturizado com bolsos circulares de perfil cilíndrico, revestidos com uma camada intermediária de nitreto de cromo (CrN) sobreposta por uma camada de DLC.

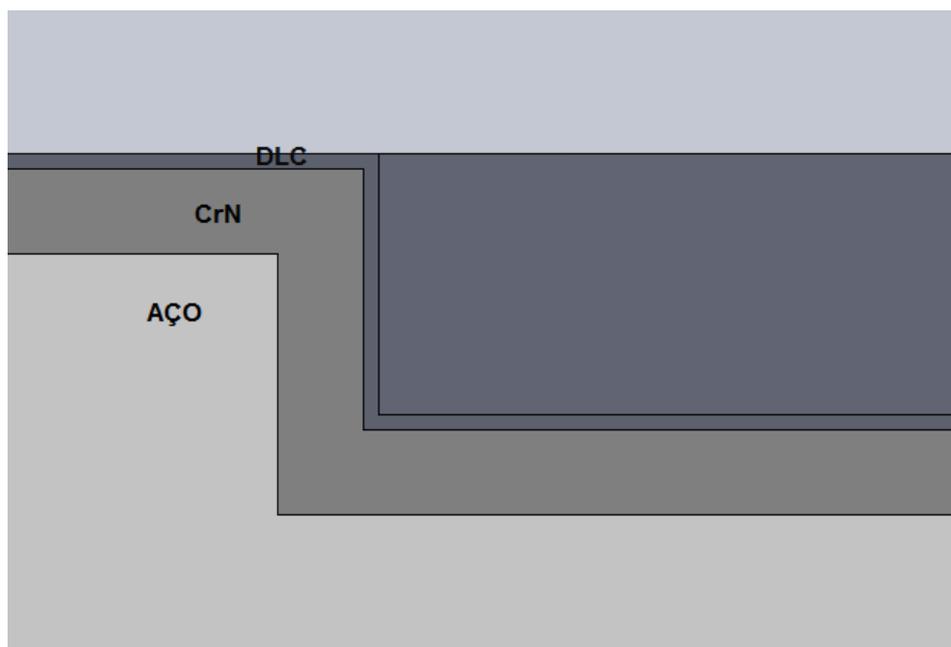


Figura 3.4 - Modelo de uma superfície texturizada e revestida

Um fenômeno interessante foi observado por Ding e coautores (2010) com a realização de testes de desgaste em uma superfície texturizada e revestida com DLC. A delaminação do revestimento ocorreu entre os bolsos do revestimento, e não em toda superfície de contato, como geralmente ocorre em superfícies lisas. Este fato pode ser justificado pela descontinuidade da geometria do revestimento, e da possível

melhora de adesão do revestimento devido à elevada rugosidade presentes nos bolsos de texturização, características do processo de fabricação.

Na maioria dos casos da utilização de revestimentos em superfícies previamente texturizadas são obtidas melhoras nos comportamentos de atrito e desgaste dos componentes, mas ainda é pouco conhecido como a geometria da superfície influencia no comportamento de tensão e deformação das superfícies (IBATAN et al., 2015). Dessa maneira, análises teóricas e práticas são fundamentais para o melhor entendimento do comportamento da combinação da texturização e os revestimentos, e sua aplicação mais eficiente.

Gong e Komvopoulos (2003) realizaram análises em elementos finitos de superfícies texturizadas e revestidas em um contato normal e deslizante contra uma esfera. Foram realizadas análises para verificar o efeito da texturização nas distribuições das pressões de contato, bem como nos campos de tensão e deformação, para superfícies texturizadas com geometria formada por sulcos paralelos e uma forma sinusoidal.

Neste trabalho será realizado um estudo comparativo do comportamento dos campos de tensão e deformação de uma amostra texturizada com e sem a presença de revestimento, através de simulações numéricas de uma indentação de uma esfera rígida contra as superfícies das amostras.

CAPÍTULO IV

Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos (MEF) é uma técnica de análise numérica para resolução de problemas através de resultados aproximados a partir da solução de equações diferenciais. Para problemas em que as soluções analíticas são de alta complexidade, ou inviáveis, as soluções numéricas são excelentes ferramentas de cálculo, amplamente utilizadas na engenharia, nas áreas de transferência de calor, mecânica dos fluidos e mecânica estrutural.

O MEF consiste basicamente na discretização de um meio contínuo em um conjunto finito de regiões interconectadas, denominadas elementos. Cada elemento é composto por um determinado número de pontos, denominados nós, e o conjunto desses elementos define a malha, conforme Fig. 4.1.

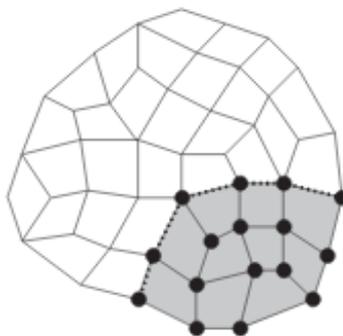


Figura 4.1 - Representação de uma geometria discretizada em nós, ligados entre si, formando elementos, que por sua vez se unem formando a malha (FRIES; BELYTSCHKO, 2010)

Uma vez definidos os elementos e seus respectivos nós, no interior de cada elemento são admitidas soluções aproximadas para as variáveis de campo, expressas como funções arbitrárias, que determinam as soluções aproximadas das variáveis, e garantem a continuidade da solução dos nós compartilhados pelos elementos, e a qualidade da resposta está relacionada, entre outras coisas, ao número de elementos e equações de interpolação utilizadas.

Dentre as vantagens oferecidas pelo método, destacam-se o controle sobre os parâmetros de entrada, que podem ser variados facilmente, diferentemente dos ensaios experimentais, e a possibilidade de modelar problemas que envolvem geometrias complexas. É possível, através de simulações prévias, verificar parâmetros e condições mais críticas do projeto, e realizar modificações antes da etapa de fabricação, possibilitando uma análise mais completa e evitando possíveis retrabalhos. E como limitações do método há a dificuldade de obtenção de todos os parâmetros de entrada do problema, e as imperfeições e não linearidades das propriedades dos materiais não são consideradas.

Para a solução de problemas numéricos utilizando o Método de Elementos Finitos há duas diferentes abordagens: o método explícito e o método implícito. No primeiro, os cálculos são realizados por integrações numéricas, enquanto no segundo são efetuados cálculos matriciais, tornando o método mais penoso em termos de esforços computacionais, devido ao uso de inversão da matriz de rigidez a cada passo de tempo.

4.1 Solução Explícita

O método de solução explícita utiliza integrações numéricas para realização dos cálculos, em intervalos de tempos pré-estabelecidos, que são frações de um tempo crítico, definido em função da dimensão do menor elemento utilizado e de propriedades elásticas do material utilizado. Esse intervalo de tempo é fundamental para a estabilidade numérica do problema, que requer passos de tempo suficientemente pequenos (FRIES; BELYTSCHKO, 2010).

De acordo com Fries e Belytschko (2010), o método explícito utiliza como base de sua formulação a equação de equilíbrio dinâmico, ao passo que o método implícito assume uma condição de equilíbrio estático. Dessa maneira, os modelos envolvendo problemas dinâmicos devem ser resolvidos através de soluções explícitas.

4.2 Solução Implícita

No método implícito, as forças de inércia dos corpos não são consideradas na aplicação das condições de contorno do modelo, ou seja, a aplicação das cargas é realizada em passos suficientemente lentos, para anular o impacto, sendo indicado para problemas de condição estática e quase estática (ZIENKIEWICZ, 1991).

Para este método, as velocidades e acelerações no tempo podem ser descritas em função apenas dos deslocamentos. Dessa maneira, as variáveis nodais dos deslocamentos no tempo presente são encontradas através da condição de equilíbrio no tempo passado, através da convergência para a condição de equilíbrio, de mínima energia.

Nesse método, o cálculo dos deslocamentos de cada nó da malha é realizado através da inversão da matriz de rigidez do modelo, multiplicada pelas forças atuantes, no sistema. E nos demais pontos dos elementos, os deslocamentos são obtidos através de interpolação dos deslocamentos nodais.

No presente trabalho, as simulações foram realizadas utilizando o *software* ABAQUS®, com método de solução implícita, devido à natureza quase estática de uma simulação de indentação. Dessa maneira, é utilizado um intervalo de tempo padrão do programa para análises estáticas, e o número de incrementos utilizados, bem como o intervalo de tempo de cada um é calculado automaticamente pelo programa. Por se tratar de simulações que envolvem o contato de uma esfera rígida contra amostras compostas de um substrato que apresenta comportamento elasto-plástico, e há a presença de atritos e grandes deslocamentos, a análise do problema é realizada através da utilização de equações não lineares.

4.3 ABAQUS®

O ABAQUS® é um *software* comercial que utiliza o método de elementos finitos para realização de simulações numéricas. Ele apresenta uma interface CAD, para o pré-processamento, e pode ser utilizado na resolução de problemas utilizando o método explícito ou implícito, de acordo com as características do problema. Nele podem ser construídas as geometrias do modelo, ou utilizar desenhos importados de outros programas.

São definidos como parâmetros de entrada as propriedades dos materiais, as condições de interação entre os corpos, as condições de contorno do problema e as etapas do processo de solução. Para caracterização dos materiais, são necessárias como dados de entrada, as propriedades que caracterizam o material, como densidade e módulo de elasticidade, bem como as propriedades referentes a sua natureza. Por exemplo, neste trabalho o material utilizado para o substrato é um aço de baixo teor de carbono, que apresenta um comportamento elasto-plástico. Dessa maneira, é necessária a inserção dos pontos da fase plástica da curva de tensão *versus* deformação correspondente a este material, para utilização nas leis constitutivas utilizadas na resolução do problema.

Para definição das características de interação entre os corpos, é necessário avaliar qual o tipo da interação que ocorre, que no caso da indentação, é o contato entre superfícies. Dessa maneira, devem ser definidas as características do contato, como a presença ou não de atrito, e a definição de qual é a superfície mestre e qual é a superfície escrava. Esta característica das superfícies define qual delas será responsável pela penetração na outra. A superfície mestra penetra a superfície escrava, ou seja, o indentador penetra a amostra. Para a formulação do contato, o ABAQUS® utiliza a formulação de Lagrange (ABAQUS v.6.12).

As condições de contorno definem quais os graus de liberdade dos corpos e quais serão os tipos de operações a serem realizadas. No caso da indentação, há apenas o deslocamento do indentador ao longo do eixo vertical. A simulação é dividida em uma etapa de carregamento, em que há o deslocamento da esfera contra a amostra, e outra de descarregamento, em que a esfera retorna à sua posição inicial.

Finalmente, a última etapa do pré-processamento é a criação da malha para o modelo. Os elementos que formarão a malha são escolhidos de acordo com a complexidade da geometria utilizada, e a partir da determinação das regiões de maior interesse para as análises determinam-se os graus de refinamento da malha.

Após a definição de todos os parâmetros do problema, inicia-se o processamento da simulação (solução do problema), para em seguida passar à fase de pós-processamento e análise dos resultados.

CAPÍTULO V

Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido de acordo com a metodologia apresentada neste capítulo. Para analisar as distribuições de tensões e deformações em componentes texturizados, com e sem a presença de revestimentos, foram desenvolvidos modelos em elementos finitos utilizando o *software* ABAQUS®. O trabalho foi estruturado em 3 grandes etapas: a obtenção das propriedades do material do substrato e validação do modelo numérico; a análise do comportamento dos componentes texturizados (sem revestimento) e, finalmente, o comportamento de componentes texturizados e revestidos.

5.1 Validação do Modelo

Para garantir que os modelos utilizados nas simulações em Elementos Finitos sejam representativos, primeiramente, é necessário validá-los com um experimento real, afim de verificar se os dados de propriedades e geometria utilizados são correspondentes aos reais. Neste trabalho, para a validação do modelo foram utilizados os resultados obtidos em um ensaio de Indentação Instrumentada.

Devido à necessidade do conhecimento prévio das propriedades mecânicas do material para realização do experimento, foi realizado um ensaio de tração para levantamento destas propriedades do aço utilizado como substrato da amostra. A partir do ensaio de tração obtém-se a curva de Tensão *versus* Deformação e as

propriedades do material que são necessárias para a realização do ensaio de Indentação e das simulações em Elementos Finitos.

5.1.1 Ensaio de Tração

Para o levantamento das propriedades do material a ser estudado, foram fabricados corpos de prova de acordo com as recomendações da NBR 6151, que regulamenta os parâmetros geométricos que devem ser respeitados para produção de corpos de prova para ensaios de tração com materiais metálicos. A norma também regulamenta, além dos parâmetros geométricos, os de aplicação de carga que devem ser utilizados no ensaio.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Mecânica de Estruturas da Universidade Federal de Uberlândia, no equipamento MTS-793. Foi aplicada a carga de tração na amostra, e sua deformação foi medida através de um extensômetro acoplado ao corpo de prova. O programa da máquina faz as leituras de carga e deformação, e gera como resposta um gráfico de Tensão *versus* Deformação, conforme Fig. 5.1, bem como outras propriedades mecânicas, tais como o Módulo de Elasticidade do material. Foram ensaiados três diferentes corpos de prova para garantir a confiabilidade do resultado.

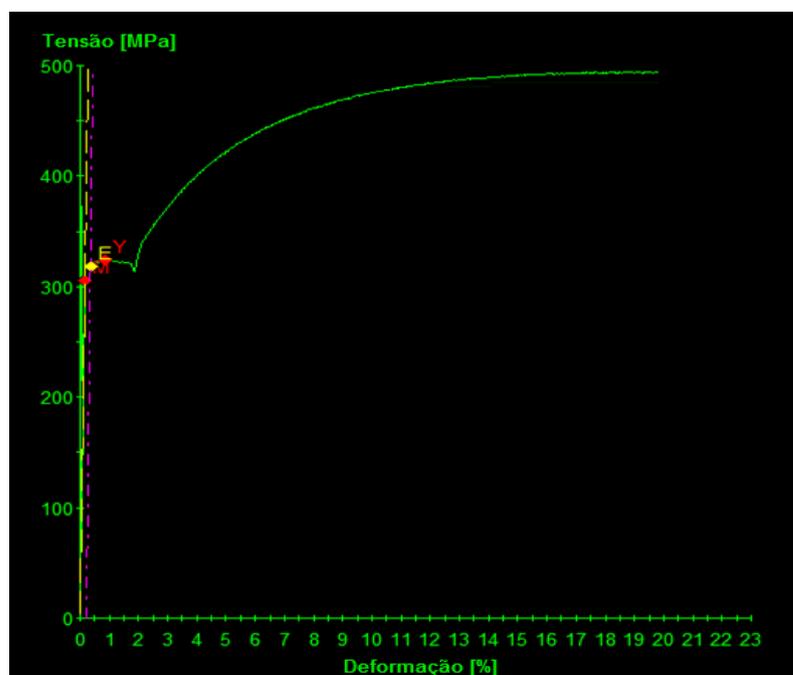


Figura 5.1 - Curva de Tensão *versus* Deformação, gerada durante o ensaio de tração

5.1.2 Indentação Instrumentada

Para a validação e calibração do modelo, foi realizado um ensaio de indentação instrumentada em uma amostra lisa e sem revestimento. Esse ensaio consiste na aplicação lenta de uma força em uma amostra por meio de um indentador de raio de ponta definido, medindo-se a força imposta na amostra e a profundidade da impressão deixada em sua superfície. A técnica permite realizar a penetração com medida simultânea e contínua dos valores de força aplicados e o deslocamento do punção por meio de sensores (AZEVEDO et al., 2009).

De acordo com a norma ISO 14577-1 (2002), que especifica os parâmetros para realização dos ensaios de indentação instrumentada, os ensaios são classificados em diferentes intervalos de força aplicada e profundidade de indentação. Para o caso ensaiado, foi realizado um ensaio de Macroindentação, que é classificado quando o ensaio é realizado utilizando cargas dentro do intervalo de 2N e 30 kN.

A resposta do ensaio é uma curva gerada de Carga *versus* Profundidade de indentação, como mostrado na Fig. 5.2. Nesse tipo de ensaio, a força pode ser aplicada através de múltiplos ciclos de carregamento e descarregamento parcial de um indentador esférico de raio de ponta definido. O equipamento funciona com controle de carga e realiza a medição da profundidade de penetração na amostra correspondente à força aplicada.

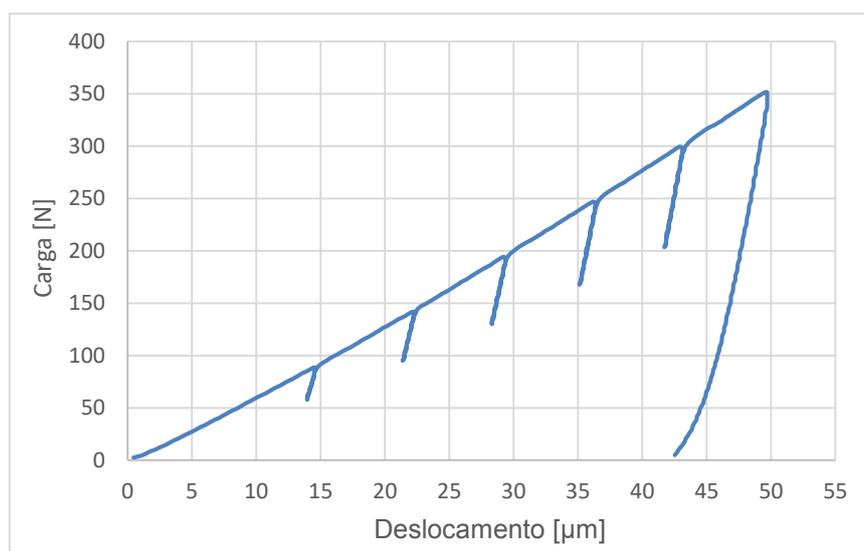


Figura 5.2 - Curva de Carga *versus* Deslocamento, típica de um ensaio de Indentação Instrumentada

O equipamento utilizado foi o *PropInSitu 2*, desenvolvido na Universidade Federal de Uberlândia em parceria com a Petrobras (RAMOS NETO *et al.*, 2004) (Fig. 5.3), e que permite a realização de ensaios não destrutivos e de ensaios em campo (*in situ*). Usualmente, são utilizados indentadores esféricos de Carboneto de Tungstênio, devido à sua alta dureza em relação a grande maioria dos aços. A força aplicada e o deslocamento imprimido na amostra são medidos através de uma célula de carga e um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), respectivamente.



Figura 5.3 - Detalhe do Equipamento utilizado no ensaio de Macroindentação Instrumentada, *PropInSitu 2*

De acordo com a norma ISO 14577-1, que regulamenta parâmetros para realização de ensaios de Indentação Instrumentada em materiais metálicos, a espessura da amostra deve ter dimensão de no mínimo 10 vezes a profundidade máxima de indentação imprimida. Seguindo as recomendações estabelecidas na norma, foram fabricadas três amostras em formato de disco, com diâmetro de 20 mm e altura de 10 mm, visto que os ensaios não ultrapassariam a profundidade de 100 μm .

As amostras tiveram suas duas faces paralelas lixadas para garantir o paralelismo entre elas, e as superfícies de medição foram lixadas com lixa abrasiva, iniciando com a lixa de 120 *mesh*, e seguindo a ordem crescente de 220, 320, 400, 600, 1200 e 2000 *mesh*. Após o lixamento, as amostras foram limpas e polidas com pasta de alumina de granulometria de 3 e 1 μm (Fig.5.4).

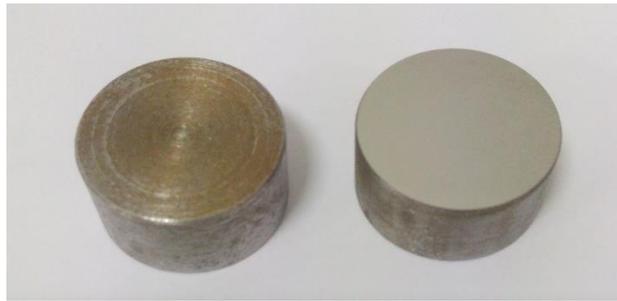


Figura 5.4 - Amostras fabricadas para realização do ensaio (a) antes do lixamento e polimento e (b) após o lixamento e polimento superficial

Foram realizados dois ensaios preliminares para calibração da máquina e ajuste de todos os componentes. Em seguida, foram realizados três ensaios de indentação com carga de 500 N, para minimizar erros de leituras, utilizando apenas um ciclo de carregamento. Foram medidos os deslocamentos e a força a cada passo de tempo e foram gerados os gráficos de Carga *versus* Deslocamento.

5.1.3 Modelo em Elementos Finitos: Validação

Realizados os ensaios experimentais para levantamento das propriedades e parâmetros a serem utilizados nas simulações, foi desenvolvido o modelo em elementos finitos, em três dimensões, correspondente ao ensaio de macroindentação. O modelo usado na validação apresenta uma superfície lisa, semelhante à da amostra utilizada no ensaio de indentação e um indentador esférico.

5.1.3.1 Simplificações

Os modelos de elementos finitos permitem a realização de simplificações do problema para redução do esforço computacional. Essas simplificações são realizadas quando não há prejuízo da representatividade do modelo, e são compensadas com as condições de contorno correspondentes. Neste modelo foram reproduzidos a amostra e o indentador esférico utilizados no ensaio. Devido ao caráter circular das geometrias e seus planos de simetria, foi adotado um modelo simplificado de um quarto da amostra, e um quarto de uma semiesfera, representando o indentador, de acordo com a Fig. 5.5.

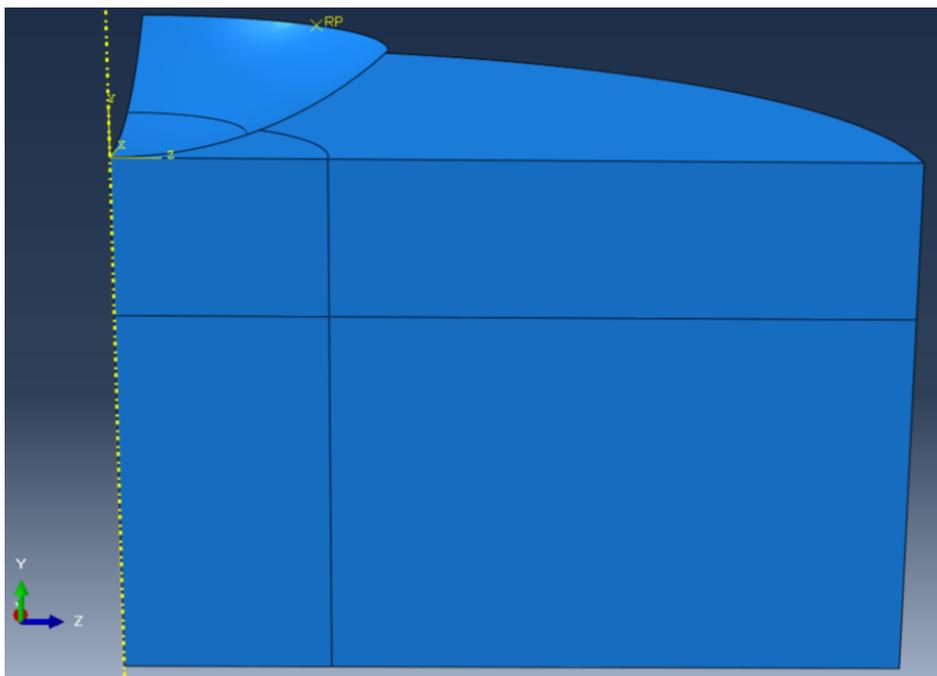


Figura 5.5 - Modelo da geometria utilizada para validação

O modelo apresenta seu eixo vertical, correspondente ao eixo de deslocamento do indetador no eixo y , e simetrias nos demais. A amostra teve sua base fixada, não permitindo movimentos de rotação e translação em nenhuma direção, e o movimento do indetador só é possível ao longo do eixo vertical.

Apesar do modelo possuir axissimetria, foi utilizada na validação uma geometria em três dimensões, para poder manter os mesmos parâmetros da geometria em todas as simulações, pois nos modelos texturizados, a geometria perde sua axissimetria.

5.1.3.2 Parâmetros Utilizados

Os parâmetros de propriedades utilizados no modelo de validação foram os obtidos no ensaio de tração, que são o Módulo de Elasticidade (E), o limite de escoamento (S_y), e o limite de resistência (S_{ut}), juntamente com os retirados de Felice Neto (2012), o coeficiente de *Poisson* (ν) e densidade (ρ), expostos na Tab.5.1. No ensaio foi calculado o limite de elasticidade do aço de baixo carbono, e obtida a curva de tensão *versus* deformação, que é utilizada para caracterização do comportamento elasto-plástico do material no ABAQUS®.

O indetador utilizado é do tipo Brinell, esférico, composto de carboneto de tungstênio (WC). Esse material, por apresentar rigidez muito superior à do aço, foi

considerado como corpo rígido, visto que, com as cargas do ensaio, não apresenta grandes deformações, pois este possui um módulo de elasticidade bem superior ao do aço da amostra. A consideração de um indentedor deformável não é interessante visto que isso acarreta um aumento significativo na complexidade do contato, e as deformações na amostra são muito maiores que a deformação elástica sofrida pelo indentedor durante o ensaio experimental.

Tabela 5.1 Propriedades utilizadas nas Simulações

	E [GPa]	ν	ρ [kg/m ³]	S_y [MPa]	S_{ut} [MPa]
Substrato	211	0,3	7800	325	490
Indentedor	Corpo rígido				

O modelo da amostra apresenta dimensões reduzidas (Fig. 5.6), quando comparado com a amostra utilizada no experimento, mas apresenta tamanho suficiente para respeitar a norma ISO 14577-1, que define que a espessura da amostra deve ter dimensão de no mínimo 10 vezes a profundidade máxima de indentação imprimida, para validade do ensaio.

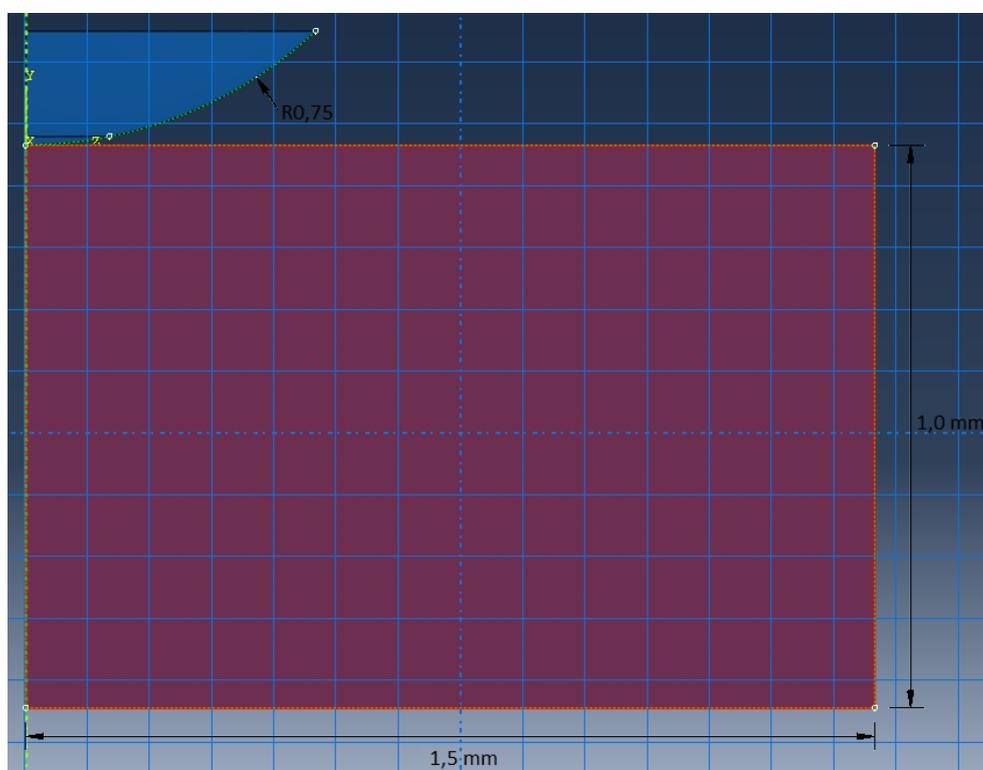


Figura 5.6 - Geometria e dimensões do modelo proposto

Foram realizadas simulações para garantir que o modelo também apresente dimensões suficientes para que as superfícies livres da geometria não interfiram nos resultados. O indentador esférico tem diâmetro de 1,5 mm, igual ao utilizado no experimento.

As condições de contorno utilizadas foram: deslocamento do indentador de 82 μm , a partir da superfície da amostra, equivalente ao deslocamento máximo obtido no ensaio para uma carga de 500 N, e, posteriormente, para compensar a complacência do equipamento, foram realizadas simulações com deslocamento de 76 μm . Foram utilizados os mesmos parâmetros de tempo para as etapas de carregamento e descarregamento, em todas as simulações, com incrementos calculados automaticamente pelo algoritmo do programa.

Para o par de contato, indentador e amostra, foi considerada a condição de superfície mestra para a esfera, e superfície escrava para a amostra, para garantir que o indentador penetre a amostra, e não o contrário. Nas propriedades do contato foi considerado um coeficiente de atrito igual a 0,1, verificado na literatura para superfícies polidas, e contato a seco. Foram realizadas outras simulações com coeficientes maiores, que não apresentaram variação significativa nos resultados.

5.1.3.3 Malha Utilizada

Para o modelo da validação foram utilizadas malhas estruturadas compostas por elementos hexaédricos, devido à simplicidade da geometria. A área de maior interesse para o ensaio é a área em que ocorre o contato do indentador e a amostra, e sua região adjacente. Dessa maneira, para uma otimização do tempo computacional, sem prejuízo da qualidade dos resultados, a área de interesse apresenta um alto grau de refinamento, para garantir a qualidade dos resultados, e o restante apresenta um refinamento gradualmente mais grosseiro, conforme Fig. 5.7.

Para determinação do refino da malha, devem ser realizados testes que garantam que o elemento esteja suficientemente pequeno para convergência da malha, mas não tão fino para tornar o cálculo inviável, devido ao aumento do esforço computacional. Dessa maneira, foram realizadas simulações com diferentes tamanhos de elementos, até a obtenção de uma dimensão, que a partir dela, os resultados não apresentaram variações significantes.

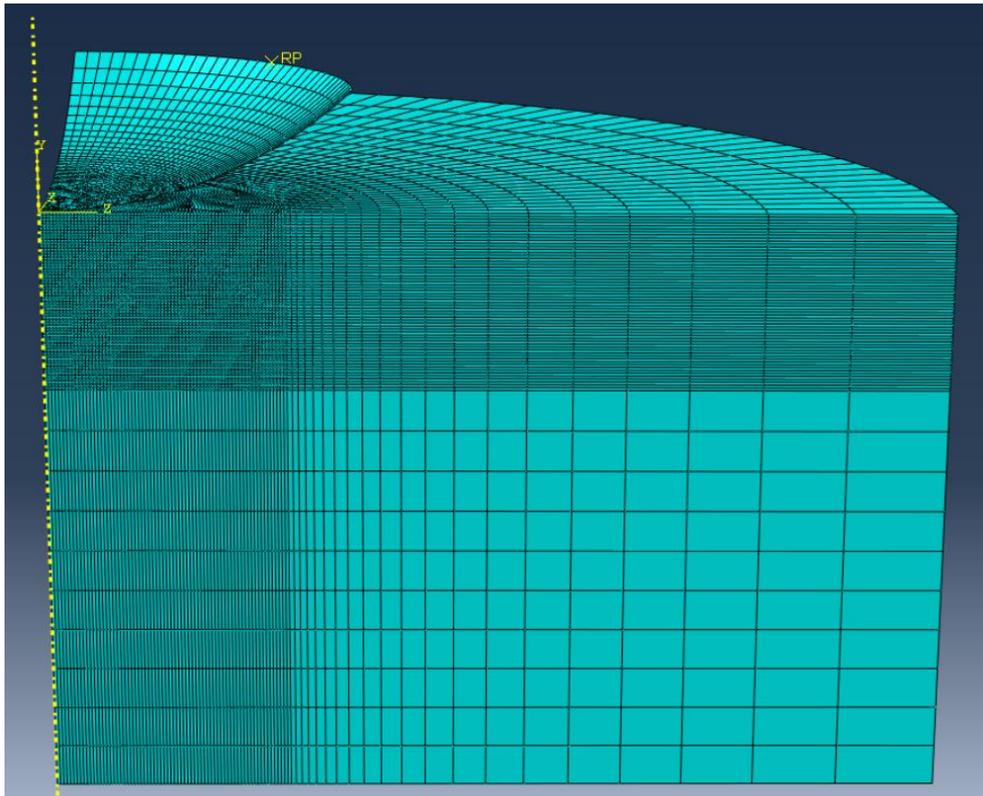


Figura 5.7 - Malha do Modelo de Validação

Da mesma maneira, o indentador apresenta elementos com dimensões semelhantes aos pertencentes à área de contato, para garantir que não haja penetração de uma parte na outra. Para os ensaios realizados, o tamanho médio dos elementos utilizados na região do contato foi de 0,005 mm.

5.2 Modelos Texturizados

Depois de realizada a validação do modelo numérico, foram desenvolvidos os modelos com a superfície texturizada. Os modelos foram criados para analisar como a texturização superficial influencia os campos de tensão e deformação de uma amostra de aço de baixo carbono, texturizada com bolsos circulares com duas diferentes configurações de geometria.

5.2.1 Simplificações

Os modelos texturizados criados são similares ao desenvolvido para a validação inicial, utilizando as mesmas dimensões e parâmetros de materiais utilizados anteriormente. Os modelos foram desenvolvidos, também utilizando a simetria em dois planos, e apresentando texturização superficial formada por bolsos cilíndricos de seção circular.

Para verificar a influência do tamanho dos padrões de texturização no comportamento das tensões e deformações, foram desenvolvidos dois modelos de amostras texturizadas, uma formada por bolsos circulares de diâmetro de $100\ \mu\text{m}$ e profundidade de $10\ \mu\text{m}$, e outra com bolsos circulares de diâmetro de $200\ \mu\text{m}$ e profundidade de $20\ \mu\text{m}$, conforme Fig. 5.8. O motivo para alterar-se tanto o diâmetro quanto a profundidade dos bolsos foi manter-se uma relação entre profundidade e diâmetro constante, uma vez que essa relação é normalmente apontada na literatura como tendo grande efeito no desempenho tribológico de superfícies texturizadas (ETSION, 2005). Os bolsos foram distribuídos uniformemente ao longo da superfície com uma densidade de texturização de aproximadamente 25%.

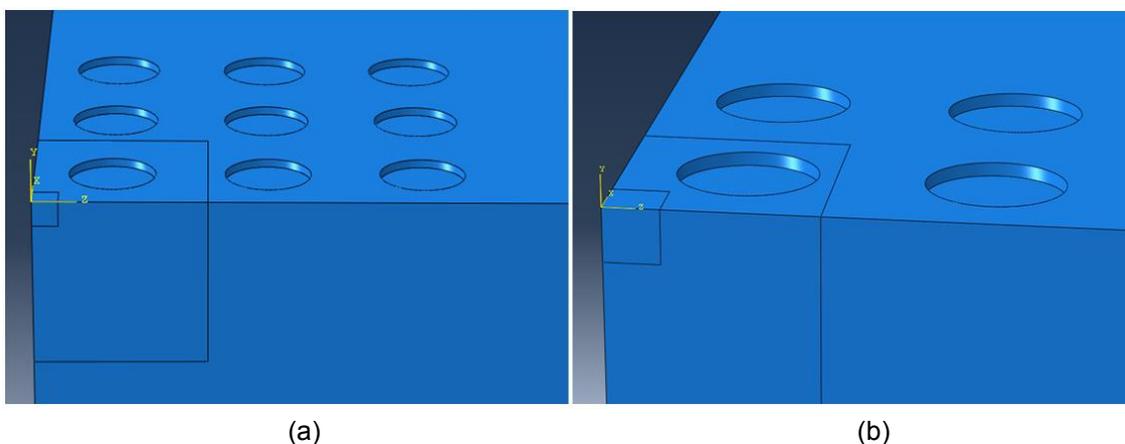


Figura 5.8 - Detalhe dos Modelos texturizados com bolsos circulares (a) diâmetro de $100\ \mu\text{m}$ e profundidade de $10\ \mu\text{m}$, (b) diâmetro de $200\ \mu\text{m}$ e profundidade de $20\ \mu\text{m}$

5.2.2 Parâmetros Utilizados

Afim de determinar as áreas de contato mais críticas, foram realizadas simulações para 3 diferentes posições do indentador. A posição 1 é a localizada no centro da área entre quatro bolsos, a posição 2 é no centro do segmento que liga o

centro de dois bolsos adjacentes, e, finalmente a posição 3, é coincidente com o centro do bolso, conforme representado na Fig. 5.9.

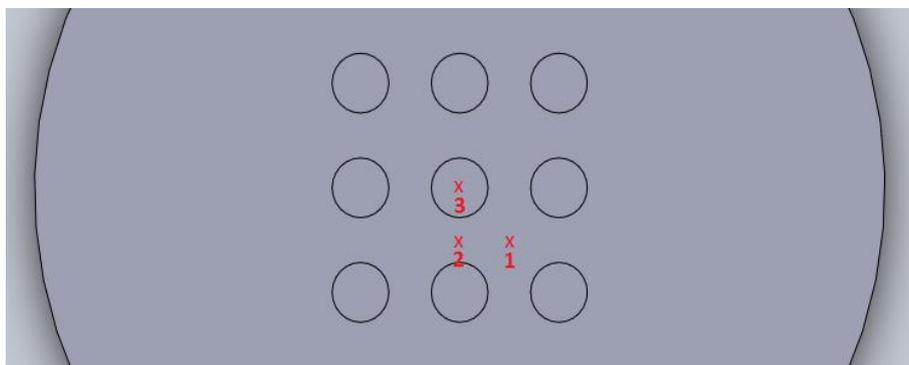


Figura 5.9 - Amostra com as diferentes posições adotadas para o indentador

As posições adotadas pelo indentador foram utilizadas nas simulações das duas geometrias, e, para facilitar a criação da geometria do modelo, foram desenvolvidos três modelos para cada configuração de textura, para manter a posição de indentação coincidente com os eixos de simetria do modelo, conforme Fig. 5.10.

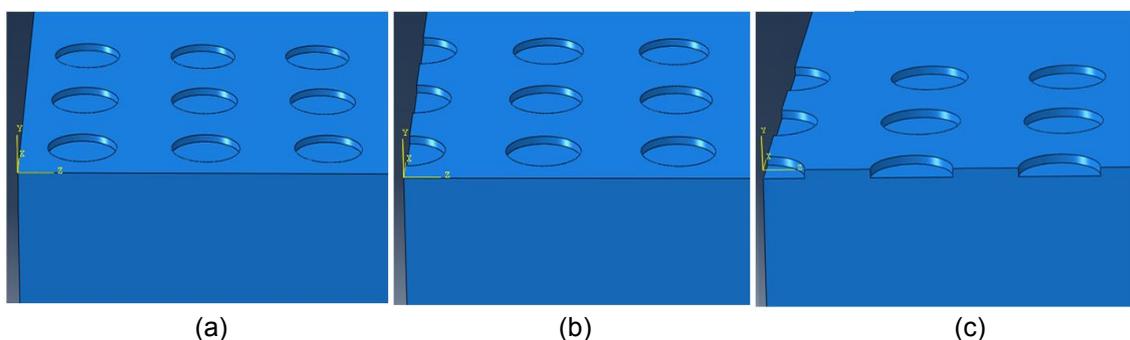


Figura 5.10 - Detalhes dos Modelos criados para as três diferentes posições (a) 1, (b) 2, (c) 3

Os parâmetros de materiais foram os mesmos utilizados anteriormente, mas com a profundidade de indentação de 5 μm , pois após testes realizados, verificou-se que com esse valor é possível verificar as tensões e deformações, sem que haja uma deformação excessiva, que comprometa os resultados e que gere problemas de convergência na simulação. O deslocamento foi aplicado com o mesmo passo de tempo adotado para a validação, assim como o coeficiente de atrito foi mantido 0,1 para o par de contato.

5.2.3 Malha Utilizada

Para os modelos texturizados não é possível utilizar malhas estruturadas, devido às suas geometrias mais complexas. Dessa maneira, foram utilizadas malhas não estruturadas compostas por elementos tetraédricos. Para a área de contato do indentador com a superfície e a região adjacente, foram delimitadas áreas com um alto grau de refinamento, para garantir bons resultados e otimizar o tempo computacional. Devido à presença de cantos vivos na geometria, foram realizados refinamentos nestas áreas, com atenção especial para garantir a qualidade dos resultados, e o restante da geometria que não influencia no contato apresenta um refinamento gradualmente mais grosseiro, conforme Fig. 5.11.

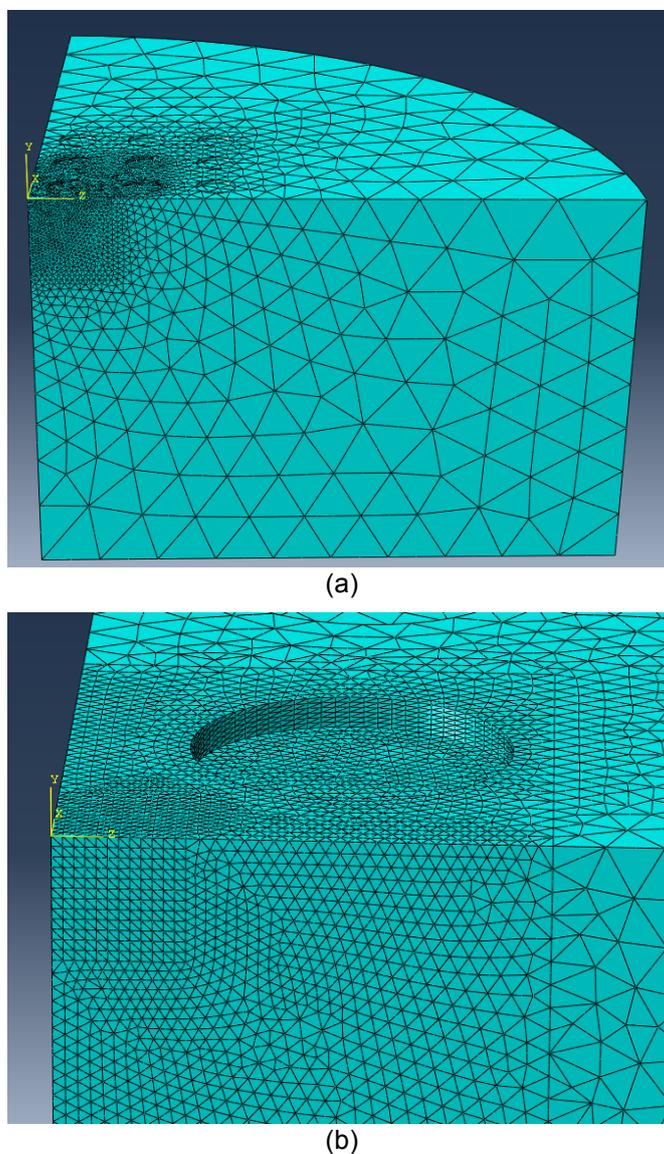


Figura 5.11 - Malha do Modelo Texturizado com relação de profundidade/diâmetro de 100/10 μm , na posição 1 (a) completo, (b) em detalhe

Para determinação do refino da malha, foram realizados testes de malha, até a obtenção de uma dimensão, que, a partir dela, os resultados não apresentaram variações significativas. Para os ensaios com os modelos texturizados, o tamanho médio dos elementos utilizados na região do contato foi de 0,003 mm para os dois modelos de textura. Os elementos do indentador foram mantidos próximos aos utilizados nas amostras.

Para verificar o papel da texturização superficial no comportamento de tensão e deformação da amostra, foi realizada uma simulação com um modelo com superfície lisa, utilizando os mesmos parâmetros e propriedades.

5.3 Modelos Texturizados e Revestidos em Elementos Finitos

Depois de realizadas as simulações para as amostras texturizadas, o próximo passo foi aplicar o revestimento nos modelos previamente desenvolvidos e realizar as simulações.

5.3.1 Parâmetros Utilizados

Os parâmetros geométricos utilizados para as amostras foram os mesmos propostos anteriormente, com a adição de duas camadas de revestimento. A camada mais externa de revestimento é composta por DLC, e apresenta espessura de 0,58 μm , e a camada intermediária entre o substrato e o DLC é formada por nitreto de cromo (CrN) e tem espessura de 3,24 μm . Estes valores utilizados para as espessuras foram os valores ótimos para as camadas desses materiais encontrados por Felice-Neto (2012) através de análises de tensões radiais e cisalhantes, para uma profundidade de indentação correspondente a 20% da espessura da camada mais fina, igual a 0,116 μm .

Para as diferentes posições do indentador foram utilizadas as mesmas configurações propostas anteriormente. E as propriedades dos materiais utilizados foram adotadas de acordo com a Tab. 5.2. O comportamento do substrato é elasto-plástico (conforme a curva Tensão *versus* Deformação mostrada na Fig. 5.1), e para o DLC e CrN, o comportamento adotado é puramente elástico linear, devido às suas elevadas resistências mecânicas.

Em virtude do caráter frágil do material do revestimento e de suas pequenas espessuras, a profundidade de indentação utilizada foi de 20% da espessura da camada mais fina, de DLC, correspondente a 0,116 μm , com referência na superfície da amostra. O passo de tempo para a aplicação do deslocamento foi mantido para todas as simulações, assim como o valor do coeficiente de atrito de 0,1.

Tabela 5.2 Propriedades utilizadas nas Simulações das Amostras Texturizadas e Revestidas

	E [GPa]	ν	ρ [kg/m ³]
Substrato	211,00	0,30	7800
CrN	307,20	0,25	2200
DLC	220,38	0,30	2200

Para verificar o papel da texturização superficial no comportamento de tensão e deformação da amostra revestida foi realizada uma simulação com um modelo com superfície lisa, utilizando os mesmos parâmetros e propriedades.

5.3.2 Malha Utilizada

Os elementos utilizados para os modelos texturizados e revestidos foram os elementos tetraédricos não estruturados. Na área de contato e região adjacente foram utilizados elementos com altíssimo grau de refinamento, principalmente na espessura das camadas, devido as suas pequenas dimensões e pequena profundidade de indentação (Fig. 5.12).

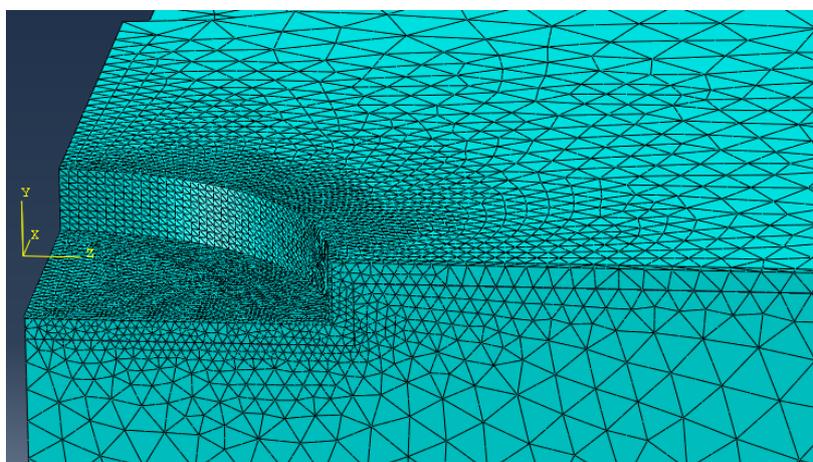


Figura 5.12 - Detalhe da Malha do Modelo Texturizado e Revestido com relação de profundidade/diâmetro de 100/10 μm , na posição 3

Após os testes de malha, os tamanhos médios dos elementos obtidos para o revestimento de CrN e DLC foram de $1\ \mu\text{m}$ e $0,007\ \mu\text{m}$, respectivamente, e para o substrato de $3\ \mu\text{m}$ próximo à área analisada. Os elementos do indentedor foram mantidos próximos aos utilizados na amostra, na área de interesse.

5.3.3 Análises de Novas Posições

Realizadas as simulações das amostras texturizadas e revestidas, foi constatado que a profundidade de indentação utilizada, de $0,116\ \mu\text{m}$, por ser muito pequena, não apresentou diferenças de comportamento das tensões e deformações para as diferentes posições de indentação. Os resultados obtidos para as posições 1 e 2 foram similares aos da superfície lisa, e para a posição 3, a profundidade não foi suficiente para haver contato entre a esfera e o indentedor.

Para otimizar o esforço computacional, minimizando o número total de elementos, devido aos pequenos valores de indentação, foi proposta uma geometria reduzida que atendesse aos critérios de representatividade do modelo, a condição da espessura ser maior que 10 vezes a profundidade de indentação e a não influência das superfícies livres no resultado. Assim, foi utilizado o seguinte modelo, conforme Fig. 5.13.

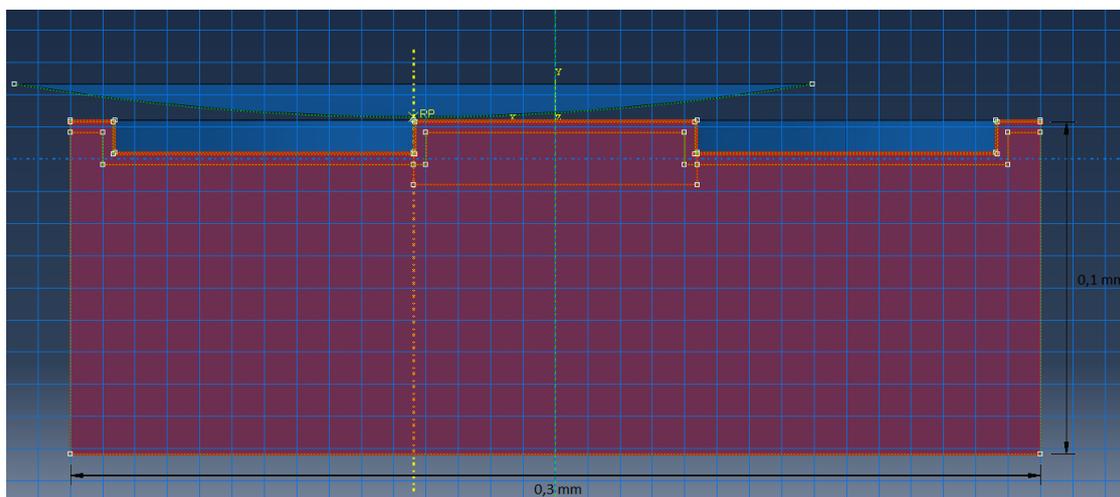


Figura 5.13 - Nova geometria para o Modelo Texturizado e Revestido com relação de profundidade/diâmetro de $100/10\ \mu\text{m}$

Dessa maneira, para verificar a presença da texturização no comportamento do revestimento, foram propostas novas posições de indentação. Elas foram adotadas a partir da referência da posição 2, que é a correspondente ao centro da linha que une o centro de dois bolsos. A partir desta posição, foram adotadas cinco novas posições relativas: a primeira entre a posição 2 e a extremidade do bolso, a segunda correspondente à metade desta distância, seguida por um oitavo e um dezesseis avos da distância, e finalmente na borda do bolso. Os valores foram adotados a partir da distância entre a posição 2 e as extremidades dos bolsos, para os modelos texturizados e revestidos, conforme Fig. 5.14.

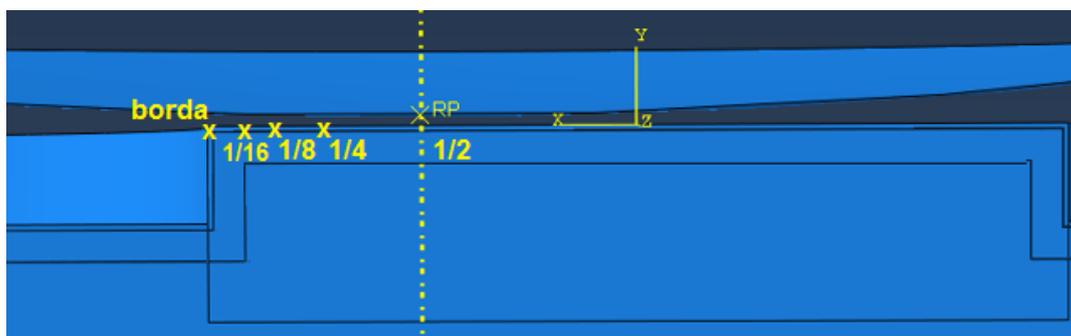


Figura 5.14 - Novas posições relativas de indentação para os Modelos Texturizados e Revestidos

Depois de realizadas as simulações dos novos modelos texturizados e revestidos para os dois padrões de texturização, com bolsos de 100 e 200 μm de diâmetro, foram retirados os revestimentos dos modelos, e foram realizadas novas simulações, utilizando os mesmos parâmetros. Assim, foi possível comparar e verificar a diferença do comportamento das tensões e deformações do componente na presença do revestimento.

5.3.3.1 Parâmetros Utilizados

Os parâmetros geométricos utilizados para os novos modelos foram os mesmos utilizados para os modelos texturizados e revestidos, diferindo-se apenas na geometria do modelo, que foi gerado utilizando-se apenas um plano de simetria, para melhor verificação dos resultados. Os parâmetros referentes a propriedades, geometria e profundidade de indentação foram mantidos.

5.3.3.2 Malha Utilizada

Os elementos utilizados para os novos modelos texturizados e revestidos também foram os elementos tetraédricos não estruturados. Na área de interesse foram utilizados elementos com alto grau de refinamento, conforme Fig. 5.15.

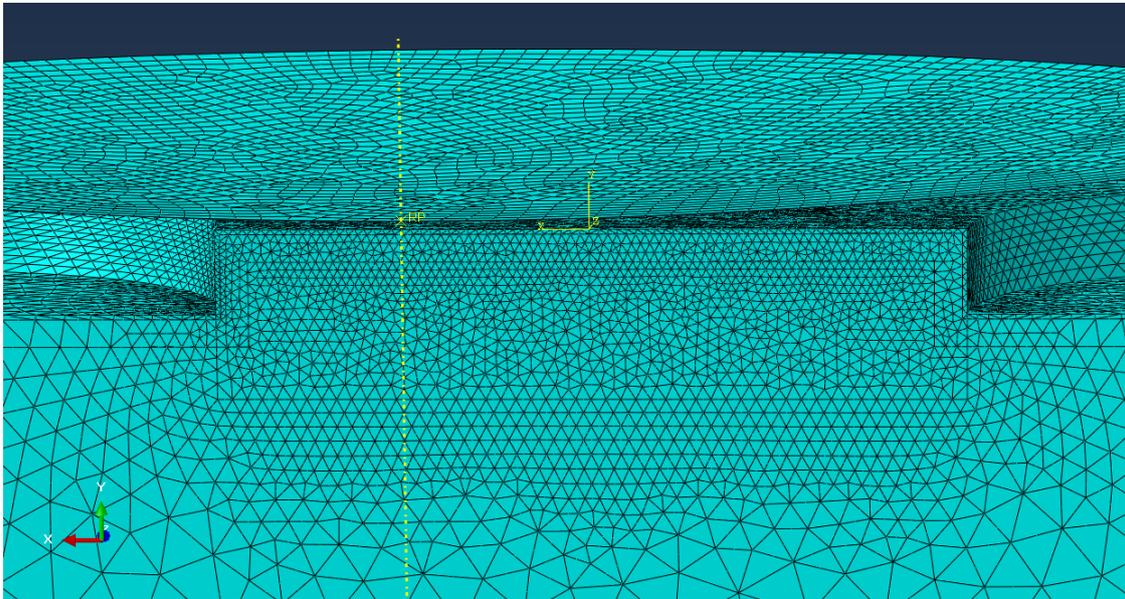


Figura 5.15 - Detalhe da malha do novo Modelo Texturizado e Revestido com relação de profundidade/diâmetro de 100/10 μm

Finalizados os testes de malha, os tamanhos médios dos elementos obtidos para o revestimento de CrN e DLC foram de 1 μm e 0,007 μm , respectivamente, e para o substrato de 3 μm . Os elementos do indentedor foram mantidos próximos aos utilizados na amostra na área de contato.

5.4 Planejamento das Simulações

As simulações foram realizadas na sequência descrita anteriormente, para todos os modelos desenvolvidos e seus respectivos parâmetros, de acordo com a Tab. 5.3.

Tabela 5.3 Planejamento das Simulações

Simulação	Modelo	Posição	Profundidade [μm]
1	Validação (liso sem revestimento)	-	82
2	Validação (liso sem revestimento)	-	75
3	Liso	-	5
4	Texturizado 100 μm	1	5
5	Texturizado 100 μm	2	5
6	Texturizado 100 μm	3	5
7	Texturizado 200 μm	1	5
8	Texturizado 200 μm	2	5
9	Texturizado 200 μm	3	5
10	Revestido Liso	-	0,116
11	Texturizado e Revestido 100 μm	1	0,116
12	Texturizado e Revestido 100 μm	2	0,116
13	Texturizado e Revestido 100 μm	3	0,116
14	Texturizado e Revestido 200 μm	1	0,116
15	Texturizado e Revestido 200 μm	2	0,116
16	Texturizado e Revestido 200 μm	3	0,116
17	Novo Texturizado e Revestido 100 μm	1/2	0,116
18	Novo Texturizado e Revestido 100 μm	1/4	0,116
19	Novo Texturizado e Revestido 100 μm	1/8	0,116
20	Novo Texturizado e Revestido 100 μm	1/16	0,116
21	Novo Texturizado e Revestido 100 μm	borda	0,116
22	Novo Texturizado 100 μm	1/2	0,116
23	Novo Texturizado 100 μm	1/4	0,116
24	Novo Texturizado 100 μm	1/8	0,116
25	Novo Texturizado 100 μm	1/16	0,116
26	Novo Texturizado 100 μm	borda	0,116
27	Novo Texturizado e Revestido 200 μm	1/2	0,116
28	Novo Texturizado e Revestido 200 μm	1/4	0,116
29	Novo Texturizado e Revestido 200 μm	1/8	0,116
30	Novo Texturizado e Revestido 200 μm	1/16	0,116
31	Novo Texturizado e Revestido 200 μm	borda	0,116
32	Novo Texturizado 200 μm	1/2	0,116
33	Novo Texturizado 200 μm	1/4	0,116
34	Novo Texturizado 200 μm	1/8	0,116
35	Novo Texturizado 200 μm	1/16	0,116
36	Novo Texturizado 200 μm	borda	0,116

CAPÍTULO VI

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados correspondentes aos experimentos realizados, e as simulações desenvolvidas. Primeiramente, são apresentados os resultados referentes à etapa de validação do modelo e propriedades do material utilizado. Depois de validado o modelo, foi analisada a influência da texturização superficial nos campos de tensão e deformação, no que diz respeito aos valores máximos e as regiões mais críticas. Por fim, foram analisadas as amostras texturizadas com revestimento, verificando a localização das tensões máximas, de acordo com a posição do indentador em relação à geometria da texturização.

6.1. Validação do Modelo e Propriedades

Os ensaios de tração realizados no equipamento MTS-793 apresentaram como resultados curvas muito similares de Tensão *versus* Deformação. Dessa maneira, é apresentada na Fig. 6.1 a curva que mostrou um comportamento médio entre elas. O gráfico apresenta a fase elástica e plástica, até o momento do início da estricção.

Durante o ensaio, o programa do equipamento também realiza o cálculo de diversas outras propriedades, incluindo o Módulo de Elasticidade. Mas para garantir um resultado mais preciso, e evitar possíveis erros devido a alguns pontos deslocados da curva, foi analisada a parte elástica da curva, excluindo-se os pontos discrepantes, e através de um cálculo de linearização, foi obtido o valor do Módulo de Elasticidade

do aço de baixo teor de carbono ensaiado. Os valores dos limites de escoamento e resistência à tração foram obtidos através da análise do gráfico.

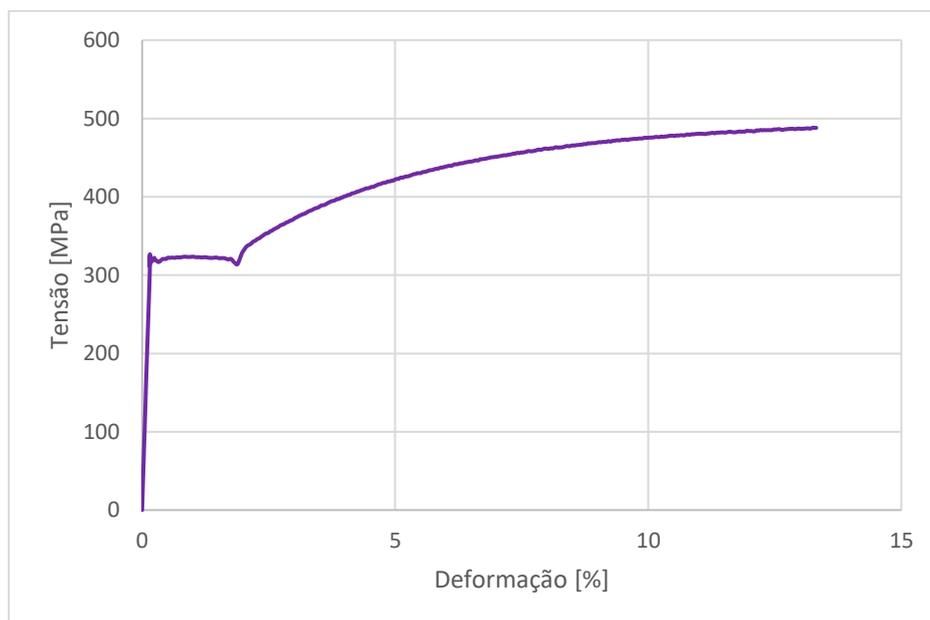


Figura 6.1 - Curva Tensão versus Deformação obtida no ensaio de tração

No ensaio de indentação instrumentada utilizou-se o valor do módulo de Elasticidade calculado a partir do ensaio de tração e apenas um ciclo de carregamento e descarregamento. Depois de realizados os três ensaios, os resultados apresentaram variações insignificantes, e a curva resultante é apresentada na Fig. 6.2. Juntamente com a curva obtida pelo ensaio, são mostradas as curvas obtidas nas simulações realizadas para a validação do modelo. A curva em laranja corresponde à simulação realizada com a mesma profundidade de indentação máxima registrada durante o ensaio, correspondente a 82 μm , e a curva azul marinho é o resultado da simulação feita com profundidade de 76 μm .

A simulação com a profundidade inferior à obtida no experimento foi realizada para descontar o efeito da complacência do equipamento. Essa complacência é caracterizada como a capacidade de deformação elástica do sistema em função da aplicação da carga, que pode causar divergência entre os valores experimentais e os obtidos numericamente. De acordo com Ullner et al. (2010), o erro relativo obtido na medição da profundidade de indentação é função da força e cresce à medida que há um aumento da mesma. A complacência também afeta a inclinação inicial da curva de descarregamento, e é uma importante fonte de incerteza em ensaios de macroindentação instrumentada.

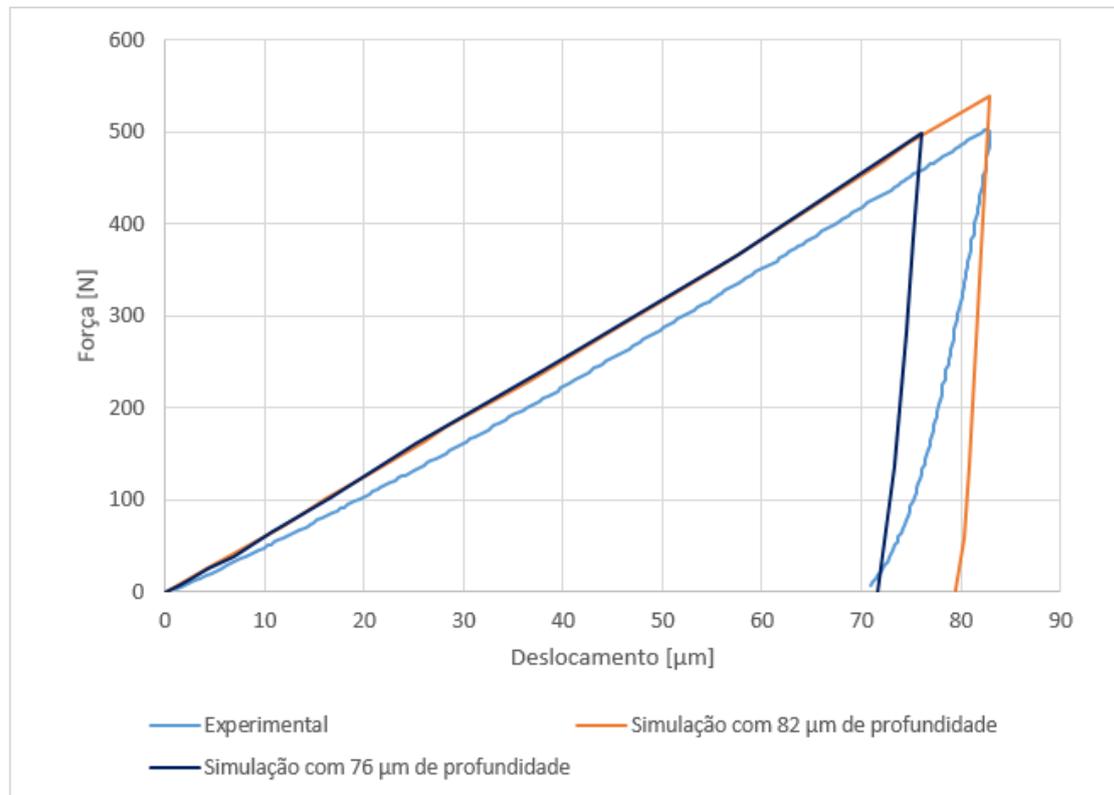
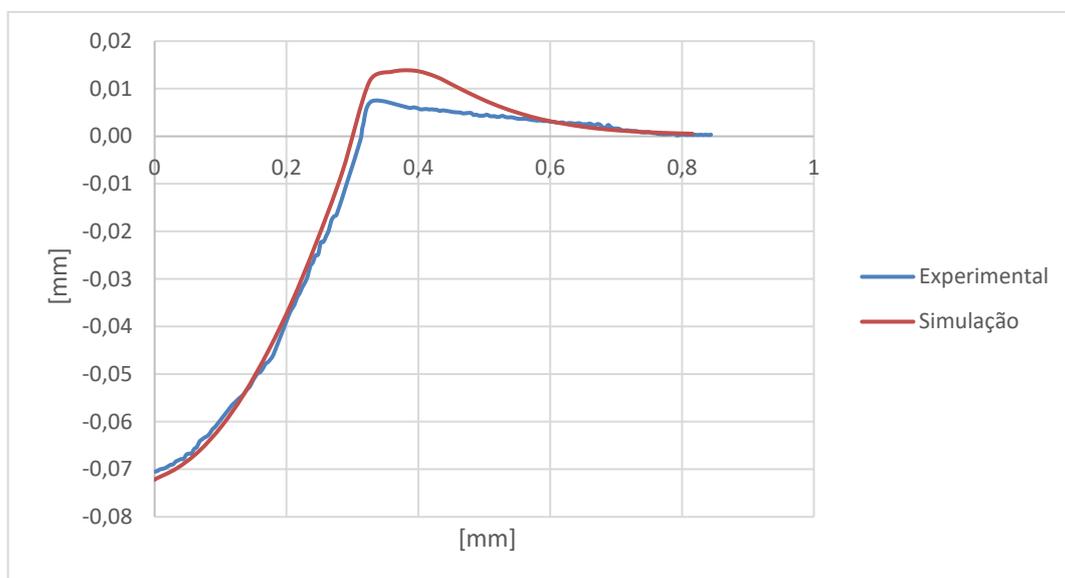


Figura 6.2 - Curva Força *versus* Deslocamento com os resultados obtidos no Ensaio Experimental, e das Simulações com 82 μm e 76 μm de profundidade de indentação

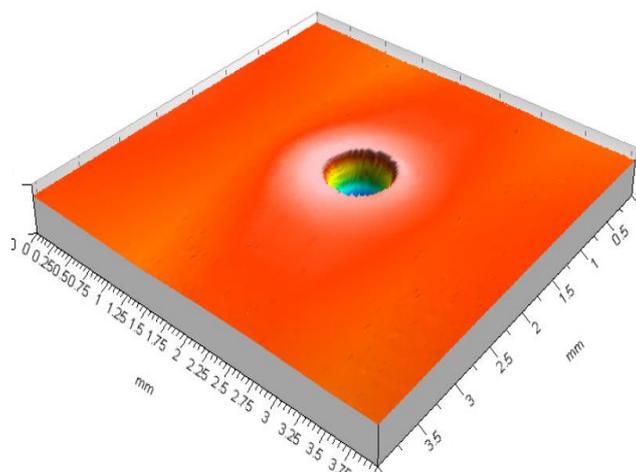
Quando utilizada na simulação a profundidade de indentação igual ao deslocamento total da esfera no ensaio, a curva atinge o mesmo ponto de deslocamento, porém com uma força relativamente maior que a força aplicada no ensaio. Foi observado o valor do deslocamento correspondente ao valor da carga de 500 N, e foi refeita a simulação com a profundidade de 76 μm, afim de corrigir o ponto de máximo deslocamento, força aplicada, e profundidade da marca de indentação deixada. Dessa maneira, a força de 500 N foi obtida, e a profundidade da calota de indentação teve seu valor próximo ao valor ensaiado, com erro inferior a 2%, como pode ser observado na Fig. 6.3 a.

Analisando os perfis das calotas deixadas pela indentação da esfera, nota-se que a profundidade da curva lida na amostra ensaiada e na simulação apresentam valores bastante próximos. Observa-se uma diferença entre o *pile-up* formado na indentação simulada e o da amostra ensaiada, o que pode ser justificado por algum possível impacto ou deformação posterior do material devido ao intervalo de tempo entre a realização do experimento e a leitura realizada através da interferometria, ou

pela diferença da geometria do *pile-up* ao longo de toda circunferência da calota, como observado na Fig. 6.3 b.



(a)



(b)

Figura 6.3 - (a) Curva dos perfis das calotas de indentação lidas após o experimento e a simulação (b) Perfil tridimensional da calota esférica obtida após o ensaio de Indentação Instrumentada

De acordo com os resultados obtidos é possível afirmar que o modelo desenvolvido em elementos finitos simula, de maneira adequada e representativa, o ensaio de indentação em uma amostra de aço de baixo teor de carbono. Dessa maneira, pode-se estender essa validação para as demais simulações, visto que foram

utilizadas as mesmas propriedades do material e condições de contorno, alterando-se apenas a geometria superficial da amostra e a profundidade de indentação utilizada.

6.2. Análises dos Modelos Texturizados

Para os modelos texturizados, foram analisados os valores das tensões equivalentes calculadas segundo Von Mises e a deformação plástica equivalente sofrida pela amostra devido a indentação de uma esfera rígida com uma profundidade de 5 μm . Os resultados foram analisados para as situações de carregamento e descarregamento completos, de acordo com a Tab. 6.1.

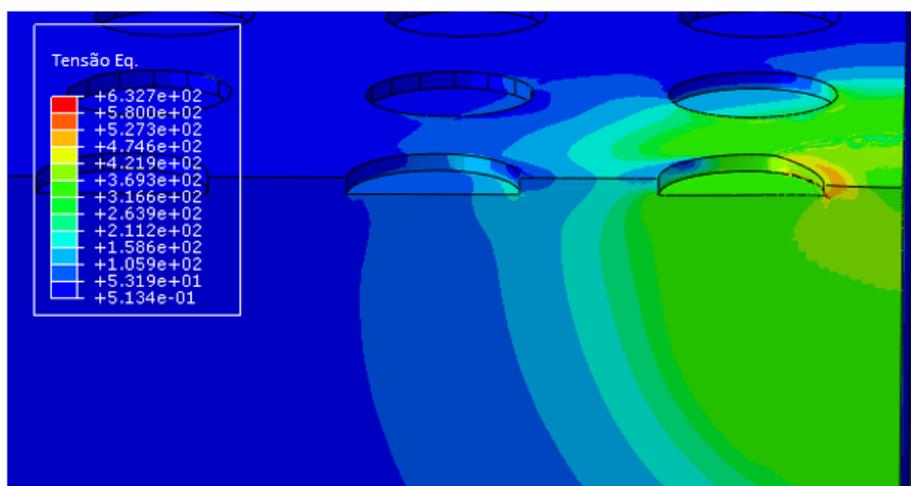
Tabela 6.1 Resultados das Tensões e Deformações Plásticas Equivalentes para os Modelos Texturizados nas situações: Carregado e Descarregado

Amostras Texturizadas				
Profundidade de Indentação: 5 μm				
Modelo / Posição	CARREGADO		DESCARREGADO	
	Tensão Eq. [MPa]	Deformação Plástica Eq.	Tensão Eq. [MPa]	Deformação Plástica Eq.
Liso	388	8%	356	8%
100 P1	488	37%	508	37%
100 P2	633	140%	659	140%
100 P3	632	140%	675	140%
200 P1	460	10%	430	10%
200 P2	545	45%	567	45%

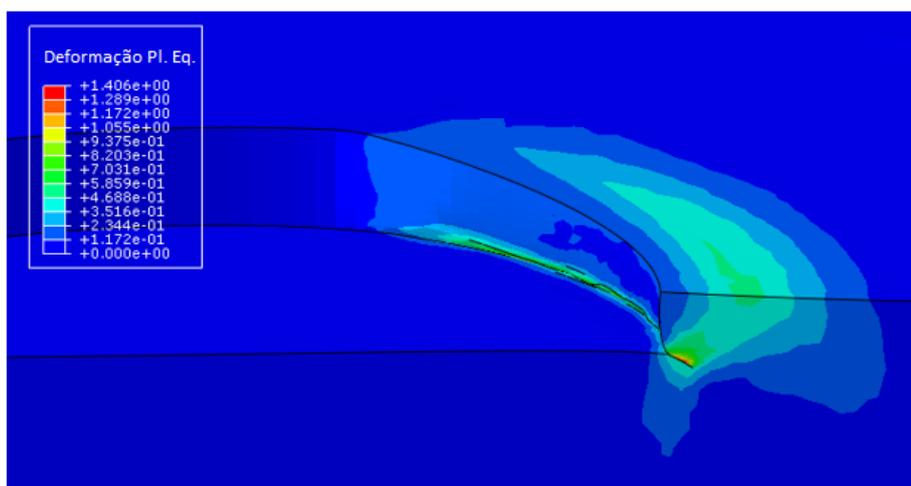
Comparando os resultados obtidos para as amostras texturizadas com os bolsos circulares de diâmetro de 100 μm , percebe-se um aumento dos valores de tensão e deformação plástica, sendo significativamente maiores para as posições 2 e 3, correspondentes ao centro do segmento que liga o centro de dois bolsos adjacentes, e coincidente com o centro do bolso, respectivamente. Para essas posições nota-se uma deformação plástica extremamente alta, devido ao valor elevado da profundidade de indentação próximo a borda dos bolsos, que por se tratar de uma superfície livre, não oferece grande resistência a deformação. Os valores máximos de tensão e

deformação estão localizados na parede interna dos bolsos, próximo ao fundo do bolso, em uma região de concentração de tensão, como pode ser observado na Fig. 6.4. Dessa maneira, nota-se que esta é uma região crítica e mais propensa ao surgimento de falhas.

Apesar dos elevados valores de tensões apresentados para algumas posições serem superiores ao limite de resistência do material, e de apresentarem também elevada deformação plástica, por se tratar de forças de compressão, as regiões com maiores tensões provavelmente não apresentarão trincas. Nestas posições e para esta profundidade de indentação, ocorre um esmagamento na parte inferior dos bolsos.



(a)



(b)

Figura 6.4 - (a) Tensão Equivalente [MPa] e (b) Deformação Plástica Equivalente do modelo 100 P2

Os valores das tensões variam entre a situação carregada e descarregada, devido à recuperação elástica e a redistribuição das tensões residuais. Para esta profundidade de indentação, os valores máximos de deformações plásticas não se alteram, mostrando que a recuperação elástica não causa fluxo plástico. Para a simulação da amostra lisa, após o descarregamento ocorre uma diminuição das tensões, ao contrário do que ocorre para as superfícies texturizadas com os bolsos de diâmetro de 100 μm , em que há aumento da tensão. Os valores de tensões apresentados são superiores ao limite de escoamento do material, evidenciando a ocorrência de encruamento.

Para as diferentes posições do indentador, além da variação dos valores das tensões, comparados à superfície lisa, ocorrem variações na distribuição dos campos de tensão, com seus maiores valores ocorrendo nas laterais dos bolsos, conforme Fig.6.5.

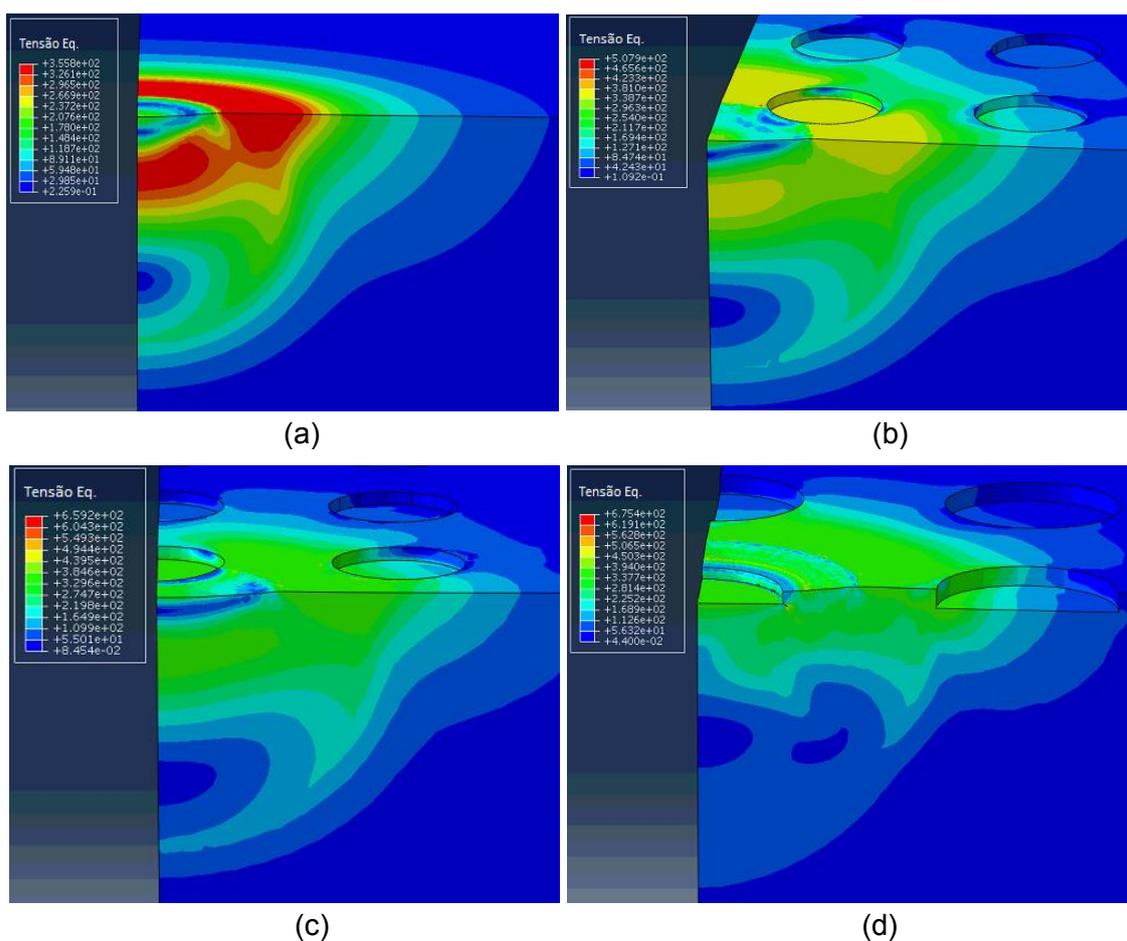


Figura 6.5 - Tensão Equivalente [MPa] para os modelos (a) liso, (b) 100 P1, (c) 100 P2 e (d) 100 P3

Para as superfícies com os bolsos de 200 μm de diâmetro, na posição 1, os valores obtidos são menores que os obtidos para a mesma posição para a outra configuração de textura, e são mais próximos aos referentes à superfície lisa, devido ao fato de haver, nesta geometria, uma maior distância entre os bolsos, aumentando a área lisa da superfície da amostra. Para a posição 2 ocorre um aumento de valores em relação à posição 1, em uma menor proporção ao observado para os bolsos de 100 μm , pela mesma razão descrita anteriormente. E para a posição 3, a profundidade de indentação de 5 μm não é suficiente para que haja contato da esfera com a amostra, pois todas as simulações iniciam-se no mesmo ponto de referência, correspondente à superfície mais externa da amostra.

6.3. Análises dos Modelos Texturizados e Revestidos

Nos modelos texturizados e revestidos, as análises mais interessantes a serem feitas são em relação aos valores máximos das tensões equivalentes, tensões cisalhantes e de tração que ocorrem nas camadas de revestimento, juntamente com o material da camada onde ocorrem, e as deformações plásticas equivalentes no substrato de aço. Para esses modelos, devido à pequena espessura das camadas de revestimento, foi utilizada uma profundidade de indentação correspondente a 20% do valor da espessura da menor camada, com valor equivalente a 0,116 μm . Os resultados são exibidos na Tab. 6.2 com os valores máximos da tensão equivalente, tensão cisalhante e tensão de tração, apresentados juntamente com o material da camada onde ocorrem, e a deformação plástica no substrato de aço, para as situações carregado e descarregado.

É possível notar que a presença do revestimento eleva substancialmente os valores da tensão equivalente da amostra lisa e revestida, em comparação com a amostra sem revestimento, mesmo considerando a profundidade de indentação muito menor. Mesmo com a utilização dessa profundidade de indentação, bem inferior à de 5 μm utilizada para as amostras sem revestimentos, as tensões desenvolvidas aumentam devido a maior rigidez das camadas e da diferença entre as propriedades dos materiais. A presença de interfaces de materiais com diferentes propriedades elásticas também contribui para o aumento das tensões no componente.

Tabela 6.2 Resultados nas situações Carregado e Descarregado

Amostras Texturizadas e Revestidas				
Profundidade de Indentação: 0,116 μm				
Modelo / Posição	CARREGADO			
	Tensão Eq. [MPa]	Máxima Tensão Cisalhante [MPa]	Máxima Tensão de Tração [MPa]	Deformação Plástica Eq.
Rev. Liso	1435 CrN	720 CrN	599 CrN	0,6%
100 P1	1437 CrN	721 CrN	601 CrN	0,6%
100 P2	1437 CrN	720 CrN	603 CrN	0,6%
100 P3	5434 DLC	3038 DLC	1497 CrN	-
200 P1	1441 CrN	724 CrN	603 CrN	0,6%
200 P2	1455 CrN	745 CrN	622 CrN	0,6%
Modelo / Posição	DESCARREGADO			
	Tensão Eq. [MPa]	Máxima Tensão Cisalhante [MPa]	Máxima Tensão de Tração [MPa]	Deformação Plástica Eq.
Rev. Liso	698 CrN	350 CrN	793 CrN	0,6%
100 P1	695 CrN	350 CrN	790 CrN	0,6%
100 P2	692 CrN	348 CrN	792 CrN	0,6%
100 P3	58 CrN	33 CrN	25 CrN	-
200 P1	699 CrN	358 CrN	793 CrN	0,6%
200 P2	710 CrN	362 CrN	812 CrN	0,6%

Os resultados obtidos, para a amostra lisa e revestida, das distribuições das tensões cisalhantes foram utilizados para validação do modelo, em comparação com os resultados obtidos por FELICE-NETO (2012), e podem ser observados na Fig. 6.6. Os valores das tensões diferem entre si, devido ao indentador utilizado por ele ter dimensões diferentes das utilizadas no presente trabalho.

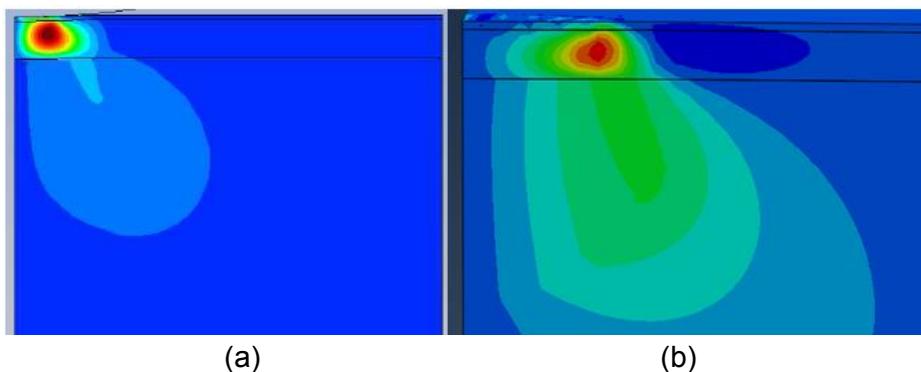


Figura 6.6 - (a) Distribuição das tensões cisalhantes na simulação de FELICE-NETO (2012) e (b) Distribuição das tensões cisalhantes no modelo liso e revestido proposto neste trabalho

Analisando os resultados obtidos para as amostras texturizadas e revestidas, o comportamento das geometrias com bolsos de diâmetro de 100 μm e 200 μm apresentam resultados praticamente iguais para as posições 1 e 2, que por sua vez são iguais aos valores observados na superfície revestida lisa. Esse comportamento deve-se ao fato da profundidade de indentação muito pequena não ser suficiente para que a geometria da texturização interfira nos campos de tensão e deformação das amostras, como observado na Fig. 6.7.

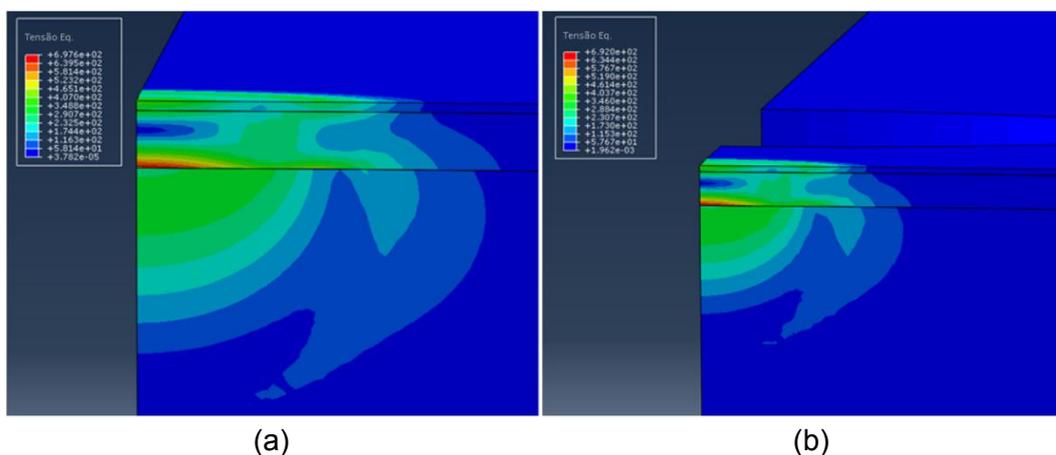


Figura 6.7 - (a) Tensão Equivalente [MPa] para a amostra revestida lisa e (b) Tensão Equivalente para a amostra com bolso de 100 μm na posição 2, na condição de carregamento

Para as posições 3, de mesma forma que ocorreu para a superfície texturizada com bolsos de 200 μm , não há o contato da esfera com a amostra. Mas para verificar os comportamentos das tensões e deformações para uma situação de contato, foi realizada uma simulação para a superfície texturizada e revestida, com bolsos de 100 μm , utilizando uma profundidade de indentação maior, com valor suficiente para que a esfera entrasse em contato com a amostra, e a partir de então, deslocasse mais 0,116 μm . Dessa maneira foi possível comprovar o aumento substancial dos valores de tensão quando o contato é realizado apenas na borda do bolso.

6.4. Novas Análises dos Modelos Texturizados e Revestidos

Depois de analisados os resultados das simulações das amostras texturizadas e revestidas, foi verificado, que com a profundidade de indentação utilizada, de

0,116 μm , não houve mudança de comportamento dos valores das tensões e deformações para as diferentes posições analisadas.

Desse modo, foram estabelecidas novas posições de indentação, originadas da posição 2, e os resultados obtidos nas simulações, para a situação carregada e descarregada são apresentados na Tab. 6.3. Nesta tabela são apresentados: os valores máximos da tensão equivalente, tensão cisalhante e tensão de tração, apresentados juntamente com o material da camada onde ocorrem e a deformação plástica no substrato de aço.

Tabela 6.3 Resultados nas novas posições, nas situações: Carregado e Descarregado

Modelos Texturizados e Revestidos - Novas Posições				
Profundidade de Indentação: 0,116 μm				
Modelo / Posição	CARREGADO			
	Tensão Eq. [MPa]	Máxima Tensão Cisalhante [MPa]	Máxima Tensão de Tração [MPa]	Deformação Plástica Eq.
100 1/2	1476 CrN	741 CrN	644 CrN	0,6%
100 1/4	2052 CrN	1068 CrN	751 CrN	1,0%
100 1/8	2677 DLC	1356 DLC	1064 CrN	0,8%
100 1/16	2712 DLC	1375 DLC	1207 CrN	0,8%
100 borda	2509 DLC	1276 DLC	1298 CrN	0,7%
200 1/2	1440 CrN	724 CrN	623 CrN/DLC	0,6%
200 1/4	1456 CrN	741 CrN	655 CrN/DLC	0,6%
200 1/8	1862 CrN	983 CrN	818 CrN	0,6%
200 1/16	2177 CrN	1156 CrN	1162 CrN	0,7%
200 borda	2070 DLC	1167 CrN	1381 CrN	0,8%
Modelo / Posição	DESCARREGADO			
	Tensão Eq. [MPa]	Máxima Tensão Cisalhante [MPa]	Máxima Tensão de Tração [MPa]	Deformação Plástica Eq.
100 1/2	720 CrN	363 CrN	813 CrN	0,6%
100 1/4	982 CrN	502 CrN	865 CrN	1,0%
100 1/8	854 CrN	434 CrN	873 CrN	1,0%
100 1/16	648 CrN	352 CrN	838 CrN	1,1%
100 borda	483 CrN	270 CrN	798 CrN	1,0%
200 1/2	699 CrN	363 CrN	793 CrN	0,6%
200 1/4	702 CrN	363 CrN	813 CrN	0,6%
200 1/8	883 CrN	465 CrN	867 CrN	0,6%
200 1/16	776 CrN	408 CrN	897 CrN	0,9%
200 borda	502 CrN	280 CrN	859 CrN	1,1%

Para uma análise mais completa, e que possibilitasse a verificação do papel da texturização e do revestimento no comportamento dos campos de tensão e deformação das amostras foram realizadas novas simulações, utilizando os mesmos parâmetros das apresentadas anteriormente, mas sem a presença do revestimento. Foram mantidas a profundidade de indentação e as posições utilizadas, e os resultados são apresentados na Tab. 6.4.

Tabela 6.4 Resultados para os Modelos Texturizados, nas novas posições, nas situações: Carregado e Descarregado

Modelos Texturizados - Novas Posições				
Profundidade de Indentação: 0,116 μm				
Modelo / Posição	CARREGADO			
	Tensão Eq. [MPa]	Máxima Tensão Cisalhante [MPa]	Máxima Tensão de Tração [MPa]	Deformação Plástica Eq.
100 1/2	417	237	402	0,5%
100 1/4	423	243	430	3,2%
100 1/8	416	235	372	3,7%
100 1/16	415	239	291	2,2%
100 borda	408	234	347	1,5%
200 1/2	414	233	329	0,5%
200 1/4	410	229	351	0,6%
200 1/8	423	238	375	0,8%
200 1/16	410	237	352	0,9%
200 borda	404	234	347	1,5%
Modelo / Posição	DESCARREGADO			
	Tensão Eq. [MPa]	Máxima Tensão Cisalhante [MPa]	Máxima Tensão de Tração [MPa]	Deformação Plástica Eq.
100 1/2	284	164	318	0,5%
100 1/4	396	208	656	3,2%
100 1/8	415	217	634	3,7%
100 1/16	401	204	497	2,2%
100 borda	375	199	370	1,5%
200 1/2	294	168	315	0,5%
200 1/4	256	147	266	0,6%
200 1/8	379	201	402	0,8%
200 1/16	261	142	256	0,9%
200 borda	375	199	370	1,5%

6.4.1 Tensão Equivalente

Para as tensões equivalentes, é possível perceber que a presença do revestimento na amostra, aumenta cerca de 3 vezes os valores das tensões observados, para a posição 1/2, que apresenta o mesmo comportamento de uma superfície lisa, de acordo com os resultados obtidos previamente e pode ser observado na Fig. 6.8. No gráfico, as posições 1, 2, 3, 4 e 5 apresentam as posições da tabela, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 e borda, respectivamente.

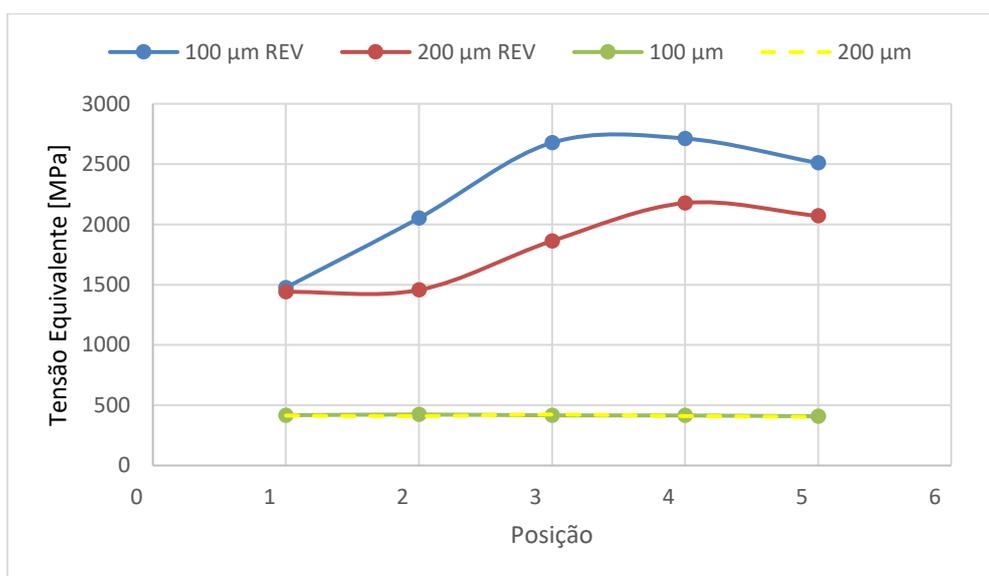
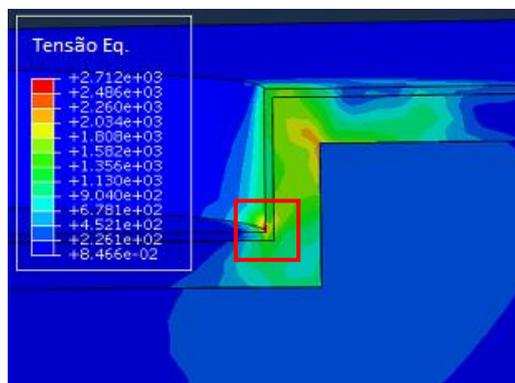


Figura 6.8 - Tensão Equivalente para as amostras texturizadas com bolsos de 100 µm e 200 µm, e para as amostras texturizadas e revestidas com bolsos de 100 µm e 200 µm de diâmetro

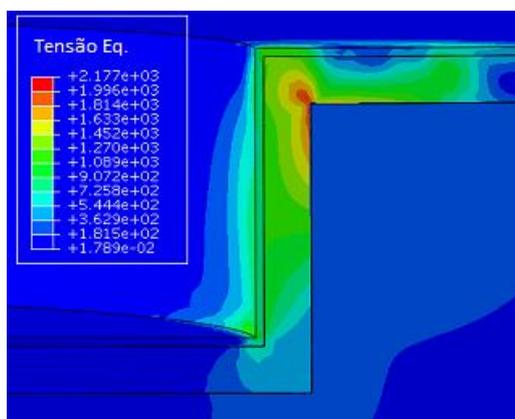
Para as superfícies somente texturizadas, não há muita influência da dimensão dos bolsos, nem das diferentes posições de indentação, devido à pequena profundidade utilizada. As amostras revestidas apresentam comportamento diferente. Nas demais posições, à medida que se aproximam da borda do bolso, pode-se notar a influência da descontinuidade da geometria devido à presença da texturização. Os valores das tensões aumentam até declinarem um pouco na borda do bolso.

Observa-se também que os valores dessas tensões são relativamente maiores para os bolsos de 100 µm de diâmetro e 10 µm de profundidade, visto que a área de superfície lisa entre os bolsos é menor, o que causa maior influência dos bolsos no comportamento da superfície. A pequena profundidade do bolso também resulta em

grandes tensões e deformações, devido à proximidade do carregamento e da área de concentração de tensão. Para os bolsos de 200 μm de diâmetro e 20 μm de profundidade, isso não ocorre pois há uma distância maior entre o ponto de carregamento e a concentração de tensão no fundo do bolso, conforme Fig.6.9.



(a)



(b)

Figura 6.9 - Tensão Equivalente [MPa] para a amostra texturizada e revestida na posição 1/16 (a) com bolso de 100 μm de diâmetro e 10 μm de profundidade (b) com bolso de 200 μm de diâmetro e 20 μm de profundidade, na situação de carregamento

Em relação à posição dos maiores valores das tensões nas camadas de revestimento, nota-se que para a texturização com bolsos de 100 μm de diâmetro há uma predominância dos maiores valores ocorrerem na camada de DLC, o que não é interessante, visto que a camada é frágil e pode ocorrer deslocamento. Para os bolsos de 200 μm , os máximos valores de tensão ocorrem na camada de CrN (Fig. 6.10), o que é mais interessante, visto que essa camada é utilizada para dar suporte mecânico ao componente. Na posição da borda ocorre o valor máximo de tensão na camada de DLC porque o contato ocorre diretamente no canto vivo do bolso, gerando concentração de tensão no local.

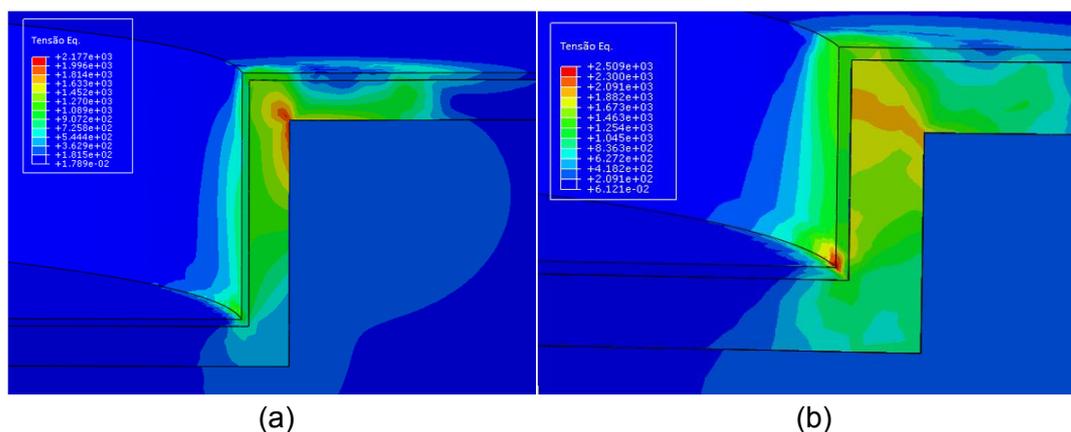


Figura 6.10 - Tensão equivalente [MPa] para a amostra texturizada e revestida (a) com bolso de 200 µm de diâmetro, na posição 1/16 e (b) com bolso de 100 µm de diâmetro, na posição da borda, na situação de carregamento

6.4.2. Deformação Plástica Equivalente

Analisando a deformação plástica equivalente no substrato de aço, observa-se que para as amostras texturizadas e revestidas o comportamento é bastante similar, diferindo-se substancialmente apenas em uma posição, conforme Fig. 6.11. O valor maior é correspondente à textura com bolsos de 100 µm, que para esta posição também apresenta valores de tensão superiores à textura de 200 µm, devido a maior influência da descontinuidade da superfície causada pela geometria dos bolsos.

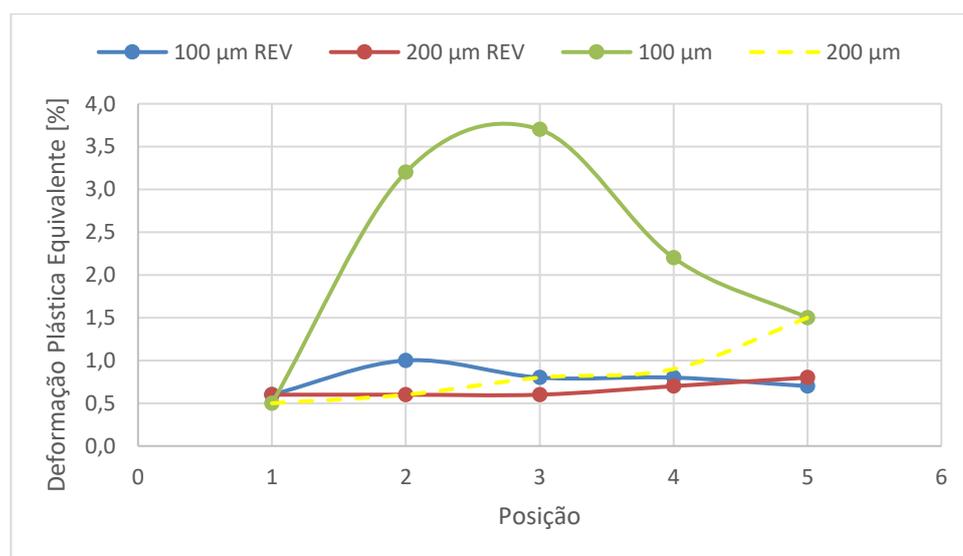


Figura 6.11 - Deformação Plástica Equivalente para as amostras texturizadas com bolsos de 100 µm e 200 µm, e para as amostras texturizadas e revestidas com bolsos de 100 µm e 200 µm de diâmetro

Para as amostras texturizadas e não revestidas, para o padrão com bolsos de 100 μm , percebe-se um comportamento de deformação plástica significativamente superior aos demais. Esses elevados valores são consequência da maior influência da textura no comportamento da deformação, assim como ocorre para os valores de tensão, visto que para essa configuração, a área entre os bolsos é menor, comparada à textura com bolsos de 200 μm de diâmetro. Essa maior proximidade entre os bolsos e sua pequena profundidade, a distância entre o carregamento e a área de concentração de tensão é menor, gerando grandes tensões e deformações.

Estes resultados mostram que o revestimento protege o substrato de aço contra a deformação plástica também nos casos de componentes texturizados. As deformações plásticas equivalentes dos componentes revestidos são, em sua maioria, menores do que as deformações nos componentes sem revestimentos.

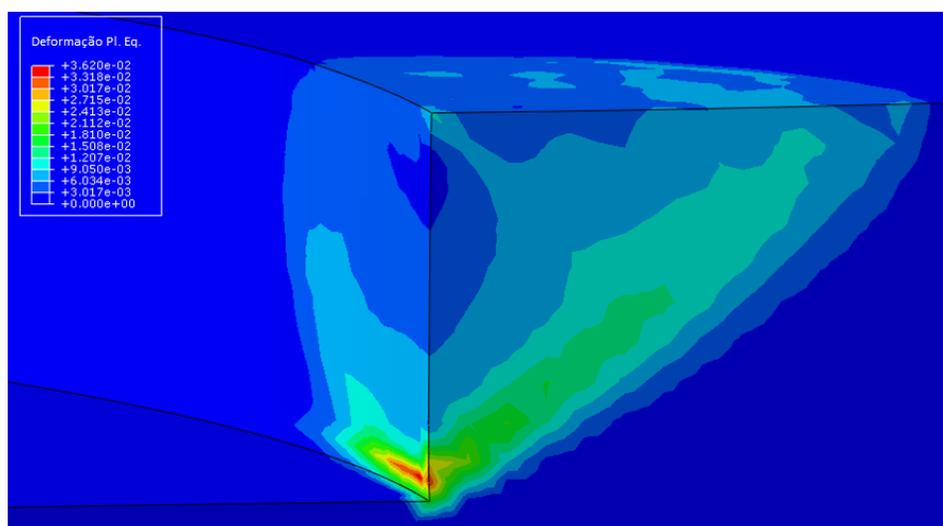


Figura 6.12 - Deformação Plástica Equivalente para a amostra texturizada com bolsos de 100 μm , na posição 1/8, na situação de carregamento

6.4.3. Máxima Tensão Cisalhante

A tensão cisalhante, quando ocorre nas interfaces, tende a provocar deslocamento de material. Dessa forma, é interessante que ela ocorra na camada de CrN (que apresenta maior capacidade de absorver deformações), e o mais longe possível das interfaces (Fig.6.13). Esta condição foi atingida por FELICE-NETO (2012) com a utilização das espessuras de camadas utilizadas neste trabalho.

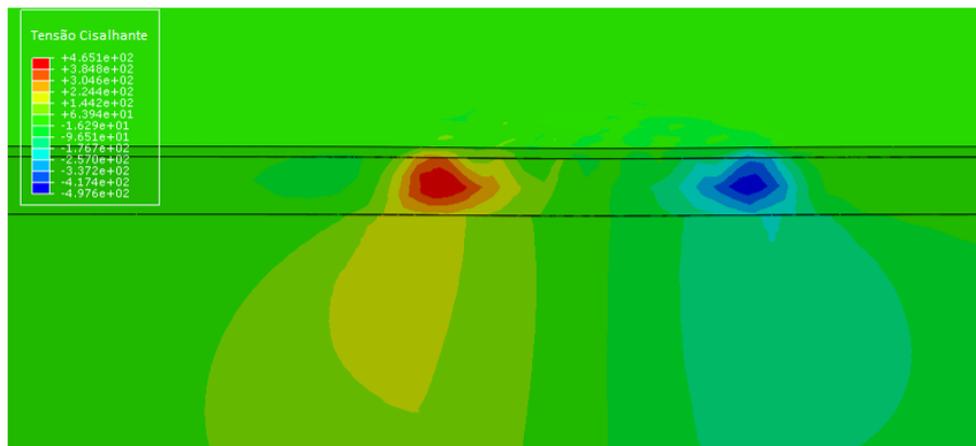


Figura 6.13 - Máxima Tensão Cisalhante para a amostra texturizada e revestida com bolsos de 200 μm , na posição 1/8, na situação de descarregamento

Para a máxima tensão cisalhante, o comportamento é similar ao verificado para a tensão equivalente, conforme Fig. 6.13. De acordo com as simulações realizadas, para garantir esse mesmo comportamento com a superfície texturizada e revestida, deve-se utilizar bolsos com diâmetro de 200 μm , que além de manterem os valores máximos na camada de CrN, estes valores são inferiores aos obtidos para o padrão de texturização com os bolsos de 100 μm de diâmetro, como pode ser observado na Fig. 6.14.

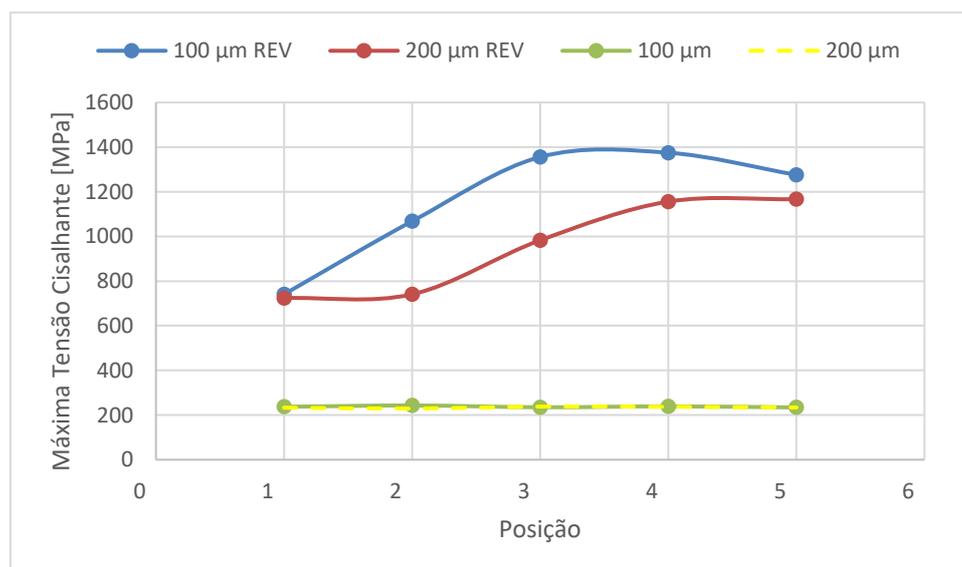


Figura 6.14 - Máxima Tensão Cisalhante para as amostras texturizadas com bolsos de 100 μm e 200 μm , e para as amostras texturizadas e revestidas com bolsos de 100 μm e 200 μm de diâmetro

6.4.4 Máxima Tensão de Tração

As máximas tensões de tração são críticas, pois elas são responsáveis pelo surgimento de trincas nos componentes. Nas simulações realizadas, as máximas tensões de tração apareceram na interface entre a camada de CrN e o substrato e na superfície da camada de DLC, na região justamente após o contato entre o indentador e a superfície da amostra, como observado na Fig. 6.15. Essas tensões elevadas na superfície da camada de DLC são responsáveis pelo surgimento de trincas circulares superficiais nesta região. Esse comportamento foi observado também por Lara (2012) e Felice-Neto (2012).

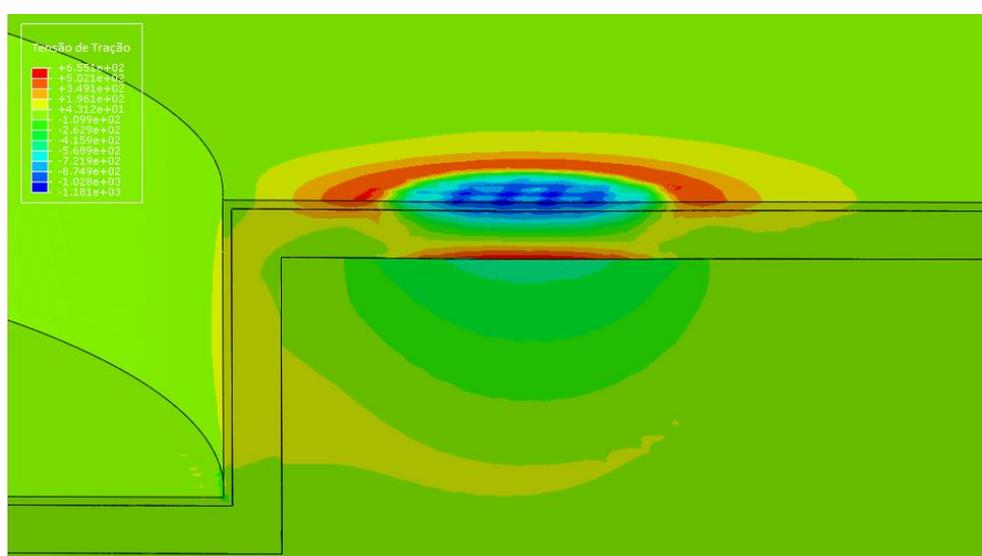


Figura 6.15 - Máxima Tensão de Tração para a amostra texturizada e revestida com bolsos 200 μm de diâmetro, na posição 1/4, na situação de carregamento

Os valores obtidos para as tensões de tração para as amostras sem a presença do revestimento foram bastante similares e apresentaram valores muito inferiores quando comparados ao obtidos para as amostras revestidas. Novamente, as amostras com bolsos de 100 μm apresentaram maiores valores de tensão para a maioria das posições, exceto para a borda do bolso, de acordo com a Fig. 6.16.

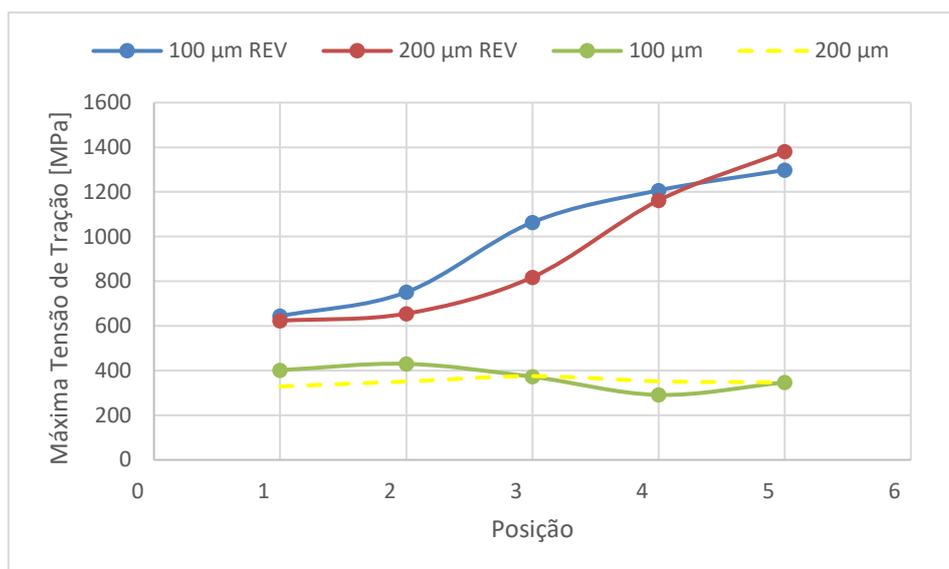


Figura 6.16 - Máxima Tensão de Tração para as amostras texturizadas com bolsos de 100 µm e 200 µm, e para as amostras texturizadas e revestidas com bolsos de 100 µm e 200 µm de diâmetro

6.5. Análises dos Resultados

Após análises dos resultados para as amostras texturizadas, observou-se que para as duas configurações de geometria, ocorreu um aumento significativo nos valores das tensões equivalentes em relação a superfície lisa. Esse aumento pode ser justificado pela descontinuidade superficial imposta na amostra, que causa uma concentração de tensão. Essa descontinuidade também justifica o aumento da deformação plástica, visto que são criadas superfícies laterais livres (bolsos), que não oferecem resistência à deformação quando são solicitadas.

Para as amostras texturizadas e revestidas, os resultados obtidos para as duas configurações de geometria nas diferentes posições, apresentam um aumento significativo nos valores de tensão, e diminuição da deformação plástica equivalente no substrato. Esse aumento nos valores de tensão é causado pela elevada rigidez do revestimento e a presença de interfaces de materiais com diferentes propriedades elásticas.

Nas novas amostras texturizadas e revestidas desenvolvidas para análises em diferentes novas posições, verificou-se que a presença da textura provoca um aumento nos valores das tensões equivalentes, máximas tensões cisalhantes e de

tração, em relação à superfície lisa texturizada. As posições das máximas tensões variam de camada, de acordo com a posição de indentação realizada, mas em sua maioria concentram-se na camada de CrN, utilizada como suporte mecânico do revestimento.

De acordo com as análises realizadas para as duas configurações de geometria de texturização, constatou-se que a configuração com bolsos de diâmetro de 200 μm e 20 μm de profundidade, apresenta os melhores resultados para os parâmetros de tensões e deformações analisados, ou seja, apresenta valores inferiores em comparação a outra configuração utilizada. Devido a maior área lisa entre os bolsos, e sua maior profundidade, que gera uma maior distância entre a aplicação do carregamento e a área de concentração de tensão no fundo do bolso, as tensões e deformações apresentam valores inferiores quando comparados com a texturização com bolsos de 100 μm de diâmetro e 10 μm de profundidade.

CAPÍTULO VII

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Este trabalho propôs analisar a influência da texturização superficial nos campos de tensão e deformação de sólidos com e sem revestimento. Primeiramente foi realizada a validação do modelo em elementos finitos, que apresentou erro inferior a 2% em relação aos dados experimentais, validando as propriedades utilizadas obtidas pelo ensaio de tração e em seguida foi desenvolvida uma metodologia de análise de tensões e deformações para sólidos texturizados com e sem revestimento.

As tensões e deformações plásticas obtidas para as superfícies texturizadas foram significativamente maiores quando comparadas aos valores apresentados para uma superfície lisa, evidenciando que apesar das vantagens que a texturização oferece, do ponto de vista tribológico, de realizar o papel de reservatório de lubrificante e aprisionamento de debris, a descontinuidade imposta na superfície do material acarreta em um aumento de tensões e deformações no contato da superfície texturizada com outra superfície esférica.

Como esperado, a inserção do revestimento nos modelos provoca aumento dos valores de tensão devido a sua elevada rigidez, e consequente diminuição da deformação plástica no substrato de aço, evidenciando que mesmo com a presença da textura, o revestimento ainda desempenha a função de proteção do substrato.

Os valores máximos de tensões ocorrem principalmente nas áreas de concentração de tensão, borda e fundo dos bolsos, dessa maneira, um meio de se evitar que as tensões atinjam valores muito elevados nestas regiões, é buscar a suavização da borda e fundo dos bolsos para minimizar as concentrações de tensão devido a geometria.

Após comparação dos resultados para as duas configurações de textura utilizadas com bolsos onde a relação diâmetro/profundidade é de 100/10 μm e 200/20 μm , mas com mesma densidade de área, observou-se que a segunda configuração apresentou o melhor comportamento para os casos analisados. Os bolsos com maiores dimensões apresentaram valores inferiores de tensões e deformações plásticas.

De modo geral, pode-se afirmar que a realização de simulações numéricas para verificação do comportamento dos campos de tensão e deformação de componentes é eficiente para a verificação de regiões críticas e determinação das áreas mais suscetíveis a falhas. Esta metodologia de análise desenvolvida pode ser utilizada também no processo de otimização da geometria da texturização, de acordo com as condições de utilização, diminuindo os custos relacionados à fabricação e testes de modelos físicos, e possibilitando a escolha do melhor padrão de geometria que apresente menores valores de tensão e deformação de acordo com sua aplicação.

7.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Após concluído o trabalho, são sugeridos alguns assuntos para realização de trabalhos futuros:

- Estudo aprofundado sobre como determinar uma relação geométrica ótima do diâmetro e profundidade dos bolsos da texturização superficial.
- Realização de simulações de uma esfera em um contato deslizante com uma superfície texturizada e revestida para analisar o efeito do movimento do indentador nos campos de tensão e deformação.
- Realização de simulações de contato deslizante de um indentador e uma superfície texturizada e revestida, na presença de lubrificação.

CAPÍTULO VIII

Referências Bibliográficas

ABAQUS/CAE. **User's Manual**. Version 6.12. Providence, USA, 2012.

AHMED, A.; MASJUKI H. H.; VARMAN, M.; KALAM M. A.; HABIBULAH, M.; AL MAHMUD, K. A. H. **An overview of geometrical parameters of surface texturing for piston/cylinder assembly and mechanical seals**. *Asperity Contacts & Lubrication Aspects*, CrossMark, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11012-015-0180-6>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6152: Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente**. Rio de Janeiro, 2002.

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. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000400014>

BARBOSA; T. P. **Características Funcionais de Implantes Dentários: Topografia Superficial e Molhabilidade**. 108 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.

BRÄNEMARK, P. I. **The Journal Prosthetic Dentistry**, v. 70, 1985.

BRAUN, D.; GREINER, C.; SCHNEIDER, J.; GUMBSCH, P. **Efficiency of laser surface texturing in the reduction of friction under mixed lubrication**. Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.04.012>

BRUZZONE, A. A. G.; COSTA, H. L.; LONARDO, P. M.; LUCCA, D. A. **Advances in engineered surfaces for functional performance**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Elsevier, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.003>

BRUZZONE, A. A. G.; COSTA, H. L. **Functional characterization of structured surfaces for tribological applications**. 8th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.09.078>

COSTA, H. L., **Modification of Surface Topography: Manufacturing Methods and Applications**. PhD Thesis. University of Cambridge, 2005.

COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M. **Development of a maskless electrochemical texturing method**. Journal of Materials Processing Technology, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.004>

COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M. **Effects of die surface patterning on lubrication in strip drawing**. University of Cambridge, Cambridge 2008.

COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M. **Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions**. Tribology International, Elsevier, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.01.014>

COSTA, H. L.; HUTCHINGS, I. M., **Some innovative surface texturing techniques for tribological purposes**. Institution of Mechanical Engineers, Journal of Engineering Tribology, 2014. <https://doi.org/10.1177/1350650114539936>

DA SILVA, J. C. **Estudo Comparativo de Superfícies de Titânio Utilizadas em Implantes**. 2006. 60 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná, 2006.

DA SILVA; L. R. R., COSTA; H. L. **Tribological Behavior of Gray Cast Iron Textured by Maskless Electrochemical Texturing.** *Wear*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.028>

DING, Q.; WANG, L.; WANG, Y.; WANG, S. C.; HU L.; XUE Q. **Improved Tribological Behavior of DLC Films Under Water Lubrication by Surface Texturing.** *Tribol Lett*, Springer, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11249-010-9730-1>

DJABELLA, H.; ARNELL R. D. **Finite element comparative study of elastic stresses in single, double layer and multi-layered coated systems.** *Thin Solid Films*, Manchester, 1993. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(93\)90259-R](https://doi.org/10.1016/0040-6090(93)90259-R)

ETSION, I. **State of the Art in Laser Surface Texturing.** Dept. of Mechanical Engineering, Technion, Haifa, Israel, 2005. <https://doi.org/10.1115/ESDA2004-58058>

FELICE NETO, F. R. **Simulação de microindentação de material multicamada pelo método dos elementos finitos.** 79 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

FRIES; T.-P., BELYTSCHKO; T. **The extended/generalized finite element method: Na overview of the method and its applications.** *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2010. <https://doi.org/10.1002/nme.2914>

GACHOT; C.,ROSENKRANZ A.,HSU; S. M., COSTA; H. L. **A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement.** *Wear*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.11.020>

GONG, Z.-Q.; KOMVOPOULOS, K. **Effect of Surface Patterning on Contact Deformation of Elastic-Plastic Layered Media.** Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, 2003.

GONG, Z.-Q.; KOMVOPOULOS, K. **Mechanical and Thermomechanical Elastic-Plastic Contact Analysis of Layered Media with Patterned Surfaces.** Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, 2004. <https://doi.org/10.1115 /1.1609487>

GROPPER, D.; WANG, L.; HARVEY, T. J. **Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings.** Tribology International, Elsevier, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.10.009>

HOLMBERG, K.; LAUKKANEN, A.; RONKAINEN, H.; WALLIN, K.; VARJUS, S.; KOSKINEN, J. **Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface - Part I: Modelling stresses and strains.** Surface & Coatings Technology, Elsevier, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.03.042>

HOLMBERG, Kenneth; MATTHEWS, Allan. **Coatings Tribology - Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering.** Amsterdam: Elsevier, 2009.

HUTCHINGS, I. M., **Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials.** London: Arnold, 1992. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(92\)90241-9](https://doi.org/10.1016/0261-3069(92)90241-9)

ISO 14577-1. **Metallic Materials - Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters - Part 1: Test Method.** International Organization for Standardization, 2008.

JACOBSON, S.; HOGMARK, S. **Surface modifications in tribological contacts.** Wear, Elsevier, 2008.

LAMRAOUI, A.; COSTIL, S.; LANGLADE, C.; CODDET, C. **Laser surface texturing (LST) treatment before thermal spraying: A new process to improve the substrate-coating adherence.** Surface & Coatings Technology, Elsevier, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.07.044>

LARA, L. O. C. **Otimização de tribo revestimentos multifuncionais: uma abordagem experimental/computacional.** 171 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

LARA, L. O. C.; DE MELLO, J. D. B. **Influence of layer thickness on hardness and scratch resistance of Si-DLC/CrN coatings.** Tribology (Leeds. Print), 2012. <https://doi.org/10.1179/1751584X12Y.0000000019>

PARREIRA; J. G., GALLO, C. A., COSTA; H. L. **New advances on maskless electrochemical texturing (MECT) for tribological purposes**. Surface & Coatings Technology, Elsevier, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.08.043>

PFLEGING, W.; KUMARI, R.; BESSER, H.; SCHARNWEBER, T.; MAJUMDAR, J. D. **Laser surface textured titanium alloy (Ti-6Al-4V) - Part I - Surface characterization**. Applied Surface Science, Elsevier, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.255>

PETTERSON, U.; JACOBSON, S. **Friction and wear properties of micro textured DLC coated surfaces in boundary lubricated sliding**. Tribology Letters, Uppsala, Sweden, 2004. <https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000044504.76164.4e>

RAMOS NETO, F. F.; FILHO, B. G. S.; PAES, M. T. P.; FRANCO, S. D. **Gradientes de Propriedades Mecânicas em Estruturas de Condução de Petróleo**. In: 14º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

ULLNER; C., REIMANN; E., KOHLHOFF; H., SUBARIC-LEITIS; A. **Effect and measurement of the machine compliance in the macro range of instrumented indentation test**. Measurement, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.09.009>

VLADESCU, S-C.; OLVER, A. V.; PEGG, I. G.; REDDYHOFF, T. **The effects of surface texture in reciprocating contacts – An experimental study**. Tribology International, Elsevier, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.09.015>

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