

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Tese de Doutorado

**“Desgaste de Aços AISI H13 recobertos com Filmes Finos Ternários
 $Ti_{1-x}Al_xN$ com Diferentes Estruturas Cristalinas”.**

Autora : Janaína Kizzi de Moraes Silva
Orientadora : Prof^a Geralda Cristina Durães de Godoy

Junho /2008

Janaína Kizzi de Moraes Silva

**“Desgaste de Aços AISI H13 recobertos com Filmes Finos Ternários
 $Ti_{1-x}Al_xN$ com Diferentes Estruturas Cristalinas”.**

**Tese de Doutorado apresentada ao
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de
Minas da Universidade Federal de Minas Gerais**

**Área de Concentração : Ciência e Engenharia de Materiais
Orientadora : Prof^ª Geralda Cristina Durães de Godoy**

**Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG**

2008

AGRADECIMENTOS

Ao constante apoio da minha tia, padrinho, Gê, Flávio, Dani, toda a família e amigos;

Ao amor, apoio e companheirismo do Thiago;

À Prof^a Geralda Cristina Durães de Godoy, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, pela orientação;

Aos colegas do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG: Rafael Mancosu, Alan, Ricardo, André Ferreira e Cruz, Bernardo, Eustáquio, Thiagos, Hugo, Marília e demais alunos de Iniciação Científica;

Aos professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, Vicente Bueno e Dagoberto Brandão;

À professora Vanessa Lins, do Departamento de Engenharia Química da UFMG;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, Patrícia, Andréia, Cida, Nelson, Dona Efigênia e Vicente;

Aos funcionários do CDTN, Mônica, Célia e Wagner.

RESUMO

A maior parte das falhas de ferramentas origina-se no fenômeno desgaste, cujo controle ocorre principalmente por avaliações das taxas de desgaste. A maioria dos ensaios experimentais utiliza a variação de massa por tempo para avaliar a taxa de desgaste, considerando a densidade do material. A partir da densidade do material, estima-se o volume desgastado. Como um material compósito apresenta diferença de densidade, a aplicação desta metodologia para estimar o volume, torna-se imprecisa. O uso da perfilometria tridimensional possibilita a avaliação direta do volume desgastado de materiais conjugados.

O desempenho de ferramentas para trabalho a quente tem sido otimizado através de filmes como o $Ti_{1-x}Al_xN$, que são aplicados contra o desgaste da ferramenta. O teor de alumínio do filme interfere em sua estrutura cristalina, na dureza e módulo de elasticidade dos conjugados, influenciando a resistência ao desgaste.

Este estudo consistiu na elaboração de uma metodologia através da perfilometria para estimar o volume e assim, avaliar a taxa de desgaste por deslizamento de conjugados $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13 não temperado e $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13 temperado e revenido, processados por PAPVD. Foi avaliada a influência do teor de alumínio do filme (estrutura cristalina), no seu desempenho em desgaste por deslizamento. Realizou-se testes de desgaste contra esferas de Si_3N_4 e WC-Co, utilizando o tribômetro “Esfera sobre Disco”, sendo a taxa (volume/ distância) obtida a partir do volume estimado por uma metodologia que utilizou a perfilometria tridimensional. A elaboração desta metodologia e a avaliação da relação entre estrutura e propriedade constituem relevâncias deste trabalho.

O trabalho demonstrou que filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ com ambas as estruturas cristalinas protegeram o aço H13 contra o desgaste. Os tratamentos térmicos e têmpera e revenimento melhoraram o desempenho do aço H13 em desgaste. Os conjugados que apresentaram maior dureza (influenciada pela estrutura cristalina do filme) e maior razão H/E, obtiveram o melhor desempenho em desgaste.

PALAVRAS CHAVE: Perfilometria, desgaste, filmes $Ti_{1-x}Al_xN$.

ABSTRACT

Wear phenomena is the most common cause of the industrial materials failures. The wear control is primary provided through of the wear rates evaluation. The experimental studies use the weight loss for time to evaluate the wear rate. This procedure is based in material density. An estimate of wear volume is made through of the material density. Whit respect to compound material, this procedure is not accuracy, because this material have density gradient. Because of the direct evaluation of the material volume, the three-dimensional profilometry with wear and machining is a new approach. The profilometry provides the direct evaluation of the wear volume of coupled materials.

The performance of the hot tools for work has been optimized through films deposited by PVD, such as $Ti_{1-x}Al_xN$ that is applied against the wear of the tool. The content of aluminum of the film affects its crystalline structure and hardness. This factor influences the wear resistance.

This study created a methodology through profilometry to estimate the wear volume and evaluate the sliding wear rate of the coatings $Ti_{1-x}Al_xN$ processed by PVD on AISI H13 without treatment and AISI H13 quenched and tempered and evaluate the influence of the aluminium content (crystalline structure) present in films, in the sliding wear. For this, sliding wear tests against Si_3N_4 and WC-Co balls were carried out using a “ball-on-disc” tribometer. The wear rate (volume/sliding distance) was estimated by three-dimensional profilometry. This methodology and the relation between structure and properties were important facts of this work.

This work indicated that $Ti_{1-x}Al_xN$ films with both structures improved the wear performance of the H13 steel. The treatments of the quenched and tempered showed superior wear resistance of the H13 steel. The compound material with highest hardness (resulted of crystalline structure) and highest H/E, showed best wear performance.

KEYWORDS: Profilometry, wear, $Ti_{1-x}Al_xN$ films.

SUMÁRIO

Resumo	i
Abstract	ii
Lista de figuras	vi
Lista de tabelas	xix
Lista de notações	xxiii
CAPÍTULO 1 : INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 : OBJETIVO	5
CAPÍTULO 3 : REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 Desgaste por deslizamento.....	6
3.2 Recobrimentos depositados por PVD.....	12
3.2.1 Recobrimentos $Ti_{1-x}Al_xN$	13
3.3 Ferramentas para usinagem.....	15
3.3.1 Aço ferramenta H13.....	16
3.4 Ferramentas revestidas pelo filme $Ti_{1-x}Al_xN$	18
CAPÍTULO 4: METODOLOGIA	20
4.1 Produção dos conjugados.....	20

4.2 Difração de raios X (DRX)	21
4.3 Teste de adesão Rockwell C.....	21
4.4 Espectroscopia de Emissão Óptica por Centelhamento.....	23
4.5 Ensaio de Penetração Instrumentada.....	23
4.6 Ensaio de desgaste por Deslizamento.....	26
4.7 Perfilometria após o desgaste.....	28
4.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	50
4.8.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) antes do desgaste.....	50
4.8.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) após o desgaste.....	51
CAPÍTULO 5 : RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
5.1 Difração de raios X (DRX).....	52
5.2 Teste de adesão Rockwell C.....	57
5.3 Espectroscopia de Emissão Óptica por Centelhamento.....	71
5.4 Ensaio de Penetração Instrumentada	74
5.4.1 Determinação da dureza e do módulo de elasticidade dos sistemas.....	74
5.4.2 Comparação entre os valores de dureza obtidos para os sistemas.....	80
5.4.3 Valores de H/E obtidos para os sistemas.....	82
5.5 Perfilometria após o desgaste.....	84
5.5.1 Perfilometria após o desgaste contra Si ₃ N ₄	84
5.5.1.1 Aço H13 não temperado e seus conjugados.....	84
5.5.1.2 Aço H13 temperado e revenido e seus conjugados.....	109
5.5.1.3 Comparação entre o desgaste dos sistemas do aço H13 não temperado e do aço H13 temperado e revenido.....	134
5.5.2 Perfilometria após o desgaste contra WC-Co.....	136
5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) antes do desgaste.....	144
5.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) após o desgaste.....	146

5.7.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) após o desgaste contra Si ₃ N ₄	146
5.7.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) após o desgaste contra WC-Co.....	153
CAPÍTULO 6 : CONCLUSÕES.....	157
CAPÍTULO 7 : SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	159
CAPÍTULO 8: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	160

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Estrutura cristalina dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$	14
Figura 3.2 - Dependência da dureza e do módulo de elasticidade dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ em função do conteúdo de alumínio a uma carga de indentação de 3mN.....	15
Figura 4.1 – Morfologias de falhas obtidas no teste de adesão Rockwell C.....	22
Figura 4.2- Tribômetro Esfera sobre Disco da Microphotonics.....	28
Figura 4.3- Imagem tridimensional de uma área contendo o traço de desgaste, obtida após as varreduras.....	29
Figura 4.4 - Uso de recursos para a remoção de forma da superfície.....	29
Figura 4.5- Demonstração da remoção de forma.....	30
Figura 4.6 - Superfície resultante após a remoção de forma.....	30
Figura 4.7 - Uso de recursos para a inversão da superfície.....	31
Figura 4.8 - Demonstração da inversão da superfície.....	32
Figura 4.9- Superfície resultante após a inversão do perfil em relação ao eixo z.....	32

Figura 4.10- Uso de recursos para a distribuição da densidade de picos.....	33
Figura 4.11- Histograma de densidade de picos em uma superfície tridimensional.....	34
Figura 4.12- Uso de recursos para a realização do corte que delimita o traço de desgaste..	35
Figura 4.13- Demonstração do corte que delimita o traço de desgaste.....	35
Figura 4.14- Imagem resultante após o corte que delimita o traço de desgaste.....	36
Figura 4.15- Uso dos recursos para o retorno da superfície à posição inicial.....	37
Figura 4.16- Demonstração do retorno da superfície invertida à posição inicial.....	37
Figura 4.17- Superfície resultante após a inversão para o retorno à posição inicial.....	38
Figura 4.18- Uso de recursos para a realização do segundo corte.....	38
Figura 4.19- Demonstração do segundo corte para delimitar o traço de desgaste.....	39
Figura 4.20- Perfil resultante após segundo corte que delimita o traço de desgaste.....	39
Figura 4.21 - Uso de recursos para excluir picos e vales localizados fora do traço de desgaste.....	40
Figura 4.22 – Escolha da região de exclusão de picos e vales externa ao traço de desgaste, em relação à altura máxima da superfície.....	41
Figura 4.23- Demonstração da exclusão de picos e vales na região externa ao traço de desgaste.....	41

Figura 4.24- Demonstração do avanço da exclusão de picos e vales na região externa ao traço de desgaste.....	42
Figura 4.25- Demonstração da exclusão de picos e vales na região interna ao traço de desgaste.....	42
Figura 4.26- Demonstração do avanço da exclusão de picos e vales na região interna ao traço de desgaste.....	43
Figura 4.27- Demonstração do perfil final após a exclusão das irregularidades fora do traço de desgaste.....	43
Figura 4.28- Perfil resultante após e exclusão das irregularidades existentes fora do traço de desgaste.....	44
Figura 4.29- Ilustração do método do “Plano de Mínimos Quadrados”	45
Figura 4.30- Uso de recursos para a estimativa do volume de desgaste.....	45
Figura 4.31- Demonstração da superfície utilizada para estimar o volume de desgaste.....	46
Figura 4.32- Seleção da superfície utilizada para estimar o volume de desgaste.....	46
Figura 4.33- Obtenção do volume de desgaste.....	47
Figura 4.34- Uso do recurso de distância de medição.....	48

Figura 4.35- Determinação da largura do traço de desgaste.....	49
Figura 4.36- Segunda determinação da largura do traço de desgaste.....	49
Figura 4.37- Estimativa e confirmação do diâmetro do traço de desgaste.....	50
Figura 5.1- Difratoograma do aço AISI H13 temperado e revenido.....	52
Figura 5.2 - Difratoograma do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13 temperado e revenido..	53
Figura 5.3- Difratoograma do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13 temperado e revenido...	53
Figura 5.4 - Difratoograma do aço AISI H13 não temperado.....	54
Figura 5.5- Difratoograma do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13 não temperado.....	54
Figura 5.6- Difratoograma do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13 não temperado.....	55
Figura 5.7- Imagens de microscopia óptica dos testes de adesão Rockwell C dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ em AISI H13 não temperado. 150 Kgf (100X) a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13 e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13.....	57
Figura 5.8- Imagens de microscopia óptica dos testes de adesão Rockwell C dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ em AISI H13 temperado e revenido. 150 Kgf (100X) a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13 e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13.....	58

Figura 5.9 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado. 62,5Kgf (70X).....	60
Figura 5.10 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado. 100Kgf (60X).....	61
Figura 5.11 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado.150Kgf (45X).....	62
Figura 5.12 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido. 62,5Kgf (100X).....	63
Figura 5.13 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido. 62,5 Kgf (170X).....	64
Figura 5.14 – Imagem de MEV do teste de adesão Rockwell C do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido (demonstração das trincas radiais). 62,5 Kgf (500X).....	65
Figura 5.15 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido. 100 Kgf (100X).....	66
Figura 5.16 – Imagem de MEV do teste de adesão Rockwell C do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido (demonstração das trincas radiais). 100 Kgf (500X).....	67
Figura 5.17 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido. 150 Kgf (100X).....	68

Figura 5.18 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido. 150 Kgf (500X).....	69
Figura 5.19- Variação da composição com a profundidade para o conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado.....	71
Figura 5.20- Variação da composição com a profundidade para o conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado.....	71
Figura 5.21- Variação da composição com a profundidade para o conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado.....	72
Figura 5.22- Variação da composição com a profundidade para o conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado.....	72
Figura 5.23- Superfície após remoção de forma do aço H13 não temperado.....	85
Figura 5.24- Superfície após remoção de forma do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ /H13 não temperado (filme CFC).....	85
Figura 5.25- Superfície após remoção de forma do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$ /H13 não temperado (filme bifásico).....	86
Figura 5.26- Superfície invertida do aço H13 não temperado.....	87

Figura 5.27- Superfície invertida do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme CFC).....	87
Figura 5.28- Superfície invertida do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme bifásico).....	88
Figura 5.29- Histograma de densidade de picos da superfície invertida do aço H13 não temperado.....	88
Figura 5.30- Histograma de densidade de picos da superfície invertida do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme CFC).....	89
Figura 5.31- Histograma de densidade de picos da superfície invertida do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme bifásico).....	89
Figura 5.32- Superfície invertida após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do aço H13 não temperado.....	90
Figura 5.33- Superfície invertida após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme CFC).....	91
Figura 5.34- Superfície invertida após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme bifásico).....	91
Figura 5.35- Superfície sem inversão (retorno à posição inicial) após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do aço H13 não temperado.....	92
Figura 5.36- Superfície sem inversão (retorno à posição inicial) após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme CFC).....	92

Figura 5.37- Superfície sem inversão (retorno à posição inicial) após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme bifásico).....	93
Figura 5.38- Superfície sem inversão após o corte para excluir os picos mais altos do aço H13 não temperado.....	94
Figura 5.39- Superfície sem inversão após o corte para excluir os picos mais altos do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme CFC).....	94
Figura 5.40- Superfície sem inversão após o corte para excluir os picos mais altos do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme bifásico).....	95
Figura 5.41- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do aço H13 não temperado..	96
Figura 5.42- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme CFC).....	96
Figura 5.43- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme bifásico).....	97
Figura 5.44- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do aço H13 não temperado.....	98
Figura 5.45- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme CFC).....	98
Figura 5.46- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme bifásico).....	99

Figura 5.47- Demonstração da determinação da largura do traço de desgaste da superfície do aço H13 não temperado.....	101
Figura 5.48- Demonstração da determinação da largura do traço de desgaste da superfície do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme CFC).....	101
Figura 5.49- Demonstração da determinação da largura do traço de desgaste Da superfície do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme bifásico).....	102
Figura 5.50- Demonstração da determinação do diâmetro do traço de desgaste da superfície do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme bifásico).....	104
Figura 5.51- Superfície após remoção de forma do aço H13 temperado e revenido.....	110
Figura 5.52 – Superfície após remoção de forma do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme bifásico).....	111
Figura 5.53- Superfície após remoção de forma do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme hexagonal).....	111
Figura 5.54- Superfície invertida do aço H13 temperado e revenido.....	112
Figura 5.55- Superfície invertida do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme bifásico).....	113
Figura 5.56- Superfície invertida do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme hexagonal).....	113

Figura 5.57- Histograma de densidade de picos da superfície invertida do aço H13 temperado e revenido.....	114
Figura 5.58- Histograma de densidade de picos da superfície invertida do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme bifásico).....	114
Figura 5.59- Histograma de densidade de picos da superfície invertida do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme hexagonal).....	115
Figura 5.60- Superfície invertida após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do aço H13 temperado e revenido.....	116
Figura 5.61- Superfície invertida após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme bifásico).....	116
Figura 5.62- Superfície invertida após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme hexagonal).....	117
Figura 5.63- Superfície sem inversão (retorno à posição inicial) após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do aço H13 temperado e revenido.....	117
Figura 5.64- Superfície sem inversão (retorno à posição inicial) após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme bifásico).....	118
Figura 5.65- Superfície sem inversão (retorno à posição inicial) após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme hexagonal).....	118

Figura 5.66- Superfície sem inversão após o corte para excluir os picos mais altos do aço H13 temperado e revenido.....	119
Figura 5.67- Superfície sem inversão após o corte para excluir os picos mais altos do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme bifásico).....	120
Figura 5.68- Superfície sem inversão após o corte para excluir os picos mais altos do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme hexagonal).....	120
Figura 5.69- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do aço H13 temperado e revenido.....	121
Figura 5.70- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme bifásico).....	122
Figura 5.71- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme hexagonal).....	122
Figura 5.72- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do aço H13 temperado e revenido.....	123
Figura 5.73- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme bifásico).....	124
Figura 5.74- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme hexagonal).....	124
Figura 5.75- Demonstração da determinação da largura do traço de desgaste da superfície do aço H13 temperado e revenido.....	126

Figura 5.76- Demonstração da determinação da largura do traço de desgaste da superfície do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme bifásico).....	126
Figura 5.77- Demonstração da determinação da largura do traço de desgaste da superfície do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme hexagonal).....	127
Figura 5.78- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do aço H13 não temperado após desgaste contra WC-Co.....	137
Figura 5.79- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado após desgaste contra WC-Co (filme CFC).....	138
Figura 5.80- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado após desgaste contra WC-Co (filme bifásico).....	138
Figura 5.81- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do aço H13 não temperado após desgaste contra WC-Co.....	139
Figura 5.82- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado após desgaste contra WC-Co (filme CFC).....	139
Figura 5.83- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado após desgaste contra WC-Co (filme bifásico).....	140
Figura 5.84- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 não temperado após o desgaste contra Si_3N_4 (100X)- Elemento Al. a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme CFC) e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme bifásico).....	147

Figura 5.85- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 não temperado após o desgaste contra Si_3N_4 (100X)- Elemento Fe. a) BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme CFC) e b) AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme bifásico).....148

Figura 5.86- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 não temperado após o desgaste contra Si_3N_4 (100X)- Elemento Si. a) BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme CFC) e b) AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme bifásico).....149

Figura 5.87- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 temperado após o desgaste contra Si_3N_4 (100X)- Elemento Al. a) BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme bifásico) e b) AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme hexagonal)150

Figura 5.88- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 temperado após o desgaste contra Si_3N_4 (100X)- Elemento Fe. a) BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme bifásico) e b) AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme hexagonal).....151

Figura 5.89- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 temperado após o desgaste contra Si_3N_4 (100X)- Elemento Si. a) BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme bifásico) e b) AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme hexagonal).....152

Figura 5.90- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 não temperado após o desgaste contra WC-Co (100X)- Elemento Al. a) BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme CFC) e b) AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme bifásico).....154

Figura 5.91- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 não temperado após o desgaste contra WC-Co (100X)- Elemento Fe. a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme CFC) e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme bifásico).....155

Figura 5.92- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 não temperado após o desgaste contra WC-Co (100X)- Elemento W. a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme CFC) e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme bifásico).....156

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 - Classificação dos aços ferramenta.....	17
Tabela III.2 - Composição química nominal do aço H13.....	18
Tabela IV.1 – Durezas de esferas abrasivas.....	27
Tabela V.1- Valores de dureza do substrato H13 não temperado e seus conjugados $Ti_{1-x}Al_xN$	78
Tabela V.2-Valores de dureza do substrato H13 temperado e revenido e seus conjugados $Ti_{1-x}Al_xN$	78
Tabela V.3- Valores de módulos de elasticidade do substrato H13 não temperado e seus conjugados.....	79
Tabela V.4-Valores de módulos de elasticidade do substrato H13 temperado e revenido e seus conjugados.....	79
Tabela V.5- Comparação entre as durezas a 1900 mN para o aço H13 temperado e revenido e seus conjugados.....	80
Tabela V.6- Comparação entre as durezas a 32 mN dos conjugados do aço temperado e revenido.....	80

Tabela V.7- Comparação entre as durezas a 1900 mN para o aço H13 não temperado e seus conjugados.....	81
Tabela V.8- Comparação entre as durezas a 32 mN dos conjugados do aço não temperado.....	81
Tabela V.9- Razão H/E do aço não temperado e seus conjugados.....	83
Tabela V.10 Razão H/E do aço temperado e revenido e seus conjugados.....	83
Tabela V.11- Volumes de desgaste estimados por perfilometria para os sistemas do aço H13 não temperado.....	100
Tabela V.12 - Estimativa da largura do traço de desgaste dos sistemas do aço H13 não temperado.....	103
Tabela V.13 - Volumes de desgaste estimados do procedimento da Norma ASTM G 99-05 para os sistemas do aço H13 não temperado.....	105
Tabela V.14- Comparação entre os procedimentos de perfilometria e da Norma ASTM G 99-05 na determinação dos volumes de desgaste dos sistemas do aço não temperado.....	106
Tabela V.15- Taxa e coeficientes de desgaste do aço H13 não temperado e seus conjugados.....	108
Tabela V.16- Resistência ao desgaste do aço H13 não temperado e seus conjugados.....	116
Tabela V.17- Volumes de desgaste estimados por perfilometria para os sistemas do aço H13 temperado e revenido.....	125

Tabela V.18- Estimativa da largura do traço de desgaste dos sistemas do aço H13 temperado e revenido.....	128
Tabela V.19- Volumes de desgaste estimados do procedimento da Norma ASTM G 99-05 para os sistemas do aço H13 temperado e revenido.....	129
Tabela V.20- Comparação entre os procedimentos de perfilometria e da Norma ASTM G 99-05 na determinação dos volumes de desgaste dos sistemas do aço temperado e revenido.....	130
Tabela V.21 - Taxa e coeficientes de desgaste do aço H13 temperado e revenido e seus conjugados.....	132
Tabela V.22- Resistência ao desgaste do aço H13 temperado e revenido e seus conjugados.....	133
Tabela V.23- Tabela comparativa entre a taxa e coeficiente de desgaste dimensional dos sistemas dos aços H13 temperado e revenido e H13 não temperado.....	135
Tabela V.24 - Volumes de desgaste estimados por perfilometria para os sistemas do aço H13 não temperado após desgaste contra WC-Co.....	141
Tabela V.25- Taxa e coeficientes de desgaste do aço H13 não temperado e seus conjugados após desgaste contra WC-Co.....	142
Tabela V.26- Resistência ao desgaste do aço H13 não temperado e seus conjugados contra WC-Co.....	143
Tabela V.27 – Composição química da região 1 dos conjugados BA $Ti_{1-x}Al_xN$ e AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado (considerando-se 50% atômico do filme).....	144

Tabela V.28 – Composição química da região 2 dos conjugados BA $Ti_{1-x}Al_xN$ e AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado (considerando-se 50% atômico do filme).....144

Tabela V.29 – Composição química da região 1 dos conjugados BA $Ti_{1-x}Al_xN$ e AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido (considerando-se 50% atômico do filme).....145

Tabela V.30 – Composição química da região 2 dos conjugados BA $Ti_{1-x}Al_xN$ e AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido (considerando-se 50% atômico do filme).....145

LISTA DE NOTAÇÕES

α_1	Constante empírica relacionada á geometria do indentador
1/k	Resistência ao desgaste
μ	Coefficiente de atrito
AA $Ti_{1-x}Al_xN$	Nitreto de alumínio e titânio com alto teor de alumínio
Al_2O_3	Óxido de alumínio
BA $Ti_{1-x}Al_xN$	Nitreto de alumínio e titânio com baixo teor de alumínio
C	Comprimento da trinca radial
CCC	Cubo de corpo centrado
CFC	Cubo de face centrada
$Cr_{1-x}Al_xN$	Nitreto de cromo e alumínio
Cr-N	Nitreto de cromo
DRX	Difração de raios-X
e	Largura do traço de desgaste
E	Módulo de elasticidade
H	Dureza do material
k	Coefficiente dimensional de desgaste
K	Coefficiente adimensional de desgaste
Kc	Tenacidade do material
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
P	Carga de indentação ou carga aplicada
PVD	Deposição Física de Vapor
PAPVD	Deposição Física de Vapor Assistida por Plasma
Q	Taxa de desgaste
r	Raio do contra-corpo esférico
R	Raio do traço de desgaste
S	Comprimento desgastado
Si_3N_4	Nitreto de silício

S_k	rugosidade do núcleo
S_{pk}	Altura reduzida dos picos
S_{vk}	Profundidade reduzida dos vales
t	Tempo de contato
$Ti_{1-x}Al_xN$	Nitreto de alumínio e titânio
$Ti_{1-x}C_xN$	Carbonitreto de titânio
TiN	Nitreto de titânio
V	Volume desgastado
W	Carga normal total aplicada
w	Dimensão linear da superfície desgastada
$WC-Co$	Carbeto de tungstênio e cobalto (metal duro)

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Muitas falhas dos componentes industriais originam-se no fenômeno de desgaste, que consiste na remoção de material de superfícies sólidas, que resulta do contato de uma superfície em movimento em relação à outra (HUTCHINGS, 1992).

O desenvolvimento de recobrimentos tribológicos objetiva aumentar a vida útil (diminuir o atrito e o desgaste) de materiais utilizados em ferramentas de corte, engrenagens, componentes de motor, bombas hidráulicas e compressores, além de reduzir custos. Ganhos significativos em produtividade são obtidos com ferramentas recobertas, pois os componentes de precisão funcionam por mais tempo e com mais segurança.

O controle do desgaste ocorre geralmente por avaliação da textura da superfície após o desgaste e por avaliações das taxas de desgaste. Duas definições de taxas de desgaste são em geral utilizadas na tentativa de avaliar quantitativamente o desgaste: uma primeira, a taxa de desgaste Q , que é obtida a partir da determinação do volume de material removido por desgaste por unidade de distância de escorregamento e é dada por mm^3/m (HUTCHINGS, 1992); e uma segunda definição, a taxa de desgaste k , dada em unidades de $\text{mm}^3 (\text{Nm})^{-1}$, que representa o volume desgastado por unidade de distância (m), por unidade de carga normal (N). Ambas as taxas são parâmetros que dependem da determinação do volume desgastado.

A maioria dos ensaios experimentais utiliza a determinação de variação de massa por unidade de tempo para avaliar a taxa de desgaste, considerando a densidade do material e uma velocidade constante. A partir da densidade do material, pode-se estimar o volume desgastado. A comparação de resposta de diferentes materiais em relação ao desgaste, neste tipo de experimento, deve considerar as densidades diferenciadas de cada material, senão a comparação ocorrerá de uma maneira equivocada.

Considerando materiais conjugados (recobrimento mais substrato), a avaliação deste volume desgastado através do uso da densidade torna-se imprecisa e complexa, devido à combinação de materiais com densidades diferentes.

A Norma ASTM G 99-05 estabelece uma relação geométrica para a determinação do volume de desgaste a partir de medidas lineares, como o raio e a largura do traço de desgaste. Medidas lineares de desgaste são frequentemente usadas na prática, quando a perda de massa do material é muito pequena, resultando em imprecisão (ASTM G 99-05).

Uma das propostas deste trabalho consiste na avaliação deste volume desgastado, através da combinação de resultados produzidos por dois equipamentos: o perfilômetro, que possibilita análises tridimensionais com medições de volume de uma certa região delimitada e o tribômetro Pino sob Disco, que produz desgaste com controle de carga e velocidade. Esta abordagem tridimensional do fenômeno desgaste, através do monitoramento das variações topográficas e do estabelecimento de uma metodologia para estimar o volume de desgaste de sistemas recobertos, constitui assim uma abordagem inovadora deste trabalho. O volume estimado por perfilometria (nova abordagem) será comparado ao volume estimado a partir de medidas lineares (abordagem descrita pela Norma ASTM G 99-05), o que possibilitará validar e analisar a viabilidade da metodologia proposta.

Um trabalho realizado por Ávila et al estudou o desempenho de ferramentas de metal duro revestidas por TiN, $Ti_{1-x}Al_xN$ e $Ti_{1-x}C_xN$ e chegou-se a algumas conclusões que possibilitaram definir o sistema $Ti_{1-x}Al_xN$ como um recobrimento de grande interesse para o estudo de influência das propriedades de um filme no desempenho de um conjugado em desgaste (ÁVILA, 2003).

A principal conclusão obtida a partir deste trabalho, relaciona-se ao desempenho das ferramentas revestidas quanto a usinagem de aços carbono endurecidos. A taxa de desgaste determinada pelo volume da cratera, avaliada através de análise topográfica, indicou um

melhor desempenho das ferramentas de corte revestidas com $Ti_{1-x}C_xN$, TiN, $Ti_{1-x}Al_xN$ e sem revestimento, nesta ordem. As ferramentas revestidas com $Ti_{1-x}C_xN$ e TiN apresentaram desempenho bem superior à ferramenta sem revestimento (WCCo). Este resultado indicou que a presença destes revestimentos nesta ferramenta de corte, minimiza a evolução do desgaste de cratera e ainda, que embora tenha ocorrido delaminação parcial do recobrimento em tempos de corte maiores, não houve um comprometimento à resposta da ferramenta em condições reais de usinagem. No entanto, neste estudo, o recobrimento $Ti_{1-x}Al_xN$ depositado sobre a ferramenta não apresentou um bom desempenho em usinagem. A literatura indica o uso do mesmo para aplicações de alta severidade mecânica e altas temperaturas, ocorrendo simultaneamente, devido a sua alta dureza e a formação de um óxido do tipo Al_2O_3 . Porém, a resposta obtida nos experimentos realizados por ÁVILA et al., 2003, não correspondeu ao esperado por resultados obtidos anteriormente por outros autores (PALDEY, 2003; JINDAL, 1999).

A maior taxa de desgaste foi observada para a ferramenta revestida com $Ti_{1-x}Al_xN$, neste trabalho. Ressalta-se a presença de uma fase hexagonal $Ti_{1-x}Al_xN$, baseada no protótipo ZnS, que teria sido formada devido ao alto teor de alumínio presente no recobrimento. A presença desta fase possibilitou refletir sobre a influência que uma estrutura bifásica poderia apresentar no desempenho da ferramenta de corte. Assim, propriedades tais como dureza, tenacidade, módulo de elasticidade, coeficiente de dilatação e resistência à oxidação, podem ser modificadas, o que resulta em uma resposta diferenciada ao comparar um recobrimento monofásico com um bifásico.

Pretende-se, através deste trabalho, consolidar a relação “estrutura e propriedades” em estudos de engenharia de superfície. Nesta área da engenharia, não há a conscientização de que a partir do conhecimento do tipo de recobrimento (composição química) não se pode afirmar em qual aplicação o mesmo terá bom desempenho. Por exemplo, verifica-se freqüentemente (por exemplo em manuais de produtores de recobrimentos) a afirmação de que recobrimentos de $Ti_{1-x}C_xN$ são mais indicados para aplicações onde há desgaste abrasivo, devido a sua alta dureza e que, recobrimentos $Ti_{1-x}Al_xN$ são mais indicados para

aplicações que envolvam altas temperaturas, devido à formação de um óxido protetor do tipo Al_2O_3 .

No entanto, como foi visto, recobrimentos $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ podem apresentar-se monofásicos e/ou bifásicos; austeníticos e/ou hexagonais e por isso, por apresentarem estruturas diferentes, terão propriedades diferentes, como propriedades mecânicas, térmicas, de elasticidade e de tenacidade, o que afetará o desempenho em desgaste (OHNUMA, 2004; TONSHOFF, 1997).

Espera-se assim enfatizar, com o desenvolvimento desta tese, a idéia de que, também para novos materiais (no caso, conjugados), o binômio “estrutura-propriedade” permanece. A incorporação deste modelo no desenvolvimento tecnológico de novos recobrimentos pode significativamente auxiliar usuários e produtores de recobrimentos.

CAPÍTULO 2: OBJETIVO

Este trabalho possuiu o objetivo principal de estabelecer uma metodologia através da perfilometria para verificar a influência da estrutura cristalina (que resulta do teor de alumínio) dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$, no desgaste por deslizamento de conjugados $Ti_{1-x}Al_xN/AISI H13$ temperado e não temperado. A resistência ao desgaste dos sistemas estudados foi avaliada através do cálculo da taxa de desgaste, obtida a partir da elaboração de uma metodologia para estimar o volume de desgaste, utilizando a técnica de perfilometria tridimensional.

O objetivo secundário do trabalho consistiu na verificação do efeito da dureza do substrato H13 no desgaste dos conjugados $Ti_{1-x}Al_xN$.

Foram comparadas as taxas de desgaste entre conjugados contendo filmes de dois teores diferentes de alumínio e seus substratos:

- Conjugados Baixo Alumínio (BA) $Ti_{1-x}Al_xN/AISI H13$ temperado e revenido e Alto Alumínio (AA) $Ti_{1-x}Al_xN/AISI H13$ temperado e revenido;
- Conjugados Baixo Alumínio (BA) $Ti_{1-x}Al_xN/AISI H13$ não temperado e Alto Alumínio (AA) $Ti_{1-x}Al_xN/AISI H13$ não temperado;
- Aço AISI H13 não temperado sem revestimento;
- Aço AISI H13 temperado, revenido e sem revestimento.

CAPÍTULO 3 : REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atrito é a resistência ao movimento que ocorre entre duas superfícies em contato. Ele atua quando existe movimento relativo entre os dois sólidos ou quando há uma tentativa de movimento entre eles.

O desgaste pode ser definido como a remoção de material de superfícies sólidas como resultado de uma ação mecânica (RABINOWICZ, 1995).

Atrito e desgaste são respostas de um tribo-sistema. Coeficientes de atrito e desgaste são parâmetros que descrevem o estado de contato dos corpos em um tribo-sistema. Eles não são constantes dos materiais dos corpos em contato. Podem ser tratados como propriedades dos materiais para conveniências técnicas em engenharia e estados de contato. Atrito e desgaste, sendo dois tipos de resposta de um tribo-sistema, podem ser relacionados um com o outro em um certo estado de contato no sistema (KATO, 2000).

3.1 Desgaste por deslizamento

O desgaste por deslizamento ocorre quando duas superfícies sólidas deslizam uma sobre a outra. No desgaste abrasivo, o material é removido ou deslocado da superfície por partículas duras ou, comumente, por protuberâncias duras na contraface, forçada contra a superfície deslizante.

Em muitas aplicações de engenharia e em muitas investigações laboratoriais, as superfícies que escorregam não são lubrificadas. O desgaste resultante é freqüentemente chamado de desgaste por deslizamento a seco, que normalmente ocorre em ar com certa umidade. Algumas condições do desgaste por deslizamento podem gerar debris (fragmentos) que ocasionam desgaste por abrasão.

Diferentes métodos experimentais têm sido utilizados para estudar o desgaste por deslizamento. Testes de desgaste de laboratório são usualmente realizados para examinar mecanismos de desgaste ou simular taxas de desgaste e coeficientes de atrito. O controle e a medição de todas as variáveis que podem afetar o desgaste são muito importantes. A taxa de desgaste e o coeficiente de atrito são consideravelmente dependentes das condições de deslizamento. Pequenas alterações nestas condições podem levar a mudanças substanciais no mecanismo predominante e na taxa de desgaste associada.

A medida contínua da força de atrito durante o teste de desgaste é usualmente feita através da medição da força tangencial no espécime. O atrito contínuo registra não somente valores numéricos de coeficiente de atrito, mas também alterações no comportamento do deslizamento. Essas alterações resultam de mudanças na natureza da superfície ou topografia, além de mudanças no mecanismo de desgaste. O “running-in” (período de incubação transiente ou período em que o coeficiente de atrito ou a profundidade de desgaste não possuem comportamento definido em função do tempo) pode ser explorado dessa forma, como a quebra de um óxido protetor ou filmes lubrificantes. O conhecimento dessas mudanças torna-se mais viável do que a medição da taxa de desgaste absoluta. É importante enfatizar que este período depende da rugosidade da superfície do material sujeito ao desgaste (KATO, 2000; HARLIN, 2006).

O desgaste em condições de deslizamento depende da distância de deslizamento, da velocidade de deslizamento e do tempo de duração do teste. A velocidade de deslizamento afeta a taxa de dissipação de energia friccional e a temperatura da interface. O desgaste também depende da pressão de contato nominal entre as superfícies. Diversos outros fatores devem ser considerados e monitorados em testes de desgaste. A temperatura do teste é importante porque influencia as propriedades mecânicas dos materiais (KATO, 2000). Estudos realizados por Bose et al (2005) demonstraram que a taxa de desgaste e os mecanismos de desgaste predominantes são extremamente dependentes e sensíveis às condições de teste (BOSE, 2005).

Em condições sem lubrificação ou lubrificadas, o deslizamento de um par (usualmente dissimilar) como em condições de contato entre dois corpos, a taxa de degradação ou desgaste depende dos seguintes fatores: carga aplicada, dureza, pressão, limite de escoamento, tempo, velocidade de deslizamento, coeficiente de atrito, índice de plasticidade etc.

Quando ocorre contato entre duas superfícies (uma mais dura e a outra mais macia) sujeitas ao carregamento, o deslizamento de uma sobre a outra pode supor que a perda de dimensão linear da superfície desgastada dependerá da carga aplicada, da velocidade de deslizamento imposta, do coeficiente de atrito, da dureza da superfície mais macia, do tempo de contato e do contato medido como dimensão representativa de comprimento. A dureza, como propriedade plástica, é mais importante que o módulo de elasticidade para materiais dúteis, em que o desgaste ocorre geralmente após um significativo fluxo plástico (WILLIAMS, 2005).

O coeficiente de atrito, sendo o quociente entre a força de atrito e a força normal aplicada, geralmente, independe da carga normal aplicada. Como a força de atrito é proporcional à carga, o aumento da carga ocasiona aumento da força de atrito mantendo constante o quociente entre estas forças, ou seja, mantendo o coeficiente de atrito constante.

Assim, em geral, o coeficiente de atrito permanece constante com a variação da carga aplicada.

Há situações em que o coeficiente de atrito pode depender da carga. Como exemplo, pode-se citar situações em que há uma camada de óxido na superfície metálica. A cargas baixas, a camada de óxido permanece, sendo medido o coeficiente de atrito entre o metal com o óxido e a contraparte. A altas cargas, a camada de óxido pode ser removida ou sofrer fratura, o que pode resultar no aumento do coeficiente de atrito, que nesta situação, refere-

se ao metal exposto “sem óxido” e a contraparte. A mudança do par que estabelece o contato ocasiona alteração do coeficiente de atrito (HUTCHINGS, 1992).

Os debris (fragmentos ou detritos de partículas) de desgaste são gerados do ambiente vizinho do sistema de deslizamento ou de diferentes mecanismos de desgaste. A sua influência no atrito e no desgaste pode ser considerável em algumas condições de contato, dependendo do diâmetro da partícula, da espessura do recobrimento e da rugosidade da superfície, além da sua relação com a dureza do substrato. Quando uma partícula de desgaste é liberada de certa superfície, ela pode influenciar o comportamento tribológico do contato em duas formas. Os detritos de desgaste livres no contato podem influenciar o atrito e o desgaste e podem se prender (aderir) à contraface para formar uma camada de transferência em que há uma significativa alteração das propriedades tribológicas da contraface. Assim, pode-se dizer que é formada uma nova contraface, acarretando a formação de um novo par de material (HOLMBERG, 1998).

A remoção de material no desgaste pode envolver tanto fratura dútil, quanto fratura frágil (HUTCHINGS, 1992).

No modo de fratura dútil, a remoção de material envolve deformação plástica. Neste caso, a equação 3.1, denominada de equação de Archard, estabelece que a taxa de desgaste, Q , igual ao volume desgastado (V) por unidade de comprimento desgastado (S) é diretamente proporcional à carga normal e inversamente proporcional à dureza do material e pode ser escrita da seguinte forma (HUTCHINGS, 1992):

$$Q = \frac{V}{S} = \frac{KW}{H} \quad (3.1)$$

onde: W é a carga normal total aplicada; K é uma constante que depende da fração de material deslocado e da geometria das partículas, podendo ser usada como uma medida da

severidade do desgaste, sendo denominada coeficiente de desgaste adimensional; H é a dureza da peça. Esta equação é conhecida como a equação de Archard.

Para desgaste por escorregamento, um coeficiente dimensional de desgaste, k, é mais utilizado e é definido por (HUTCHINGS, 1992):

$$k = \frac{K}{H} \quad (3.2)$$

Esta taxa de desgaste dimensional, k, é também expressa como Q/W, sendo a resistência ao desgaste correspondente ao inverso desta taxa de desgaste (1/k).

Estas equações estabelecem que, para uma carga constante, a taxa de remoção de material por distância de escorregamento, Q, é inversamente proporcional à dureza (H). Por outro lado, esse parâmetro Q é diretamente proporcional à carga W, se um mesmo mecanismo atua durante o processo de desgaste (HUTCHINGS, 1992).

No desgaste por fratura frágil, a taxa de desgaste depende mais da tenacidade do material do que da dureza, pois o desgaste do material ocorre através da propagação de trincas (HUTCHINGS, 1992).

A dureza é considerada uma propriedade do material que define a sua resistência ao desgaste. Entretanto, a deformação elástica do material até a fratura ou inverso do índice de plasticidade, relacionada ao quociente entre a dureza e o módulo de elasticidade, tem sido considerada como um parâmetro mais adequado para avaliar a resistência ao desgaste do material, do que a dureza. Este parâmetro evidencia a influência do comportamento elástico na superfície de contato, que é claramente importante para evitar o desgaste do material (BEAKE, 2006; LEYLAND, 2000). Estudos realizados na literatura sugerem que a tenacidade à fratura do material (resistência à propagação de trincas), obtida por trincas

radiais criadas durante uma indentação, pode ser descrita pela seguinte equação (LEYLAND, 2000; PHARR, 1998):

$$K_c = \alpha_1 (E / H)^{1/2} (P / C^{3/2}) \quad (3.3)$$

Onde P é a carga de indentação, C é o comprimento da trinca radial, α_1 é uma constante empírica relacionada à geometria do indentador, E é o módulo de elasticidade do material, H é a dureza do material e K_c é o fator de intensidade de tensão crítica, necessário para a trinca se propagar, sendo relacionado diretamente a tenacidade à fratura do material (LEYLAND, 2000; PHARR, 1998).

Muitos ensaios experimentais de desgaste utilizam a determinação de variação de massa por unidade de tempo para avaliar a taxa de desgaste (BAHRAMI, 2005; CHIU, 2002), considerando a densidade do material e uma velocidade constante. A partir da densidade do material, estima-se o volume desgastado.

A Norma ASTM G 99-05 utiliza uma relação geométrica para a determinação do volume de desgaste a partir de medidas lineares, que são frequentemente usadas na prática, quando a perda de massa do material é muito pequena, resultando em imprecisão (ASTM G 99-05). Considerando um contra-corpo esférico de raio r e condições em que o desgaste de apenas um membro do par é significativo, o volume de material desgastado pode ser obtido por (ASTM G 99-05):

$$V = \pi R e^3 / 6r \quad (3.4)$$

Onde:

R = raio do traço de desgaste

e = largura do traço de desgaste

r = raio do contra-corpo esférico

Desde a década passada, os métodos topográficos, como o uso da Microscopia de Força Atômica têm sido utilizados para avaliar o desempenho em desgaste, através da estimativa do volume de desgaste (GAHLIN, 1998).

Estudos recentes utilizaram a técnica de perfilometria a laser para a determinação do volume de desgaste por deslizamento de conjugados recobertos com o filme $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ contra esferas de Si_3N_4 e Al_2O_3 , sendo o volume determinado através do produto entre a área média e o diâmetro do traço de desgaste (BOBZIN, 2007).

A perfilometria tridimensional também foi usada para determinar o volume de desgaste de cratera ocorrido após a usinagem de ferramentas de metal duro recobertas Ti-N, Ti (C,N) e $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$, além de outros estudos contidos na literatura (ÁVILA, 2007; TAKADOUM, 1997).

Ressalta-se que a metodologia proposta por este trabalho diferencia-se das metodologias adotadas na literatura, além de possibilitar a relação entre a estrutura e a propriedade dos revestimentos.

3.2 Recobrimentos depositados por PVD

Há três diferentes formas de adaptar ferramentas de corte aos requerimentos da usinagem a seco: o uso de um novo material de corte, a mudança da geometria de corte e a aplicação de recobrimentos duros ou macios, depositados sobre as ferramentas. A última possibilidade é a solução mais frequentemente discutida (SCHEERER, 2005).

O ramo industrial dos metais tem objetivado melhorar o desempenho da ferramenta usada no processo de trabalho a quente. As tecnologias de trabalho a quente (moldagem, extrusão e forjamento) envolvem temperaturas superiores a 600 °C, além de altas cargas superficiais. Devido à enorme quantidade de produtos destas indústrias, pequenas melhorias neste campo podem resultar em bons efeitos econômicos. No passado, as ferramentas para trabalho a quente foram melhoradas através de uma variedade de processos de engenharia de superfície, como a soldagem, o spray térmico, a eletrodeposição etc. Os recobrimentos PVD tornaram-se materiais muito importantes tecnologicamente em diversas aplicações industriais, sendo utilizados com sucesso em processos de trabalho a elevadas temperaturas. Recobrimentos de alta dureza depositados por PVD são conhecidos por possibilitar à superfície, melhores propriedades tribológicas em termos de baixo atrito e alta resistência ao desgaste.

Estudos realizados indicam que os filmes Ti-N, $Ti_{1-x}Al_xN$ e Cr-N depositados por PVD podem reduzir o atrito do contato tribológico e aumentar a resistência ao desgaste abrasivo. Estes recobrimentos têm possibilitado bom desempenho em aplicações com torneamento e furação, além da melhora na resistência ao desgaste. As técnicas PVD possibilitam o aumento da vida útil (entre 50 e 100%) de ferramentas feitas de aços para trabalho a quente (DOBRZANSKI, 2004).

3.2.1 Recobrimentos $Ti_{1-x}Al_xN$

O filme Ti-N tem sido usado como recobrimento protetor para ferramentas de corte. Um dos maiores avanços no desenvolvimento de recobrimentos é o $Ti_{1-x}Al_xN$, que têm sido aplicado comercialmente com muito sucesso particularmente em usinagem de alta velocidade devido à sua alta resistência à oxidação e dureza (DING, 2005).

A incorporação de alumínio à estrutura CFC do Ti-N resulta na formação de uma solução sólida ternária de $Ti_{1-x}Al_xN$. É bem conhecido que este procedimento pode melhorar o

desempenho de corte do material devido à elevada dureza a quente e excelente resistência à oxidação a temperaturas superiores a 700 °C, o que é explicado pela formação de uma camada protetora de óxido rico em alumínio sobre a superfície do filme.

Considerando-se uma quantidade fixa de nitrogênio (em relação a 50% atômico do filme), a adição de alumínio à matriz da estrutura Ti-N CFC a uma faixa de até 60% de alumínio atômico (em relação a 50% atômico do filme) resulta em uma solução sólida monofásica de $Ti_{1-x}Al_xN$ - CFC. O aumento do teor de alumínio em uma faixa entre 60 e 70% atômico (em relação a 50% atômico do filme), ocasiona a precipitação do excesso de alumínio, resulta em um filme bifásico, com estruturas $Ti_{1-x}Al_xN$ - CFC e $Ti_{1-x}Al_xN$ - Hexagonal. Para teores de alumínio superiores a 70% atômico (em relação a 50% atômico do filme), observa-se que o filme passa a ser monofásico de estrutura $Ti_{1-x}Al_xN$ - Hexagonal (KUTSCHEJ, 2005).

As Figuras 3.1 e 3.2 demonstram a influência do teor de alumínio do filme $Ti_{1-x}Al_xN$ na estrutura cristalina, influenciando conseqüentemente, a dureza e o módulo de elasticidade, o que deve ser considerado na avaliação do seu desempenho em desgaste.

O desempenho em desgaste de filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ é fortemente dependente da quantidade de alumínio presente no filme. Dependendo do mecanismo de desgaste predominante, filmes monofásicos CFC, filmes bifásicos ou filmes monofásicos hexagonais podem apresentar diferentes desempenhos (OHNUMA, 2004; KUTSCHEJ, 2005).

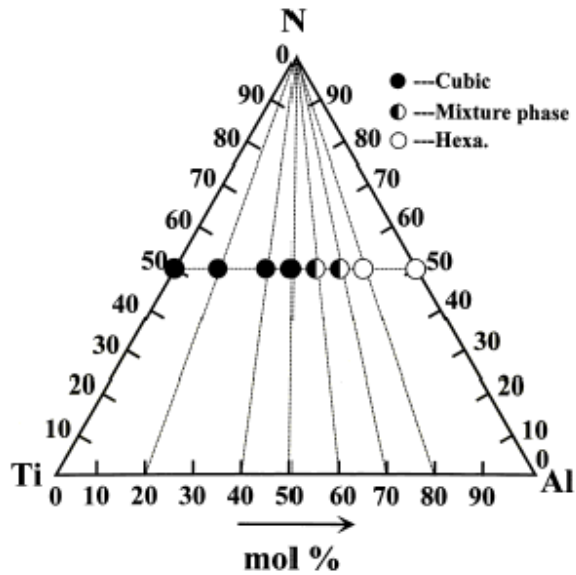


Figura 3.1- Estrutura cristalina dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ (ZHOU, 1999).

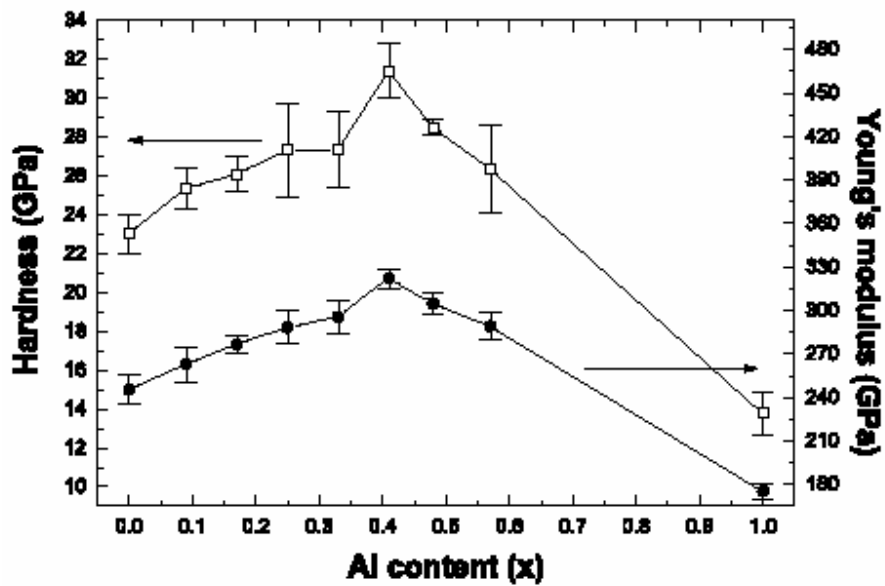


Figura 3.2 - Dependência da dureza e do módulo de elasticidade dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ em função do conteúdo de alumínio a uma carga de indentação de 3mN (SHUM, 2003).

3.3 Ferramentas para usinagem

O processo de usinagem, que utiliza como ferramenta um material mais duro que o da peça, é a operação mais comum entre os processos de fabricação existentes. Baseado no princípio da dureza relativa, o surgimento de novos materiais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribui para o aparecimento de materiais de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem. Por outro lado, a usinagem de materiais frágeis e/ou operações de cortes interrompidos (como o caso do fresamento, por exemplo) requerem materiais de ferramentas com suficiente tenacidade para suportarem os choques e os impactos inerentes a tais processos. Como dureza e tenacidade são duas propriedades opostas (normalmente alta dureza significa baixa tenacidade e vice-versa), o balanço destas propriedades nos materiais de ferramenta de corte se tornou um desafio para os fabricantes.

As principais propriedades que um material de ferramenta de corte deve apresentar, dependendo da aplicação são alta dureza; tenacidade suficiente para evitar falha por fratura; alta resistência ao desgaste; boas propriedades mecânicas e térmicas a temperaturas elevadas; alta resistência ao impacto; inércia química etc.

3.3.1 Aço ferramenta H13

Os aços ferramenta representam um importante segmento da produção siderúrgica de aços especiais. Estes aços são produzidos e processados para atingir um elevado padrão de qualidade e são utilizados principalmente em: matrizes, moldes, ferramentas de corte intermitente e contínuo, ferramentas de conformação de chapas, corte a frio, componentes de máquina, etc. Apesar de existirem mais de 100 tipos de aços ferramenta normalizados internacionalmente, procurando atingir as mais diversas aplicações e solicitações, a indústria de ferramentaria trabalha com uma gama reduzida de aços que possuem suas

propriedades e desempenho consagrados ao longo do tempo, como por exemplo, os aços AISI H13, AISI D2 e AISI M2, entre outros.

Os aços ferramenta são classificados de acordo com suas características metalúrgicas principais ou de acordo com seu nicho de aplicação. A classificação da "American Iron and Steel Institute", AISI, é a mais utilizada pela indústria de ferramenta e tem se mostrado útil para a seleção de aços ferramenta. A Tabela III.1 engloba as classificações dos aços ferramenta.

(Fonte: http://www.heattech.com.br/publicacoes/FOLDER_ACOS_FERRAMENTA.pdf).

Tabela III.1 - Classificação dos aços ferramenta.

(Fonte: http://www.heattech.com.br/publicacoes/FOLDER_ACOS_FERRAMENTA.pdf).

Nome	Símbolo
Aços Ferramenta Temperáveis em Água	W
Aços Ferramenta Resistentes ao Choque	S
Aços Ferramenta para Trabalho a Frio Temperáveis em Óleo	O
Aços Ferramenta para Trabalho a Frio	D
Aços Ferramenta para Trabalho a Quente	H
Aços Ferramenta para Moldes	P
Aços Rápido ao Molibdênio	M

Os aços ferramenta para trabalho a quente são amplamente utilizados para a fabricação de matrizes e moldes. A principal família destes aços são os ligados principalmente ao cromo, com adições de Mo e V em menores quantidades, que constituem a família de aços H. O mais popular destes aços é o AISI H13. Este aço é utilizado em uma faixa ampla de dureza, entre 44-50 HRC, a qual deve ser especificada em função das condições de aplicação da ferramenta.

A norma da "North American Die Casting Assosiation" prevê a qualidade do aço H13 tanto no que se refere ao material de partida quanto ao tratamento térmico.

(Fonte: http://www.heattech.com.br/publicacoes/FOLDER_ACOS_FERRAMENTA.pdf).

A têmpera do aço AISI H13, que resulta na formação de uma estrutura martensítica, aumenta a dureza do aço H13, o que interfere no seu desempenho em desgaste.

Estudos realizados por Bahrami et. al. comprovaram que o tratamento térmico do aço H13 aumentou a sua resistência ao desgaste. Em geral, a transformação martensítica usualmente aumenta a resistência ao desgaste dos aços (BAHRAMI, 2005).

A composição química nominal do aço H13 está ilustrada na Tabela III.2.

Tabela III.2 - Composição química nominal do aço H13 (SMITH, 1993).

Elemento	Composição
C	0,35%
Mo	1,5%
Cr	5%
V	1%
Outros	92,15%

3.4 Ferramentas revestidas pelo filme $Ti_{1-x}Al_xN$

Um trabalho do grupo de pesquisa “Modificação e Caracterização de Superfície” (Diretório CNPq) estudou o desempenho de ferramentas de metal duro revestidas por TiN, $Ti_{1-x}Al_xN$ e $Ti_{1-x}C_xN$ e chegou-se a algumas conclusões que possibilitam definir o sistema $Ti_{1-x}Al_xN$ como um recobrimento de grande interesse para o estudo de influência das propriedades de um filme no desempenho de um conjugado em desgaste (ÁVILA, 2003).

A principal conclusão obtida a partir deste trabalho, relaciona-se ao desempenho das ferramentas revestidas quanto a usinagem de aços carbono endurecidos. A equipe encontrou que a taxa de desgaste determinada pelo volume da cratera, avaliada através de análise topográfica, indicou um melhor desempenho das ferramentas de corte revestidas com $Ti_{1-x}C_xN$, TiN, $Ti_{1-x}Al_xN$ e sem revestimento, nesta ordem. As ferramentas revestidas com $Ti_{1-x}C_xN$ e TiN apresentaram desempenho bem superior à ferramenta sem revestimento (WCCo).

Este resultado indicou que a presença destes revestimentos nesta ferramenta de corte, minimiza a evolução do desgaste de cratera e ainda, que embora tenha ocorrido delaminação parcial do recobrimento em tempos de corte maiores, não houve um comprometimento à resposta da ferramenta em condições reais de usinagem.

No entanto, neste estudo, a ferramenta de metal duro recoberta com $Ti_{1-x}Al_xN$ não apresentou um bom desempenho em usinagem. A literatura indica o uso deste filme em aplicações de alta severidade mecânica e altas temperaturas, ocorrendo simultaneamente, devido a sua alta dureza e a formação de um óxido do tipo Al_2O_3 . Porém, a resposta obtida nos experimentos realizados por ÁVILA et al., 2003, não correspondeu ao esperado por resultados obtidos anteriormente por outros autores (PALDEY, 2003; JINDAL, 1999).

A maior taxa de desgaste foi observada para a ferramenta revestida com $Ti_{1-x}Al_xN$, neste trabalho. Foi observada a presença de uma fase hexagonal $Ti_{1-x}Al_xN$, baseada no protótipo ZnS, que teria sido formada devido ao alto teor de alumínio presente no recobrimento. A presença desta fase possibilitou refletir sobre a influência que uma estrutura bifásica poderia apresentar no desempenho da ferramenta de corte (ÁVILA, 2003). Propriedades como dureza, tenacidade, módulo de elasticidade, coeficiente de dilatação e resistência à oxidação, podem ser modificadas, o que resulta em uma resposta diferenciada ao comparar um recobrimento monofásico com um bifásico (OHNUMA, 2004).

CAPÍTULO 4 : METODOLOGIA

Foram utilizados como substratos, discos de aço H13 (cortados a partir de uma barra de 1,5 m de comprimento e ¾ pol de diâmetro). Utilizou-se amostras de aço AISI H13 sem tratamento térmico e amostras de aço AISI H13 tratadas termicamente (têmpera e revenimento) até atingir uma dureza de 50/52 HRC, sendo o tratamento térmico realizado em banho de sais. As amostras de AISI H13 foram lixadas e polidas até a pasta de diamante igual a 1 µm. Foi utilizada a politriz automática PHOENIX 4000 (BUEHLER), do Laboratório de Metalografia do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear-CDTN.

4.1 Produção dos conjugados

A produção dos conjugados englobou a obtenção de filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ com dois teores de alumínio distintos, depositados nos dois tipos de substratos estudados: AISI H13 temperado e revenido e AISI H13 não temperado.

Foram produzidos conjugados Alto Alumínio (AA) $Ti_{1-x}Al_xN$ /discos de AISI H13 temperado e revenido (corrida-padrão), conjugados Baixo Alumínio (BA) $Ti_{1-x}Al_xN$ /discos de AISI H13 temperado e revenido (corrida-dedicada). Também foram obtidos conjugados Alto Alumínio (AA) $Ti_{1-x}Al_xN$ /discos de AISI H13 não temperado (corrida-padrão), conjugados Baixo Alumínio (BA) $Ti_{1-x}Al_xN$ /discos de AISI H13 não temperado (corrida-dedicada).

A produção dos conjugados foi realizada na TECVAC, Inglaterra. A deposição dos filmes foi feita pelo processo de Evaporação por Feixe de Elétrons Assistido a Plasma (EBPAPVD), usando o sistema TECVAC IP35L, em uma faixa de temperatura de 400-450°C.

Este processo consiste num processo de Deposição Física de Vapor (PVD) por Evaporação, que envolve a obtenção da fase vapor do material que constituirá o recobrimento através do seu aquecimento e posterior transformação para a fase vapor. A evaporação, realizada numa

câmara sob vácuo, produz um fluxo de átomos que se condensam sobre o substrato, formando o recobrimento. Neste processo, a forma de calor empregada é por feixe de elétrons (RICKERBY, 1991).

4.2 Difração de raios X (DRX)

Foram realizadas análises por DRX para a caracterização dos conjugados estudados em relação às fases cristalinas presentes. Esta técnica também apresentou a finalidade de diferenciar os filmes dos conjugados de cada aço (H13 não temperado e H13 temperado) em relação à estrutura cristalina.

Foi utilizado o difratômetro PHILIPS, modelo PW 1710, a partir da radiação de Cu-K α ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$, voltagem do tubo= 40 KV, corrente= 20 mA) e cristal monocromador de grafita . A varredura foi realizada em passos de $0,02^\circ/\text{s}$, no Laboratório de Difração de Raios-x do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG.

4.3 Teste de adesão Rockwell C

O desempenho de sistemas conjugados em várias solicitações, como o desgaste, pode ser substancialmente influenciado pela adesão do filme ao substrato (KIM, 2006; KAO, 2006). Assim, torna-se fundamental avaliar qualitativa ou quantitativamente a adesão de recobrimentos.

A avaliação qualitativa da adesão de um filme tem sido avaliada industrialmente pela técnica conhecida como 'teste de adesão Rockwell C' (HEINKE, 1995). Neste método, é utilizado um indentador cônico (padrão Rockwell C), que após aplicação de uma carga máxima de 1471N (150 Kgf), pode gerar microtrincas laterais ao contorno da impressão de indentação, que podem se visualizadas por microscopia ótica . A adesão do filme ao

substrato é classificada de acordo com um estudo comparativo dessas trincas e os padrões, indicados na Figura 4.1.

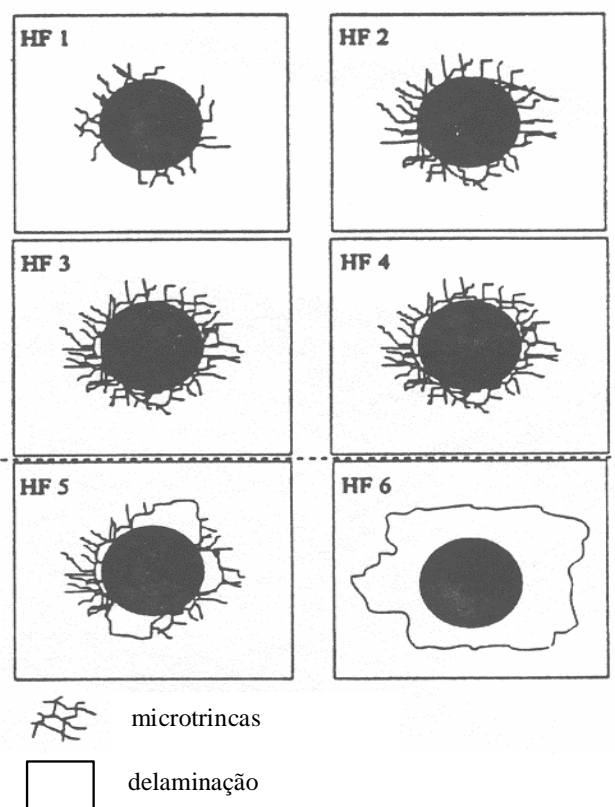


Figura 4.1 – Morfologias de falhas obtidas no teste de adesão Rockwell C (HEINKE, 1995).

Os padrões de trincas, representados em HF1 a HF4, representam morfologias típicas de revestimentos de boa adesão. As trincas representadas em HF5 e HF6 evidenciam um aspecto de delaminação do filme. As grandes vantagens da aplicação deste método são

baixo custo e facilidade operacional, sendo a mesma preferencialmente utilizada em controle de qualidade de revestimentos produzidos (HEINKE, 1995). Este teste de adesão por indentação foi desenvolvido na Alemanha e padronizado na VDI guidelines 3198 (1991).

Foram realizados testes comparativos de adesão Rockwell C para comparar e avaliar qualitativamente, a adesão dos filmes BA $Ti_{1-x}Al_xN$ e AA $Ti_{1-x}Al_xN$ em cada substrato estudado, sendo usadas as cargas de 62,5 kgf, 100 Kgf e 150 kgf, sendo esta última a carga utilizada na obtenção dos padrões de trinca morfologias, descritos pela Norma (Figura 4.1). Foram obtidas imagens de microscopia ótica após a carga de 150 Kgf (aumento de 100X) contendo os padrões de trinca em torno de cada impressão. Para avaliar melhor os padrões de trinca, foram obtidas imagens de MEV das indentações após o teste de adesão, sendo usados para os conjugados do aço não temperado os aumentos de 70X (carga 62,5Kgf), 60X (carga 100Kgf) e 45X (carga 150Kgf). Os aumentos usados para os conjugados do aço temperado foram de 100X e 170X (carga 62,5Kgf), além de 500X (carga 62,5Kgf) para mostrar trincas radiais do conjugado BA , 100X (carga 100Kgf) , além de 500X (carga 100 Kgf) para mostrar trincas radiais do conjugado BA , e 100X e 500X (carga 150Kgf).

4.4 Espectroscopia de Emissão Óptica por Centelhamento

Esta técnica consiste no bombardeamento de íons argônio (gerados de um campo elétrico da fonte) sobre a amostra. Estes íons (carregados positivamente) são atraídos para a amostra (carregada negativamente) por diferença de potencial. Eles incidem a uma certa profundidade, causando remoção de material da superfície da amostra.

Esta técnica foi utilizada nos sistemas conjugados para avaliar a variação da composição dos elementos Al (elemento do filme) e Fe (elemento do substrato) ao longo da profundidade do conjugado, possibilitando estimar as espessuras dos filmes estudados, além de diferenciar os filmes BA e AA de cada sistema estudado, em relação ao teor de alumínio. Esta análise foi feita no Laboratório de Difração de Raios-X do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, com uso do aparelho GDLS 9950.

Foram feitas duas análises para cada sistema estudado (uma análise e uma réplica). Assim, foram obtidos gráficos da intensidade de alumínio e ferro (em contagem por segundo- cps) nos conjugados em função da profundidade (em nm).

4.5 Ensaios de Penetração Instrumentada

A dureza dos conjugados pode variar com a força aplicada (MANCOSU, 2005) e o teor de alumínio presente nos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ afeta propriedades como a dureza do conjugado (OHNUMA, 2004; IKEDA, 1991; PALDEY, 2003).

Sendo assim, para estimar a dureza HIT dos conjugados com maiores influências do substrato e do filme, realizou-se testes de penetração instrumentada no Ultra-microdurômetro SHIMADZU DUH-W201S, usando o penetrador Berkovich. As forças aplicadas foram de 1900 mN, 1000 mN, 300, 100, 50 e 32 mN, sendo realizadas dez medições para cada força aplicada. Obteve-se o valor da dureza média para cada força. Os valores de dureza foram estimados através do software SHIMADZU DUH Test Application Versão 2.14.

O método de penetração instrumentada possibilita a medição da dureza e do módulo de elasticidade dos materiais, a partir da curva da carga aplicada em função do deslocamento em relação à superfície inicial não deformada, durante um ciclo de carga e descarga. Foi determinada, para cada força aplicada, a dureza denominada HIT (em GPa), que é a dureza instrumentada, sendo igual ao quociente entre a força (em mN) aplicada e a área de contato projetada (área determinada a partir da função de área do indentador) (OLIVER, 2004; Norma ISO /FDIS 14577-1).

Assim, a dureza para cada força aplicada foi estimada por (OLIVER, 2004):

$$H=P_{\max}/A \tag{4.1}$$

Onde P_{\max} é a carga máxima da curva da carga em função do deslocamento, A é a área de contato, que é função da geometria do indentador.

A influência do teor de alumínio dos filmes na propriedade dureza também foi avaliada. Mediu-se também a dureza dos substratos H13 não temperado e H13 temperado a 1900mN, para comparar a sua dureza com a dos conjugados e verificar se a deposição destes filmes resultou em um valor de dureza diferente da do substrato.

Foram realizados testes estatísticos de hipótese “t student” para verificar a igualdade ou desigualdade em relação aos valores de dureza medidos na mesma carga aplicada (a 1900 mN), comparando cada aço H13 com os seus conjugados. Este teste também foi feito para verificar a igualdade ou desigualdade entre as durezas dos conjugados, obtidas a 32 mN (maior influência do filme), além de verificar qual conjugado apresenta a maior dureza, medida nesta carga. Utilizou-se o parâmetro valor de p para a conclusão do teste de hipótese.

Para as durezas medidas na carga de 1900mN, as hipóteses estudadas, para 95% de confiança, foram:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

O valor de p menor que α (0,05) indica que a hipótese H_0 deve ser rejeitada, ou seja, as médias não são iguais, com 95% de confiança.

Para as durezas medidas na carga de 32mN, as hipóteses estudadas, para 95% de confiança, foram:

Um teste estatístico de hipótese realizado para verificar a diferença entre as médias:

H0: $\mu_1 = \mu_2$

H1: $\mu_1 \neq \mu_2$

Outro teste estatístico de hipótese realizado para verificar qual é o maior valor de dureza:

H0: $\mu_1 = \mu_2$

H1: $\mu_1 > \mu_2$

O valor de p menor que α (0,05) indica, nestes dois últimos testes, que a hipótese H_0 deve ser rejeitada, ou seja, as médias não são iguais e uma dureza é superior à outra, com 95% de confiança.

O ensaio de penetração instrumentada também possibilitou a medição dos valores de módulo de elasticidade em todas as profundidades de penetração dos sistemas estudados, com o objetivo de avaliar a influência deste parâmetro no desgaste. Além disso, foi obtido o quociente entre os valores de todas as durezas e todos os módulos de elasticidade (H/E) medidos, para verificar qual sistema apresenta a maior dureza associada ao menor módulo de elasticidade (maior H/E) ou maior deformação elástica até a falha em desgaste, o que pode interferir no desempenho em desgaste (BEAKE, 2006; LEYLAND, 2000; PHARR, 1998).

O módulo de elasticidade em cada força aplicada foi determinado a partir da rigidez de contato S ou inclinação da etapa de descarga da curva da força versus deslocamento, sendo (OLIVER, 2004):

$$S = dP/dh \quad (4.2)$$

Onde h é o deslocamento em relação à superfície não deformada.

A partir de S , da área de contato A e de uma constante β , determinou-se o módulo de elasticidade efetivo E_{eff} do material, que desconta a deformação elástica do indentador, por (OLIVER, 2004) :

$$S = \beta \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_{eff} \sqrt{A} \quad (4.3)$$

4.6 Ensaio de desgaste por Deslizamento

Os ensaios de desgaste foram realizados no Tribômetro Esfera-sobre-Disco da Microphotonics, modelo Standard (Figura 4.2), do Laboratório de Tribologia do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG. O contracorpo utilizado foi o Si_3N_4 6 mm; sendo usada a carga de 7N a 0,157 mm/s (500 rpm) e raio de percurso igual a 3 mm. Foram realizadas 30.000 revoluções, resultando em uma distância total de 565,8 m. O uso da carga de 7N e do tamanho da esfera, basearam-se em valores utilizados em testes de desgaste contidos na literatura (BOBZIN, 2007; KUTSCHEJ, 2005; CHRISTOFIDES, 2002).

A carga de 7N, usada previamente em testes realizados para verificar as condições experimentais, possibilitou que a solicitação imposta fosse suficiente para permitir uma boa estimativa do volume de desgaste, utilizando a perfilometria tridimensional. A escolha inicial desta carga baseou-se em testes de desgaste de deslizamento realizados na literatura que avaliaram o desgaste conjugados contendo recobrimentos depositados por PVD (BOBZIN, 2007; KUTSCHEJ, 2005; CHRISTOFIDES, 2002).

A escolha da esfera ocorreu após a comparação entre as faixas de dureza de diferentes esferas. Optou-se pelas esferas de nitreto de silício e de metal duro, devido à sua maior faixa de dureza, o que assegura o seu maior efeito abrasivo e devido ao fato da possível ocorrência de desgaste adesivo (HUTCHINGS, 1992) entre a esfera de alumina (que também tem alta faixa de dureza) e o filme $Ti_{1-x}Al_xN$. As faixas de dureza à temperatura ambiente de diferentes esferas abrasivas estão indicadas pela Tabela IV.1 (JIA, 1998).

Para confirmar e validar a metodologia proposta por perfilometria (cálculo do volume de desgaste, detalhado no item 4.1.8) e corroborar a influência do teor de alumínio do filme no desgaste, realizou-se também dois testes de desgaste (um teste e uma réplica) dos conjugados BA e AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado e do aço contra a esfera de WC-Co 6 mm. Este contracorpo também apresenta alta faixa dureza, o que justifica a sua escolha.

Tabela IV.1 – Durezas de esferas abrasivas (JIA, 1998; COSTA, 2007).

Material	Dureza (GPa)
Al_2O_3	18-20
Si_3N_4	14-19
Aço 100 Cr6	8-9
WC-Co	10-18

Foram realizados três testes de desgaste para cada sistema conjugado estudado (1 teste e duas réplicas) e dois testes de desgaste (um teste e uma réplica) para cada aço estudado.



Figura 4.2- Tribômetro Esfera sobre Disco da Microphotonics.

4.7 Perfilometria após o desgaste

A técnica de perfilometria tridimensional foi usada para medir o volume de desgaste, possibilitando verificar a influência do teor de alumínio do filme na taxa de desgaste, que é proporcional ao volume, sendo o quociente entre o volume e a distância de deslizamento (HUTCHINGS, 1992).

Utilizou-se o perfilômetro T4000 da HOMMELWERKE, com apalpador móvel TK 300/90; a área de varredura de 81mm^2 ($9 \times 9 \text{ mm}$), sendo realizadas 200 medições com espaçamento de $45,5 \mu\text{m}$. Utilizou-se uma velocidade de medição de $0,5 \text{ mm/s}$. Através do software MountainsMap Expert 3.0, elaborou-se uma metodologia para estimar o volume de desgaste. A metodologia foi composta pelas seguintes etapas:

1- Geração de uma superfície 3-D;

A partir de varreduras bidimensionais de uma área quadrada de $9 \times 9 \text{ mm}$ da amostra após o desgaste, obtém-se uma matriz tridimensional de pontos que produz uma imagem

tridimensional do perfil da amostra em estudo. A superfície tridimensional obtida é demonstrada na Figura 4.3. A escala da figura ($12\ \mu\text{m}$) significa a amplitude total da superfície, que corresponde à distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo, em relação ao plano médio da superfície (MUMMERY, 1992).

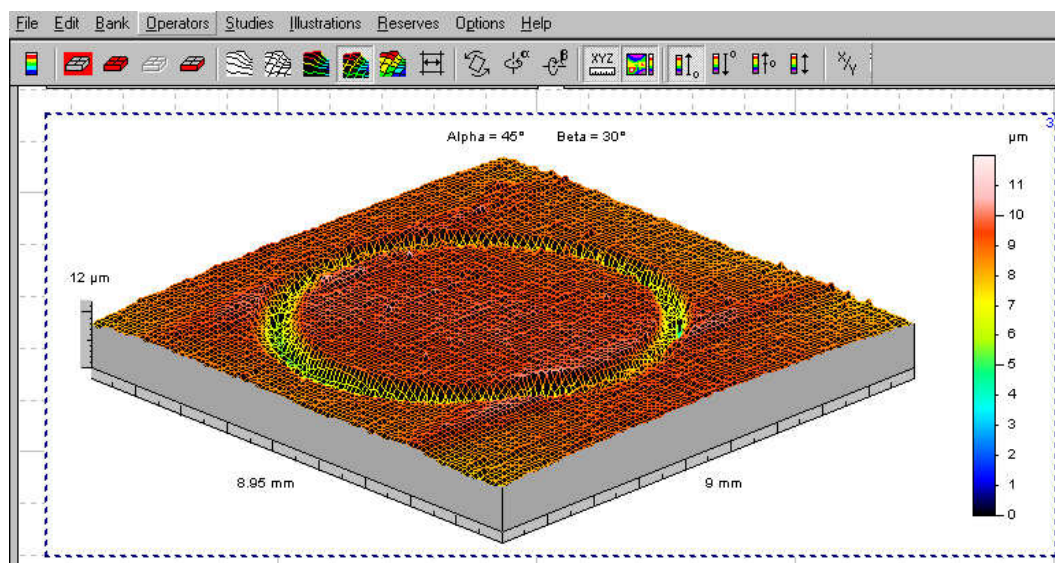


Figura 4.3- Imagem tridimensional de uma área contendo o traço de desgaste, obtida após as varreduras.

2- Uso do recurso de “Remoção de forma da superfície 3-D”, utilizando um polinômio de grau 2, para excluir possíveis desníveis da superfície (ondulações). As Figuras 4.4 e 4.5 ilustram a remoção de forma da imagem da Figura 4.3. Utilizou-se os recursos “Operators” e “Form removal” após selecionar a superfície desejada.

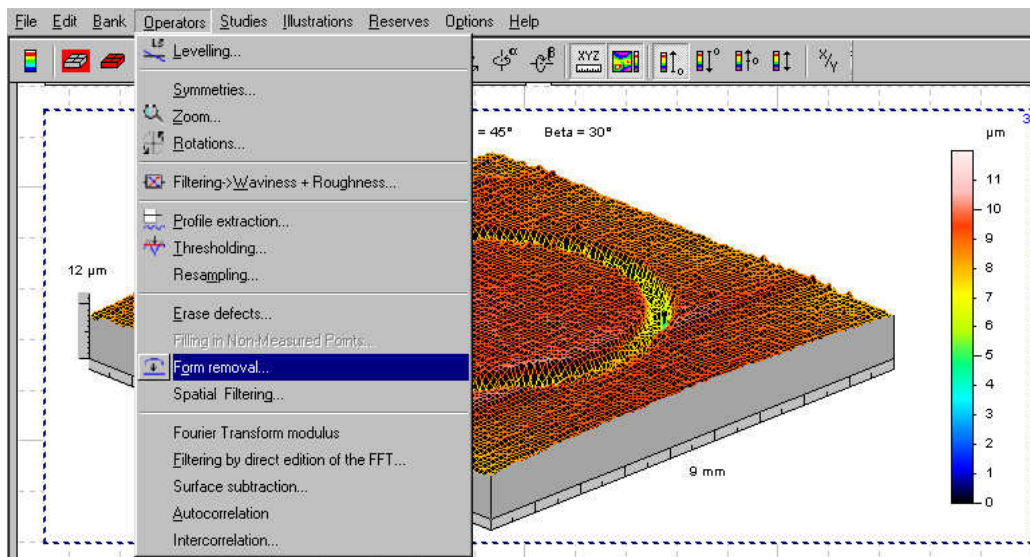


Figura 4.4 - Uso de recursos para a remoção de forma da superfície.

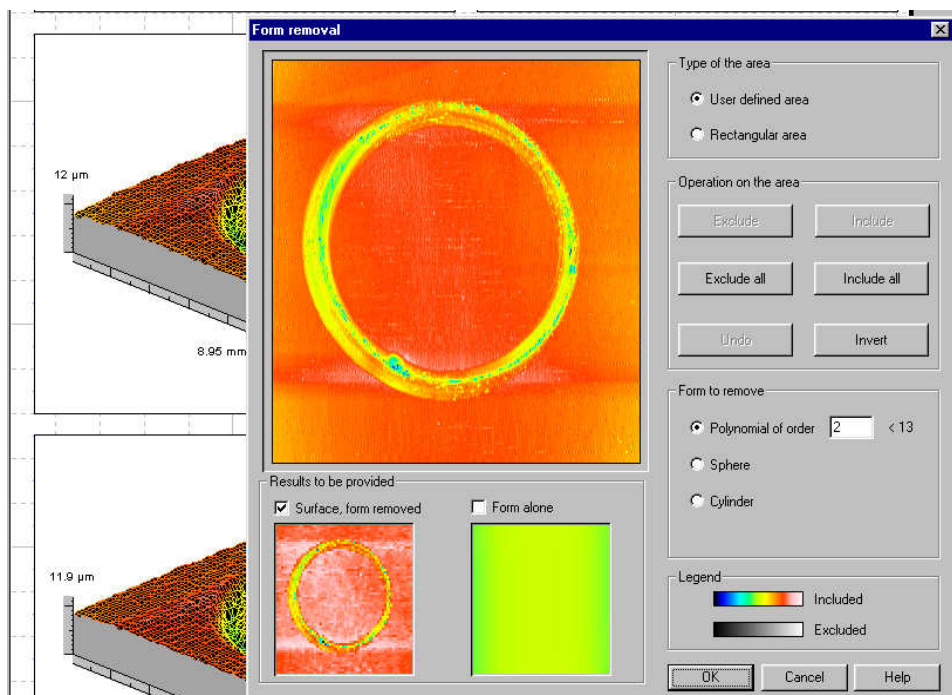


Figura 4.5- Demonstração da remoção de forma.

A Figura 4.6 ilustra a superfície resultante após a remoção de forma.

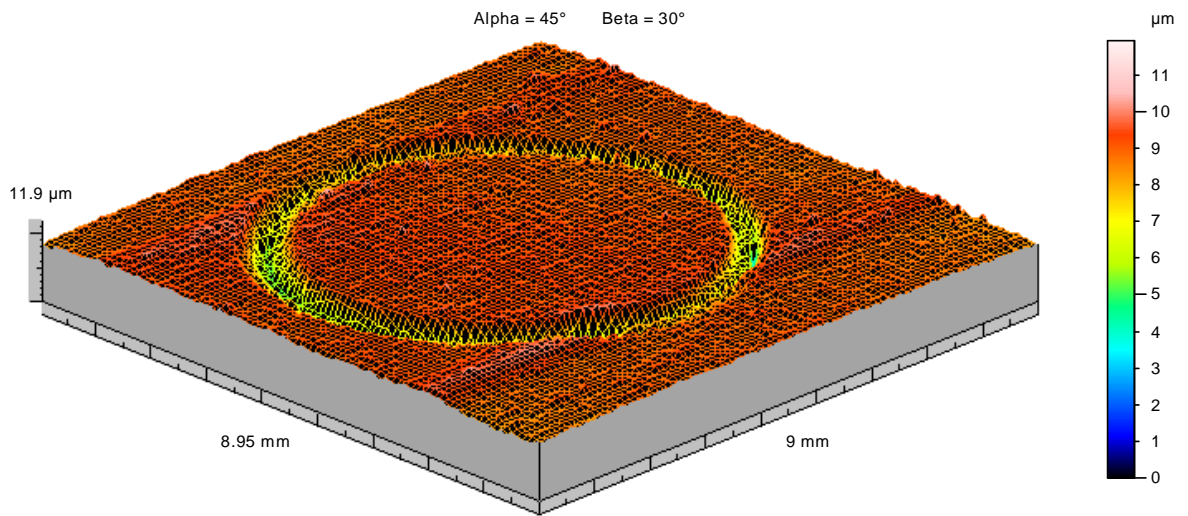


Figura 4.6 - Superfície resultante após a remoção de forma.

3- Inversão da superfície 3-D em relação ao eixo z, para que os vales (distância do plano médio à parte mais baixa do perfil) tornam-se picos (distância do plano médio à parte mais alta da superfície). Este recurso possui o objetivo de possibilitar o posterior uso de um recurso denominado “Histograma de Densidade de picos”, que estabelece a concentração de picos da superfície por amplitude. Como na superfície invertida, os vales passam a corresponder a picos, o uso do “Histograma de Densidade de picos” na imagem invertida possibilita analisar a concentração de vales por amplitude, permitindo estabelecer o corte necessário para delimitar a região correspondente ao traço de desgaste.

As Figuras 4.7 e 4.8 ilustram a inversão da superfície selecionada, que é realizada através do uso dos recursos “Operators” e “Symmetries”, sendo escolhida a simetria em relação ao eixo z (eixo que define os picos e os vales).

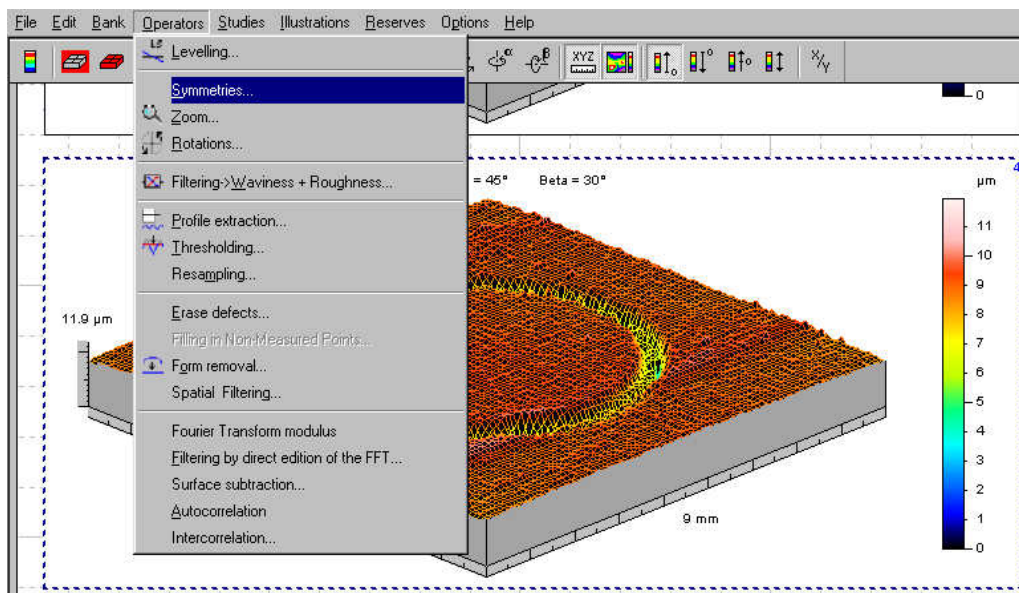


Figura 4.7 - Uso de recursos para a inversão da superfície.

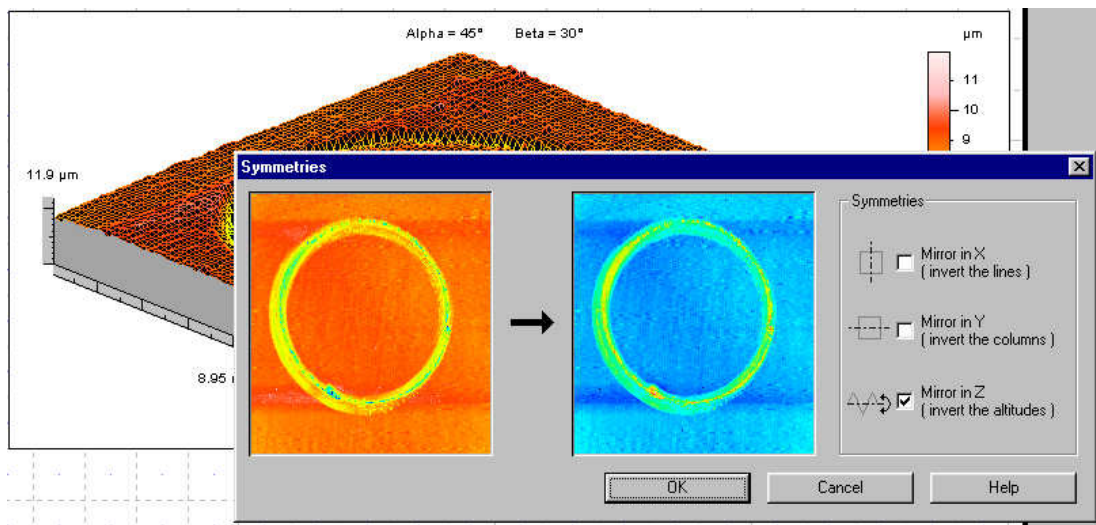


Figura 4.8 - Demonstração da inversão da superfície.

A imagem resultante após a inversão (superfície invertida) está ilustrada na Figura 4.9.

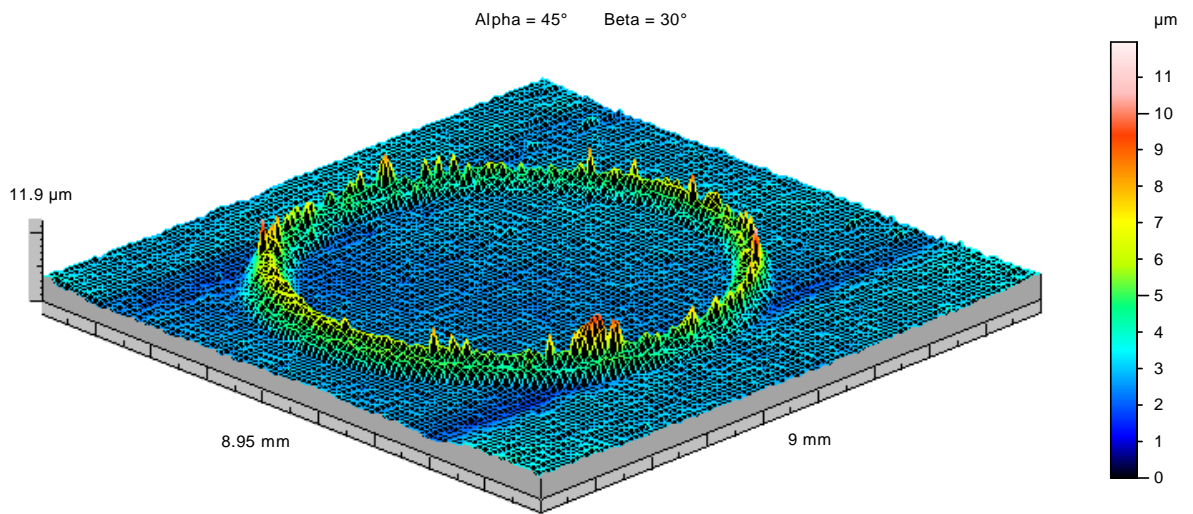


Figura 4.9- Superfície resultante após a inversão do perfil em relação ao eixo z.

4- Obtenção de histogramas da superfície invertida, referentes à densidade de picos (que correspondem aos vales) em função da amplitude desta superfície;

Após a seleção da superfície invertida, os recursos “Studies” e “Peak Count distribution” (Figuras 4.10 e 4.11) são usados, resultando em uma imagem correspondente à concentração de picos (pks/mm^2) em cada amplitude (em μm) da superfície invertida, o que corresponde à concentração de vales em cada amplitude, informação essencial para a posterior delimitação do traço de desgaste. Na Figura 4.11, observa-se que a maior concentração de picos ocorre em amplitudes em torno de 2,8 a 3 μm , que correspondem a vales. Sugere-se que essa faixa de maiores amplitudes significa o início do traço de desgaste (região onde há significativa) concentração de vales, em comparação com os vales correspondentes à rugosidade da superfície.

5-Análise dos histogramas da superfície invertida, para estabelecer a faixa de amplitudes a partir da qual há considerável aumento da densidade de picos, o que corresponde ao aumento da concentração de vales da superfície sem inversão, relativo ao início do traço de desgaste. O valor associado ao início desta faixa foi considerado para a delimitação do traço de desgaste para uma posterior construção de um plano de referência na determinação do volume de desgaste;

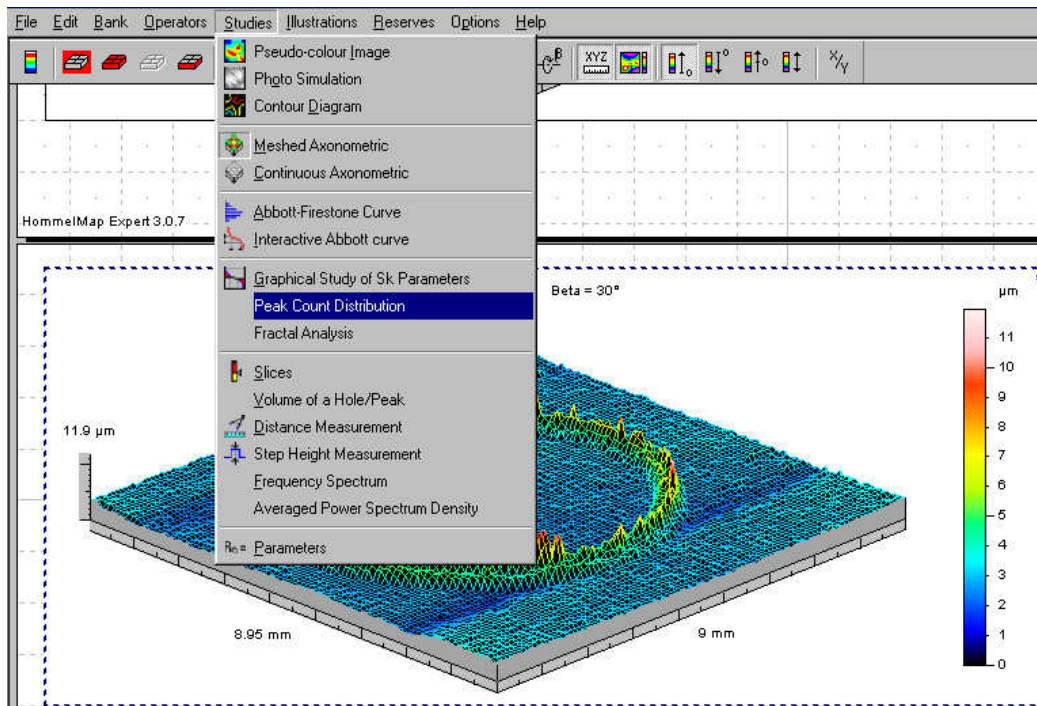


Figura 4.10- Uso de recursos para a distribuição da densidade de picos.

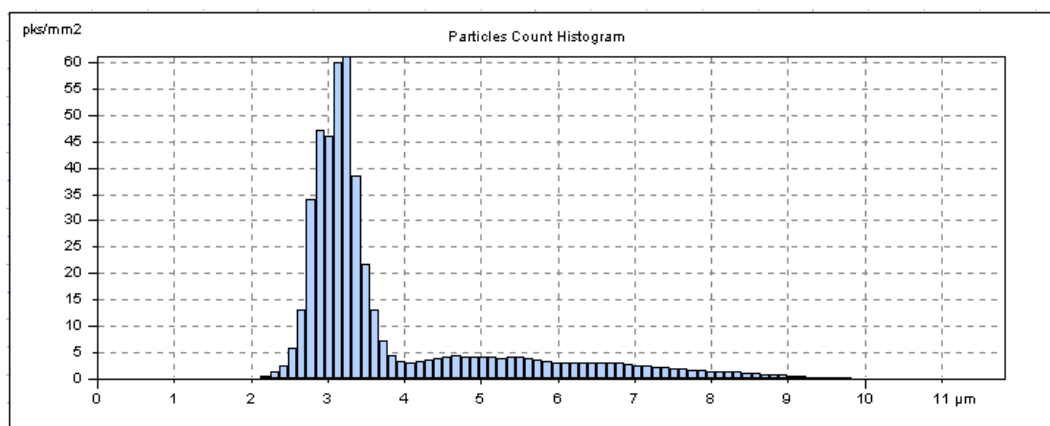


Figura 4.11- Histograma de densidade de picos em uma superfície tridimensional.

6-Realização de um corte na imagem 3D baseando-se no “Histograma de Densidade de Picos da Superfície Invertida”, excluindo a faixa de amplitudes inferiores ao valor correspondente ao início do traço de desgaste;

Após selecionar a imagem demonstrada na Figura 4.11, realizou-se um corte, excluindo as amplitudes inferiores a $2,8 \mu\text{m}$ neste exemplo, correspondentes à região externa ao traço de desgaste. Este procedimento é demonstrado através das Figuras 4.12 e 4.13. Os recursos utilizados na realização do corte são “Operations” e “Thresholding”.

Ressalta-se que o procedimento de corte é realizado através utilização de uma curva de distribuição de material, existente no recurso “Thresholding”. Esta curva, demonstrada na Figura 4.13, é usada na definição de parâmetros que descrevem a rugosidade de uma superfície, através da perfilometria. Estes parâmetros são denominados S_k , S_{pk} e S_{vk} .

Eles são os parâmetros em 3D correspondentes aos parâmetros bidimensionais R_k , R_{pk} e R_{vk} . Os últimos parâmetros são, respectivamente, a profundidade da rugosidade do núcleo, a altura reduzida dos picos e a profundidade reduzida dos vales (MUMMERY, 1992).

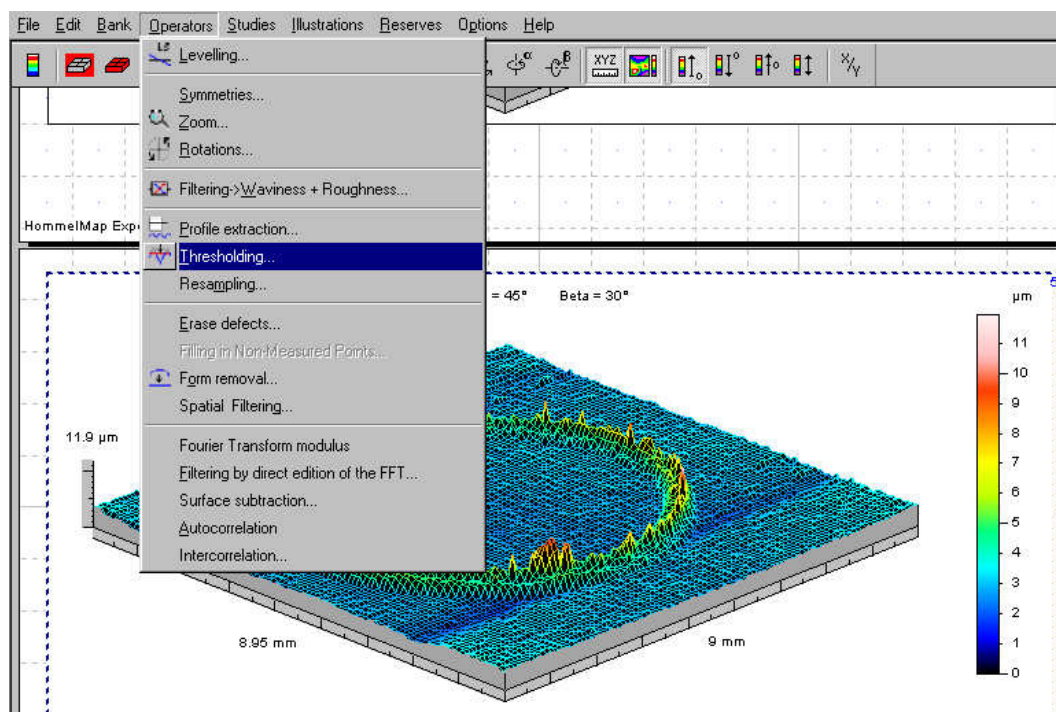


Figura 4.12- Uso de recursos para a realização do corte que delimita o traço de desgaste.

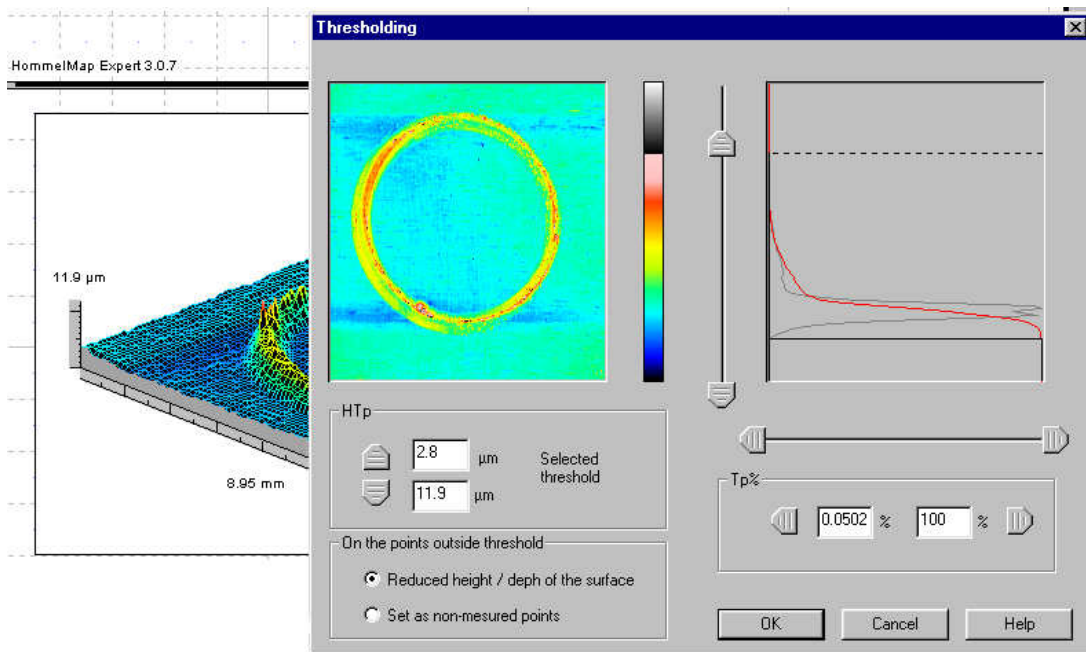


Figura 4.13- Demonstração do corte que delimita o traço de desgaste.

A Figura 4.14 ilustra a superfície resultante após o corte que delimita o traço de desgaste.

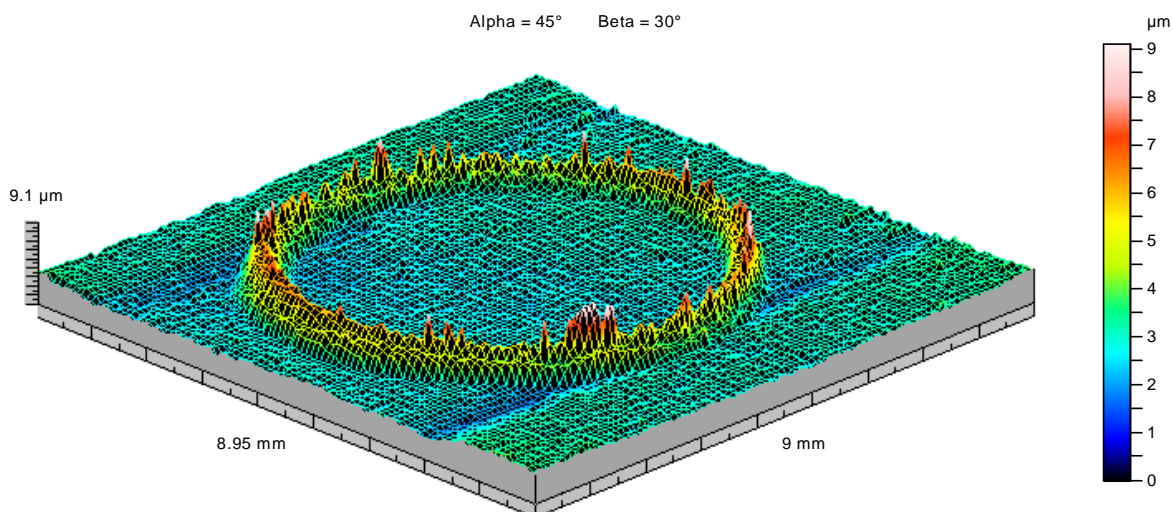


Figura 4.14- Imagem resultante após o corte que delimita o traço de desgaste.

7- Inversão da imagem em relação ao eixo z, para que os picos e os vales da imagem retornem à posição inicial, para posteriormente estimar realmente o volume dos vales e não o volume dos picos;

As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 demonstram a inversão da superfície após o corte em relação ao eixo z (retorno dos picos e vales à posição inicial).

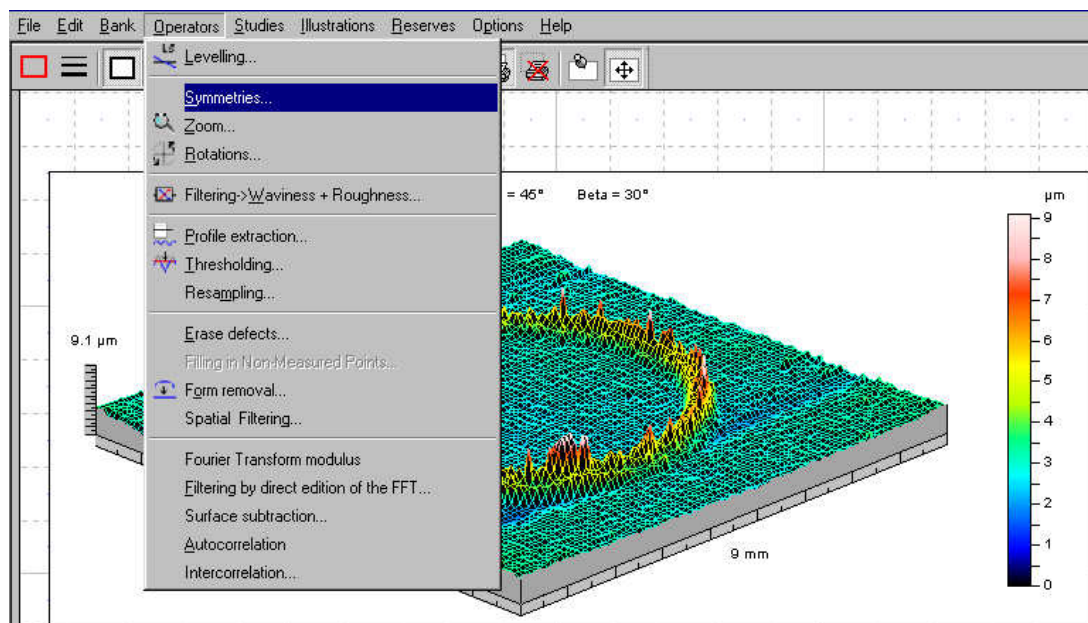


Figura 4.15- Uso dos recursos para o retorno da superfície à posição inicial.

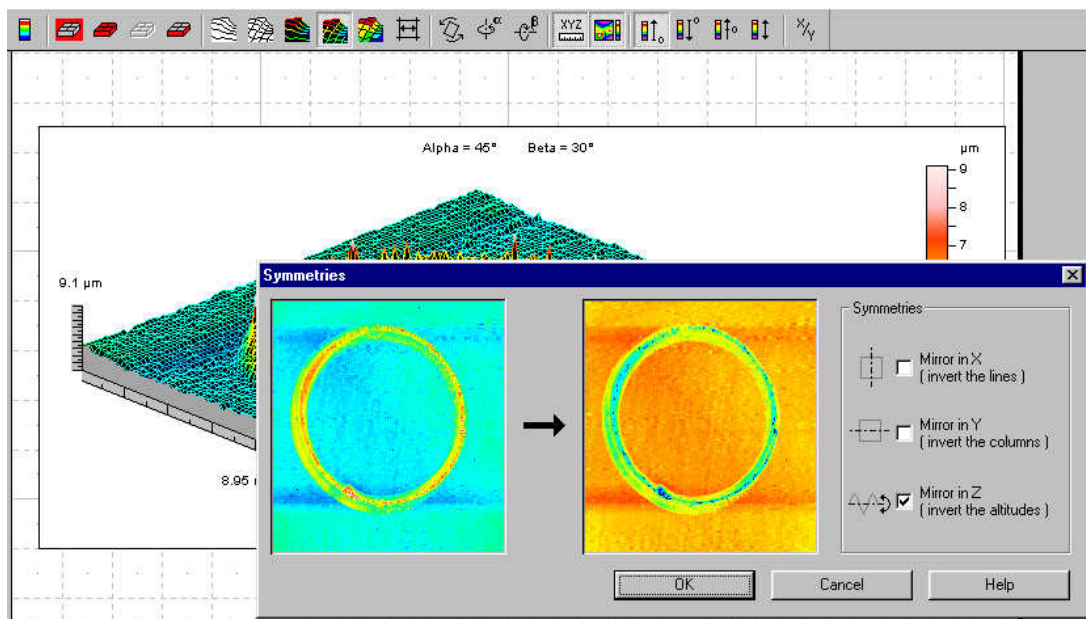


Figura 4.16- Demonstração do retorno da superfície invertida à posição inicial.

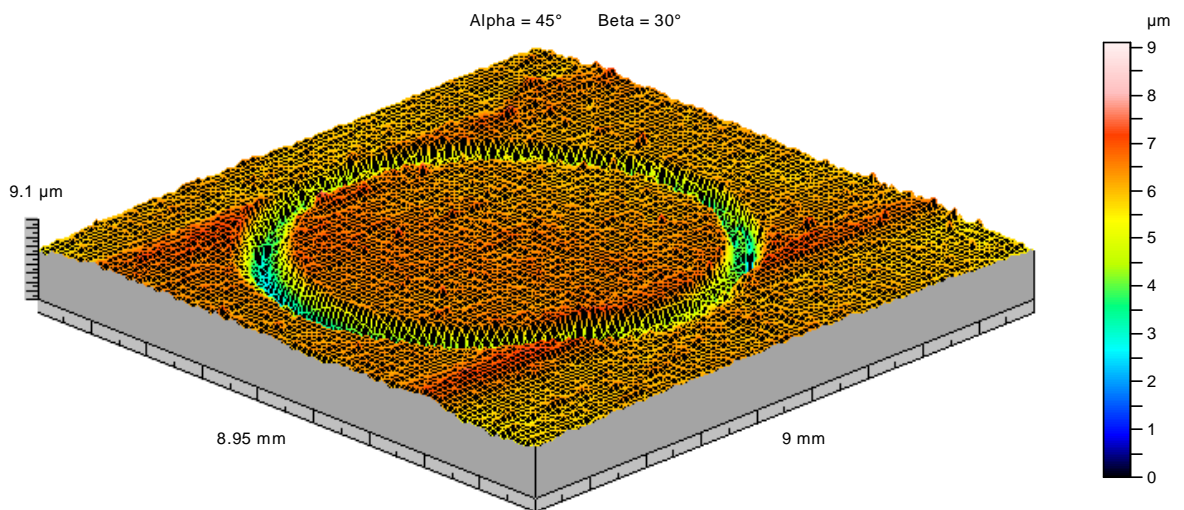


Figura 4.17- Superfície resultante após a inversão para o retorno à posição inicial.

8- Realização de um segundo corte excluindo 10% de material (correspondente aos picos mais altos) na superfície sem inversão (Figura 4.17), para retirar os maiores picos, que

significam a rugosidade da superfície em torno do traço de desgaste. Este corte visa a obter uma superfície lisa ao redor do traço, minimizando a influência da rugosidade superficial na estimativa do volume de desgaste;

As Figuras 4.18, 4.19 e 4.20 ilustram a realização do segundo corte.

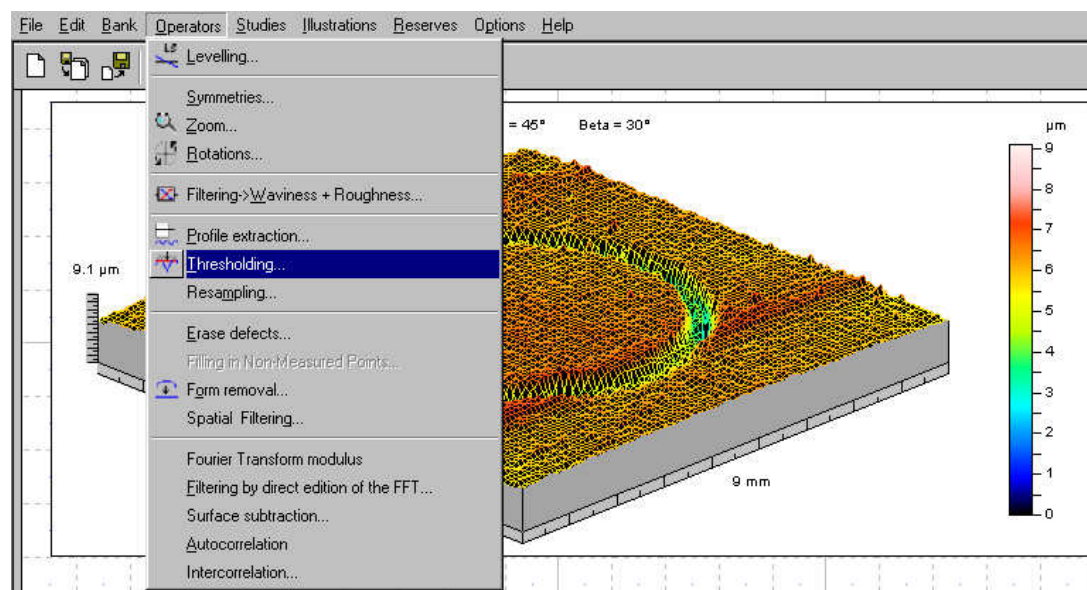


Figura 4.18- Uso de recursos para a realização do segundo corte.

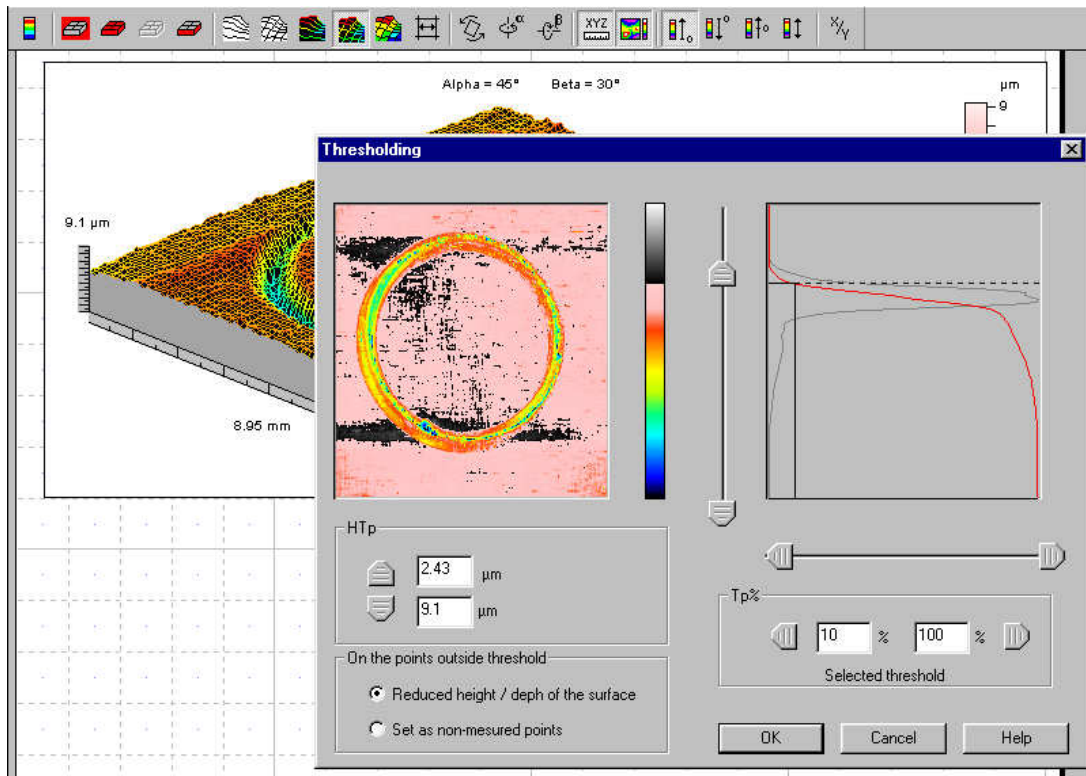


Figura 4.19- Demonstração do segundo corte para delimitar o traço de desgaste.

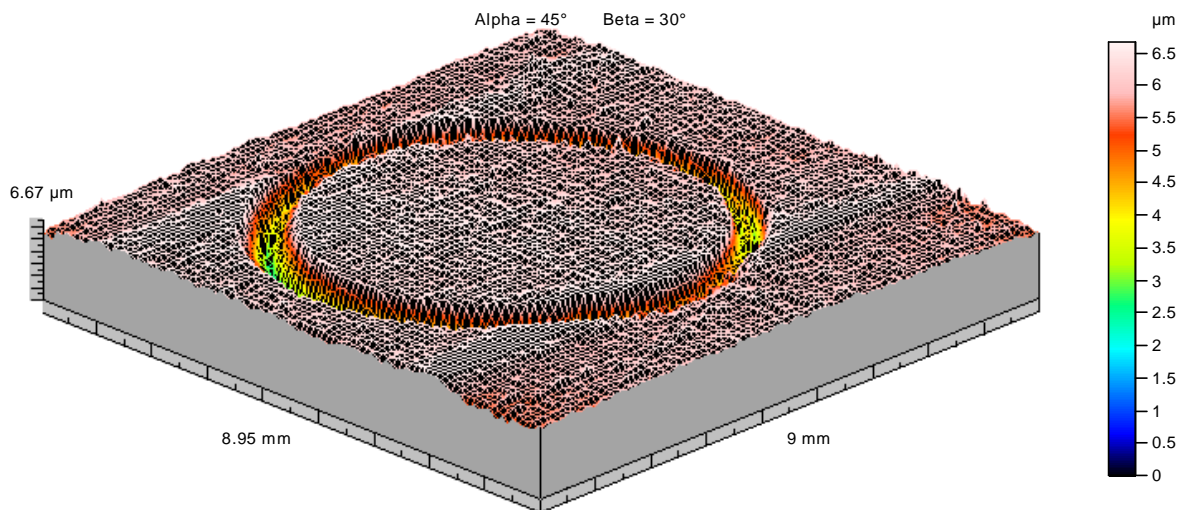


Figura 4.20- Perfil resultante após segundo corte que delimita o traço de desgaste.

9 - Utilização do recurso “Erase Defects” na imagem 3D sem inversão obtida após o segundo corte, para excluir (apagar) todos os picos e vales existentes fora do traço de desgaste, estabelecendo um plano de referência para o cálculo do volume de vales correspondente apenas à região do traço de desgaste;

As Figuras 4.21 a 4.27 demonstram este recurso, que inicia-se com o uso de um círculo posicionado na região onde há o interesse de excluir os picos e vales existentes, em relação à altura máxima da superfície (referência). O círculo é posicionado sobre a região de interesse, obtendo-se a exclusão após o uso do mouse (“clique”) sobre o círculo (Figura 4.23). Vários círculos são feitos sobre a imagem, nas regiões externa e interna ao traço de desgaste, até a exclusão total das irregularidades existentes fora do traço, o que resulta em uma superfície plana ao redor do traço de desgaste (Figura 4.27), possibilitando a posterior estimativa mais precisa do volume de desgaste da superfície.

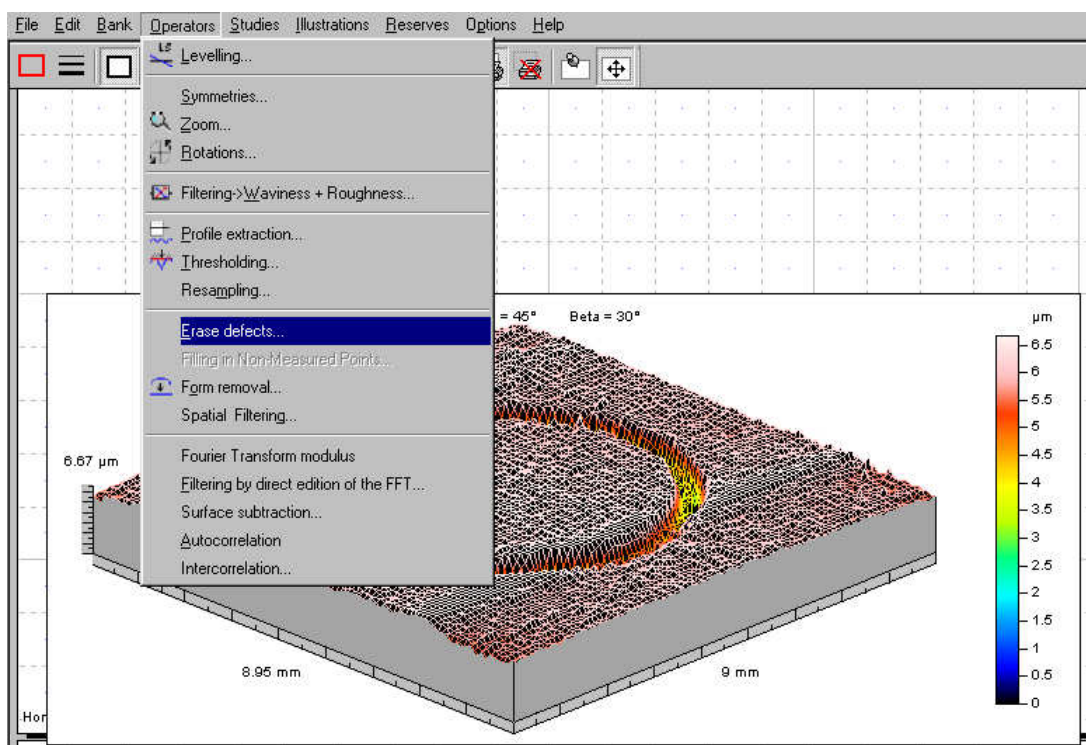


Figura 4.21 - Uso de recursos para excluir picos e vales localizados fora do traço de desgaste.

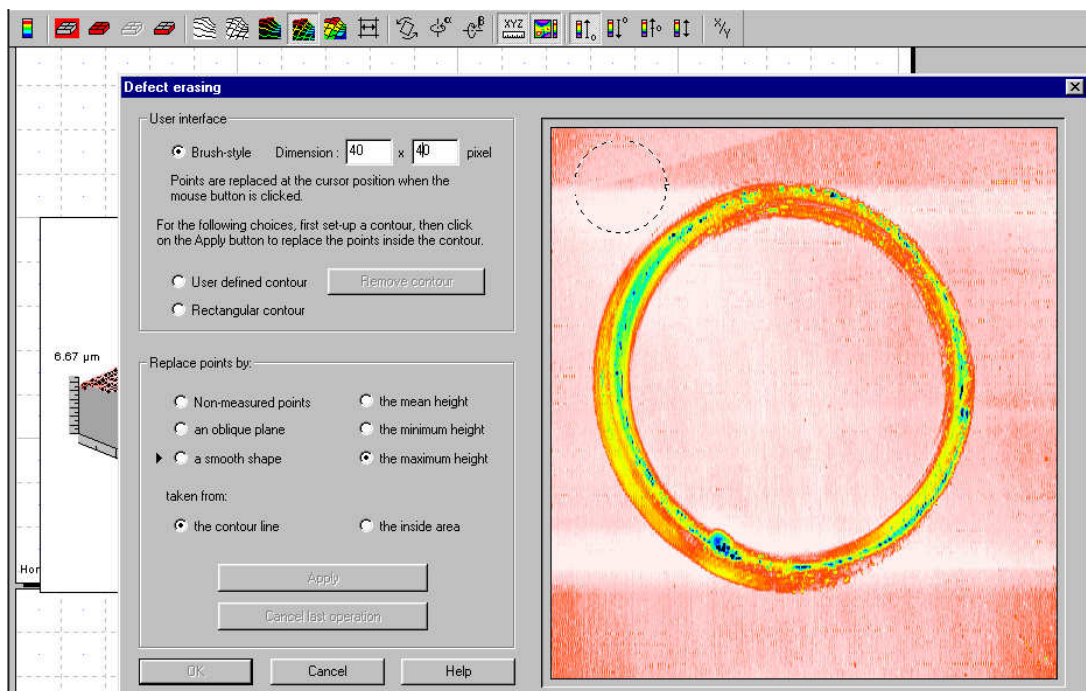


Figura 4.22 – Escolha da região de exclusão de picos e vales externa ao traço de desgaste, em relação à altura máxima da superfície.

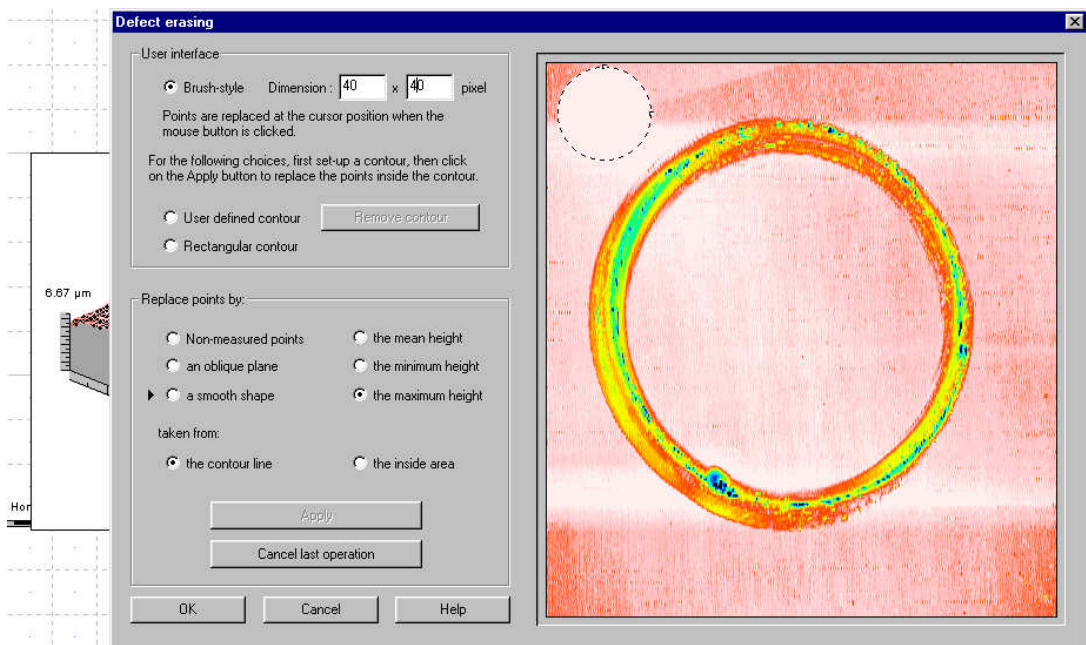


Figura 4.23- Demonstração da exclusão de picos e vales na região externa ao traço de desgaste.

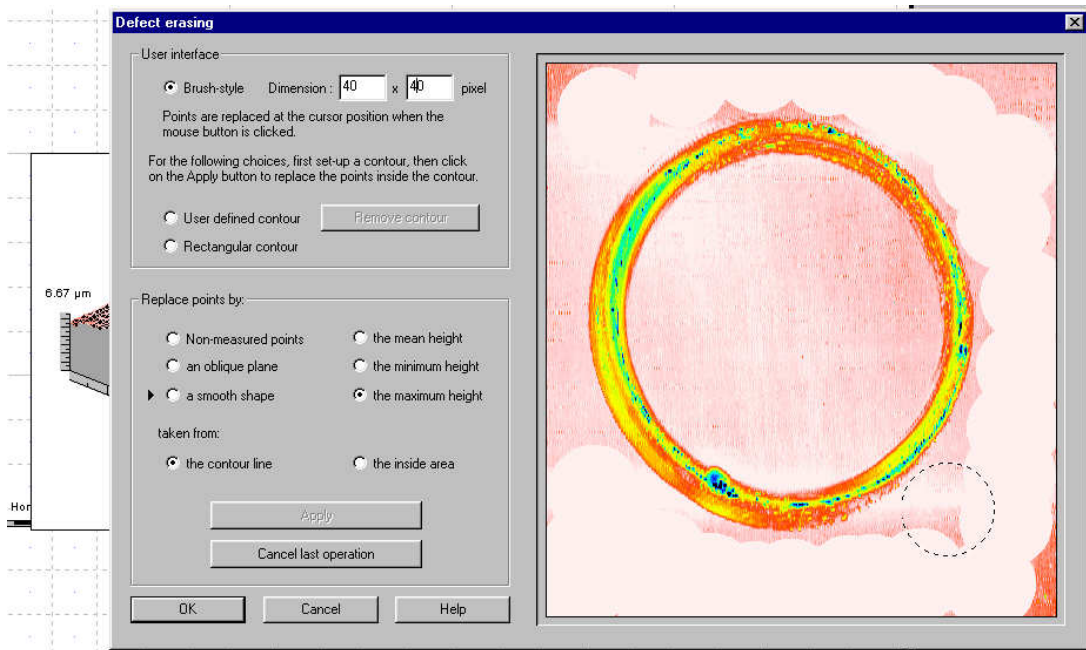


Figura 4.24- Demonstração do avanço da exclusão de picos e vales na região externa ao traço de desgaste.

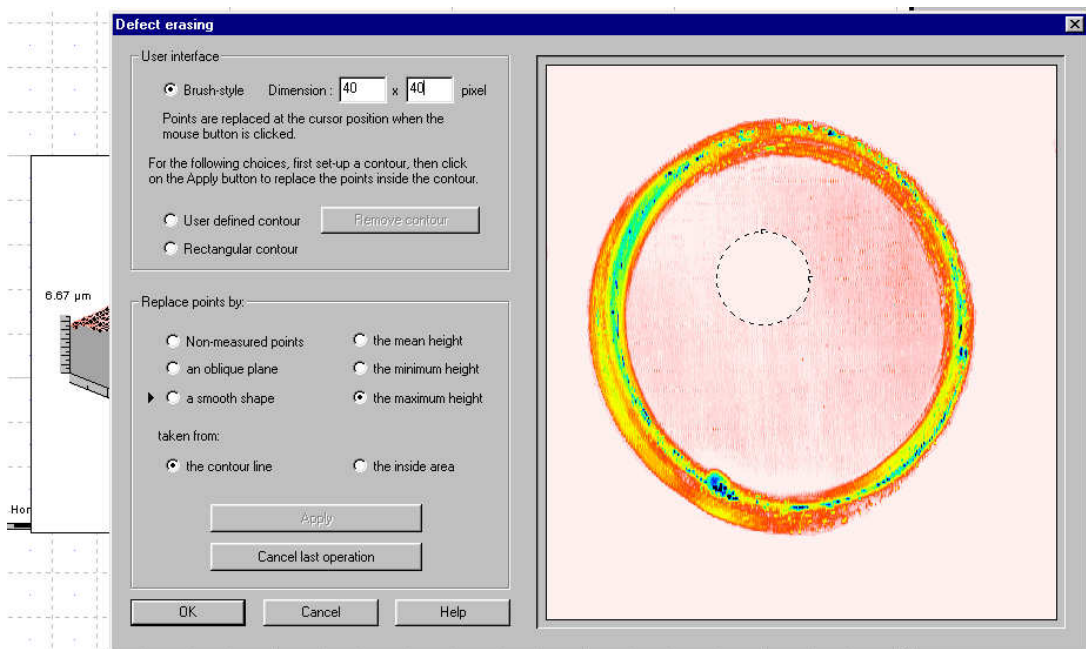


Figura 4.25- Demonstração da exclusão de picos e vales na região interna ao traço de desgaste.

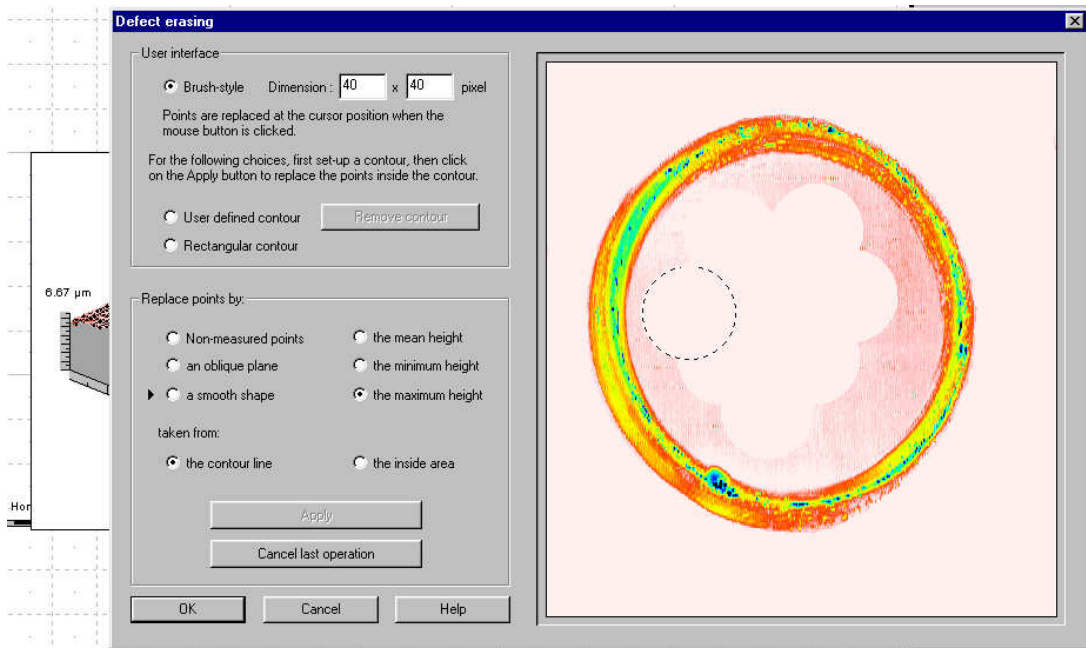


Figura 4.26- Demonstração do avanço da exclusão de picos e vales na região interna ao traço de desgaste.

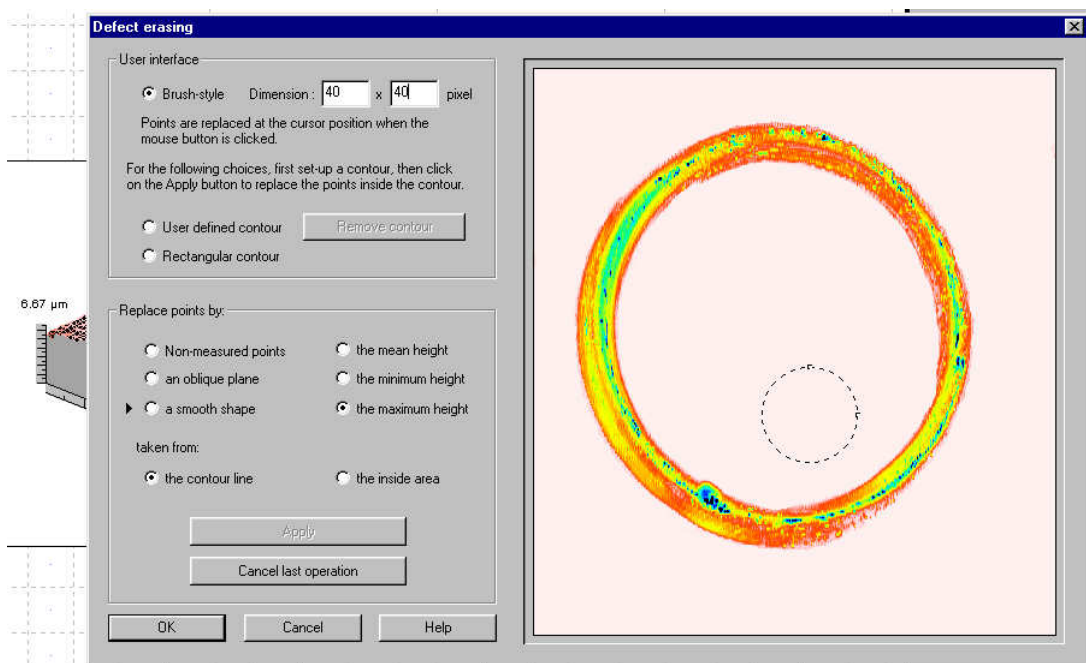


Figura 4.27- Demonstração da superfície final após a exclusão das irregularidades fora do traço de desgaste.

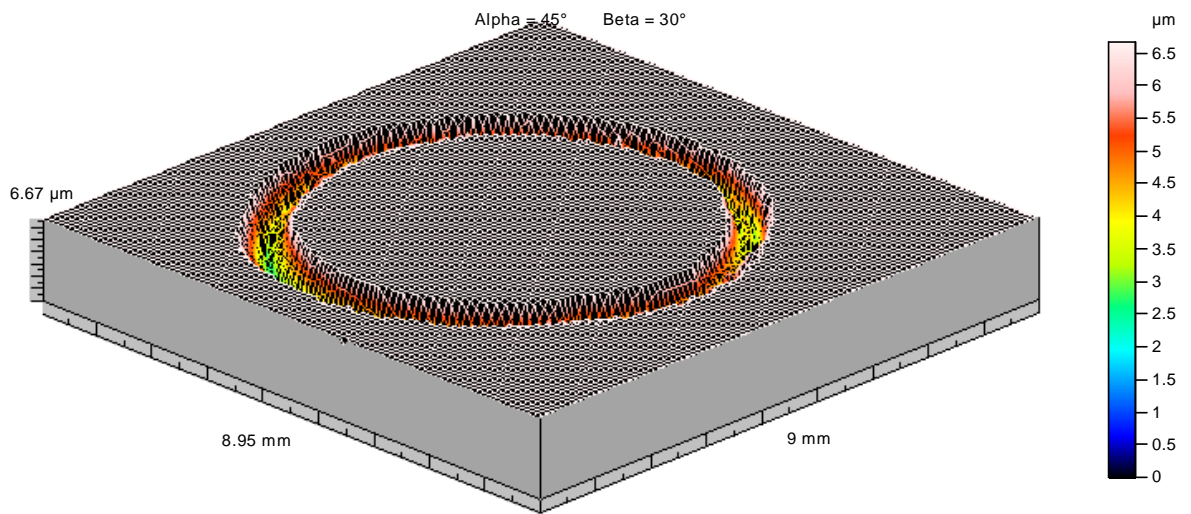


Figura 4.28- Superfície resultante após exclusão das irregularidades existentes fora do traço de desgaste.

10- Utilização de um recurso do cálculo de volume de vales através do procedimento do plano de mínimos quadrados do software MountainsMap 3.0. Estimou-se o volume de vales do traço de desgaste, selecionando-se o perfil da Figura 4.28, com o uso posterior dos recursos “Studies” e “Volume of a Hole/Peak” (Figuras 4.30 a 4.33). Foi selecionada uma área da superfície para a aplicação do recurso, através do uso do “clique com o mouse”, sobre a região de interesse. Escolheu-se o método do “Plano de Mínimos Quadrados” para estimar o volume de picos e vales da área selecionada.

O cálculo do volume considera que cada ponto da superfície selecionada é suposto como uma coluna retangular, em que a base da superfície é definida de acordo com os eixos X e Y. Cada coluna possui um volume elementar entre duas altitudes. O volume dos picos e vales corresponde à soma dos volumes elementares calculados para cada coluna.

No método do “Plano de Mínimos Quadrados” (Figura 4.29), o volume calculado é o incluído entre a base dos vales e o plano P ou o topo dos picos e o plano P, onde P é o Plano de Mínimos Quadrados calculado em todos os pontos externos à região selecionada. Este método é aplicado quando a área externa ao traço é suficientemente lisa para se

considerada como o topo dos vales ou como a base dos picos, por extrapolação. (HOMMELMAP 4.0. Help do software Mountains).

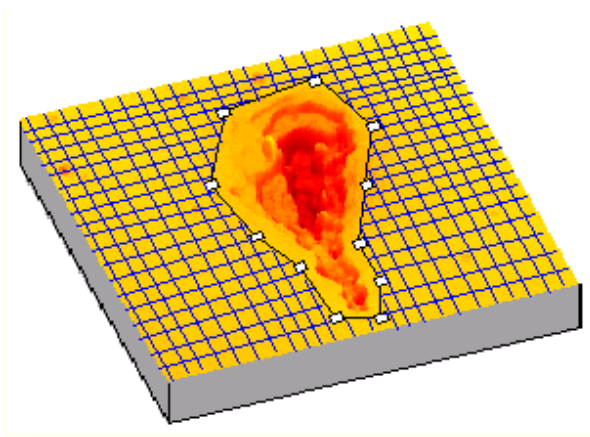


Figura 4.29- Ilustração do método do “Plano de Mínimos Quadrados”.

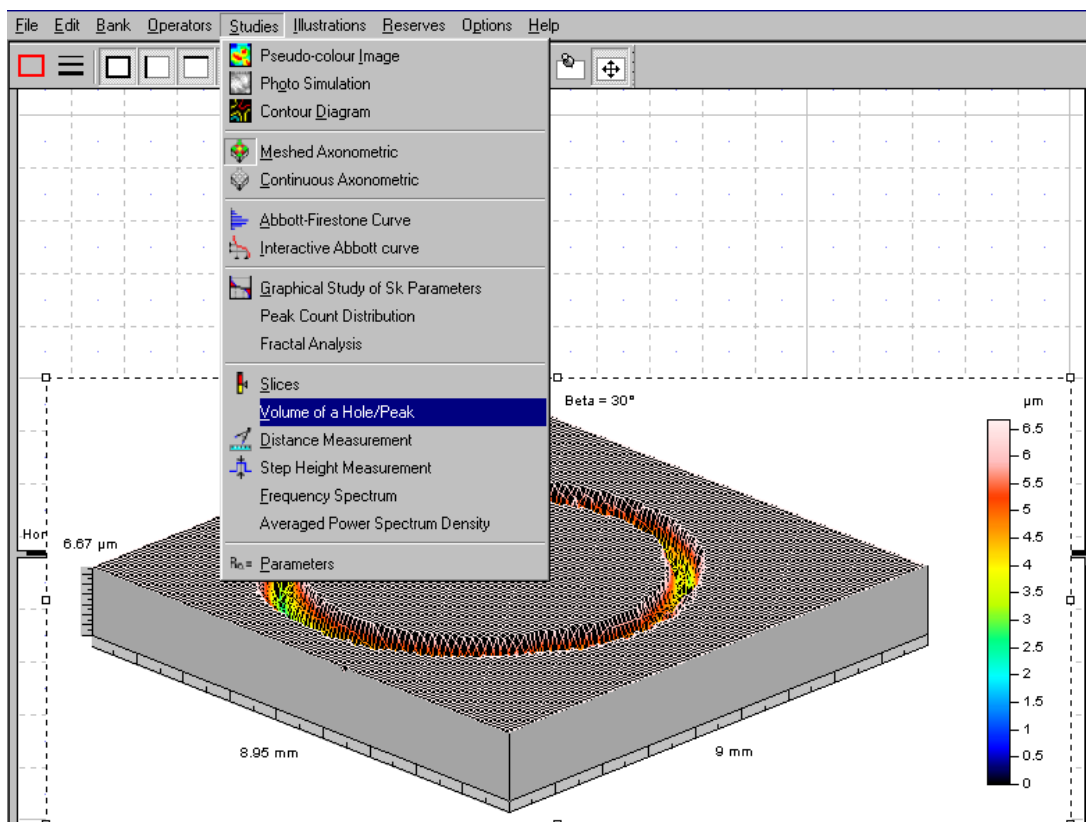
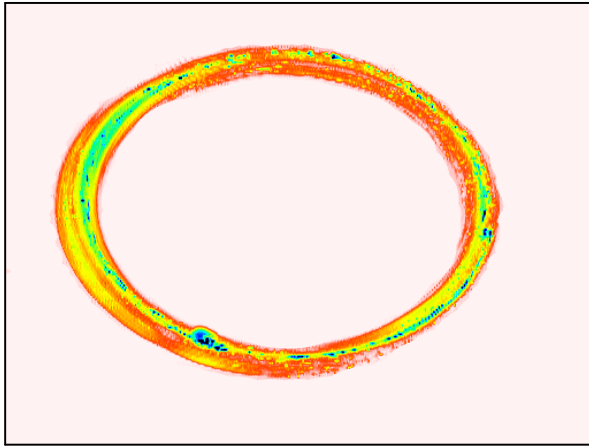


Figura 4.30- Uso de recursos para a estimativa do volume de desgaste.



Compute volume

Figura 4.31- Demonstração da superfície utilizada para estimar o volume de desgaste.

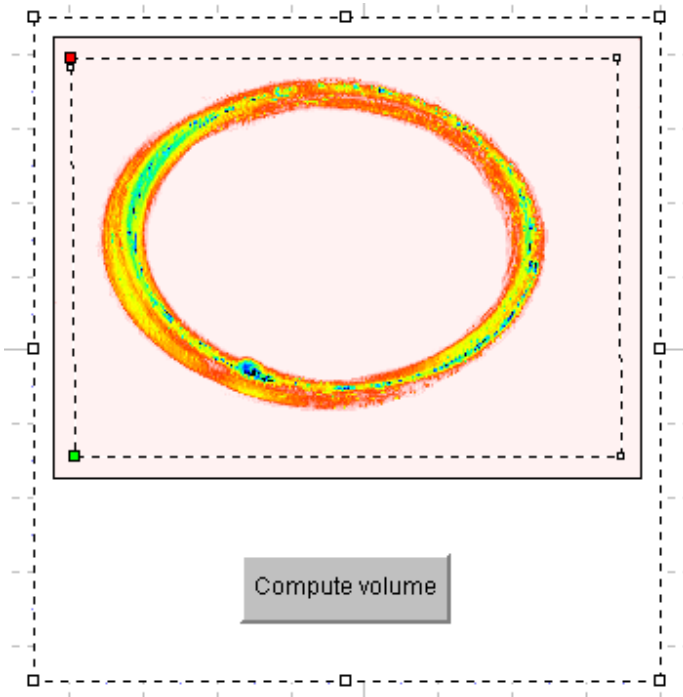


Figura 4.32- Seleção da superfície utilizada para estimar o volume de desgaste.

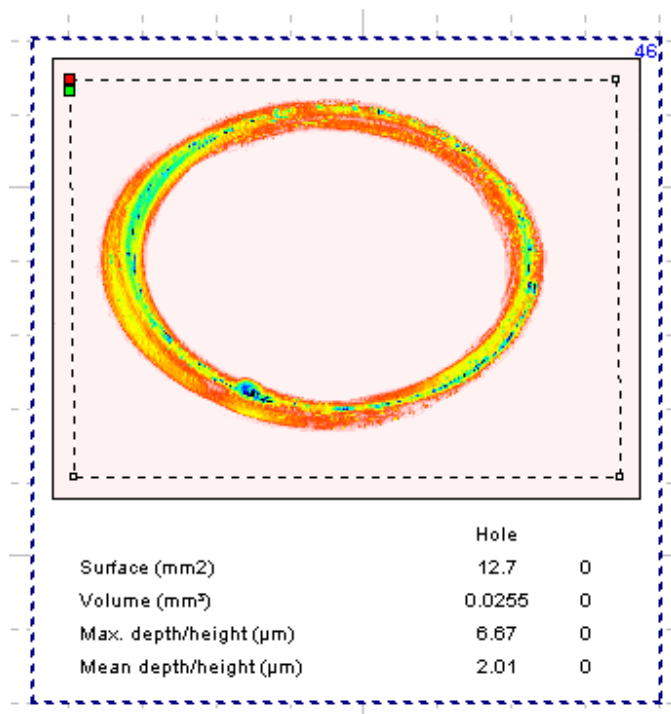


Figura 4.33- Obtenção do volume de desgaste.

Estabeleceu-se que o volume de desgaste estimado para cada sistema estudado corresponde à média de três valores de volumes calculados a partir de três testes de desgaste (um teste e duas réplicas).

A partir do volume obtido por perfilometria, estimou-se a taxa de desgaste Q dos sistemas estudados através do quociente entre o volume e a distância de deslizamento (HUTCHINGS, 1992). Também foram calculados os coeficientes de desgaste adimensional e dimensional (HUTCHINGS, 1992), utilizando-se a carga aplicada (7 N) e todas as durezas HIT medidas para os sistemas estudados.

A metodologia elaborada para determinar o volume de desgaste por perfilometria foi comparada à metodologia descrita pela Norma ASTM G 99-05, para avaliar a aplicabilidade e confiabilidade da metodologia proposta neste trabalho. Assim, estimou-se e comparou-se os valores dos volumes de desgaste dos sistemas através das duas metodologias.

Para calcular o volume de desgaste através da metodologia descrita pela Norma (item 3.1), foi utilizado o recurso “Distância de Medição” do software Mountains, que fornece as distâncias horizontal e oblíqua entre dois pontos pertencentes ao traço de desgaste e que são selecionados. Fixando os dois pontos nas extremidades do traço de desgaste, a sua distância horizontal e oblíqua correspondem à largura do traço de desgaste (Figuras 4.34 e 4.35). Realizou-se quatro medições da largura de cada traço de desgaste, sendo determinada a largura média do traço para o cálculo do volume de desgaste. Considerando os três testes de desgaste realizados em cada sistema, obteve-se o volume médio, em relação aos volumes estimados através da metodologia proposta pela Norma. Para a obtenção deste volume (item 3.1), utilizou-se os valores de 3 mm para o raio do traço de desgaste (confirmado através da distância horizontal- Figura 4.37) e 3 mm para o raio da esfera de Si_3N_4 (contra-corpo).

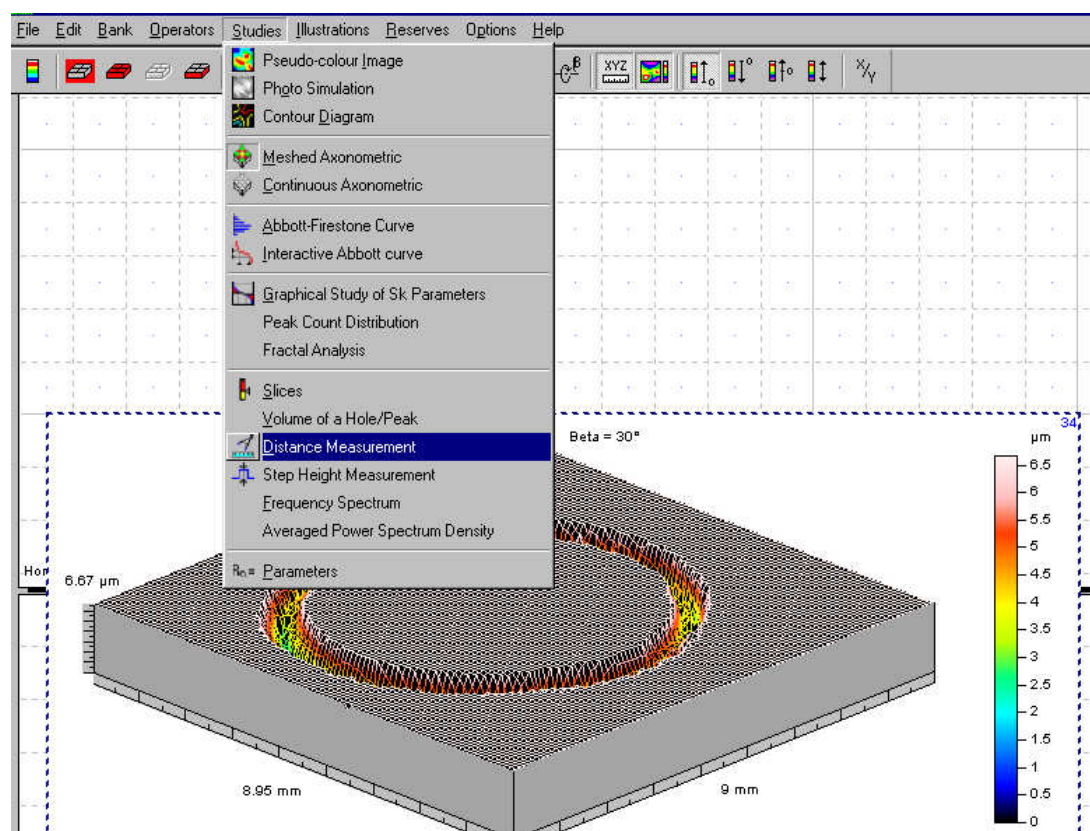
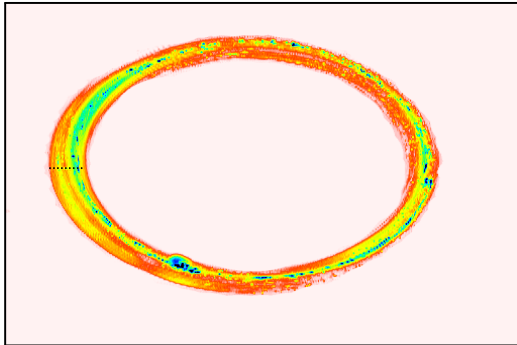
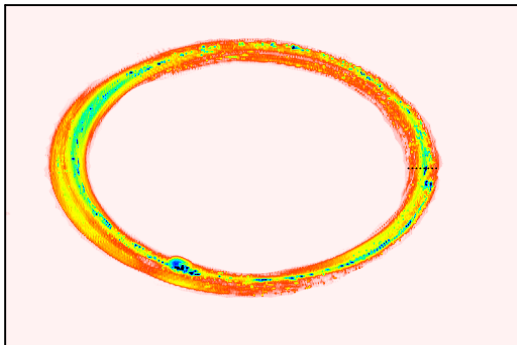


Figura 4.34- Uso do recurso de distância de medição.



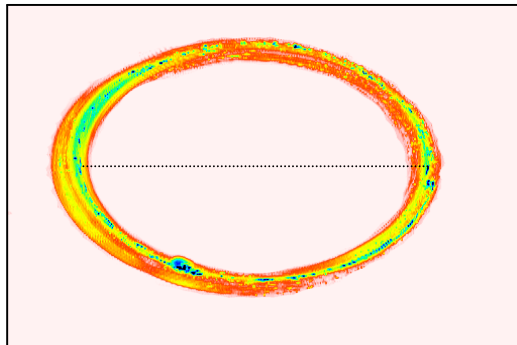
Cursor 1	Cursor 2
X = 0.783 mm	X = 1.36 mm
Y = 4.37 mm	Y = 4.37 mm
Z = 5.52 μm	Z = 4.36 μm
Horizontal distance	0.58 mm
Variation in height	1.17 μm
Oblique distance	0.58 mm

Figura 4.35- Determinação da largura do traço de desgaste.



Cursor 1	Cursor 2
X = 7.02 mm	X = 7.57 mm
Y = 4.32 mm	Y = 4.32 mm
Z = 6.11 μm	Z = 6.67 μm
Horizontal distance	0.545 mm
Variation in height	0.561 μm
Oblique distance	0.545 mm

Figura 4.36- Segunda determinação da largura do traço de desgaste.



Cursor 1	Cursor 2
X = 1.33 mm	X = 7.33 mm
Y = 4.27 mm	Y = 4.27 mm
Z = 3.87 μm	Z = 0 μm
Horizontal distance	6 mm
Variation in height	3.87 μm
Oblique distance	6 mm

Figura 4.37- Estimativa e confirmação do diâmetro do traço de desgaste.

4.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

4.8.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) antes do desgaste

Para diferenciar os filmes dos conjugados estudados em relação ao teor de alumínio, foi realizada uma análise de composição química de área no microscópio eletrônico através da ferramenta EDS, em duas regiões dos conjugados estudados utilizando o equipamento Microsonda THERMO NORAN, modelo QUEST. Foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura da JEOL JSM 6360LV, do Laboratório de Microscopia Eletrônica e de Varredura do Departamento de Engenharia Metalúrgica de Materiais da UFMG. Os elementos analisados foram Ti e Al, sendo determinadas as suas porcentagens atômicas.

4.8.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) após o desgaste

Utilizou-se a técnica de MEV após o desgaste para a obtenção de imagens de composição por raios-x dos traços de desgaste (aumento 100 X), possibilitando verificar a presença ou ausência do elemento do filme (Al) e do substrato (Fe), no interior e em torno do traço de desgaste dos conjugados estudados. Também foi verificada a presença de Si (elemento da esfera) no interior e em torno dos traços de desgaste, para detectar a existência ou não de adesão da esfera. Esta análise objetivou avaliar e comparar a intensidade do desgaste dos sistemas estudados.

Para validar a metodologia proposta por perfilometria (cálculo do volume de desgaste, detalhado no item 4.7), obteve-se também imagens de composição por raios-x (aumento 100 X) dos traços de desgaste dos conjugados do aço não temperado, após o desgaste contra WC-Co, sendo verificada a presença de Al, Fe e W (elemento da esfera) no interior e ao redor dos traços de desgaste.

CAPÍTULO 5 : RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Difração de raios X (DRX)

Nos difratogramas obtidos para os conjugados do aço AISI H13 temperado e revenido (Figuras 5.1 a 5.3), foram identificadas as fases Fe- α ou Fe-CCC e Cr₇C₃ ortorrômbico, características do aço AISI H13 temperado e revenido (KRAUSS, 1993).

O filme do conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN / AISI H13 temperado e revenido cristalizou-se nas fases Ti_{1-x}Al_xN- CFC e Ti_{1-x}Al_xN- Hexagonal, sendo portanto, bifásico. O conjugado AA Ti_{1-x}Al_xN / AISI H13 apresentou o filme monofásico (fase Ti_{1-x}Al_xN- Hexagonal). Assim, conclui-se que a quantidade de alumínio presente no filme do conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN / AISI H13 tratado deve estar em torno de 60 a 70% atômico, fixando-se a quantidade de nitrogênio e considerando 50% da composição do filme (teor de alumínio correspondente à região bifásica). Também sugere-se que o filme do conjugado AA Ti_{1-x}Al_xN / AISI H13 tratado deve apresentar quantidade de alumínio (Figuras 3.1 e 3.2) superior a 70% atômico em 50% da composição de filme (teor de alumínio correspondente à fase hexagonal) (KIMURA, 2003; ZHOU, 1999; IKEDA, 1991).

A diferença estrutural existente entre os filmes BA e AA Ti_{1-x}Al_xN, evidencia diferença em relação a propriedades, como a dureza e o módulo de elasticidade, sugerindo diferentes respostas dos conjugados do aço H13 temperado e revenido em desgaste (ZHOU, 1999; IKEDA, 1991).

Os difratogramas relacionados ao aço H13 não temperado e seus conjugados (Figuras 5.4 a 5.6) evidenciam que o aço H13 não temperado apresenta as mesmas fases do aço H13 temperado e revenido, sendo o pico mais intenso correspondente à fase Fe- CCC (110) em ambos (CALLISTER, 2002; CULLITY, 1978).

O difratograma do conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN / AISI H13 não tratado demonstra que o filme deste conjugado apresenta-se monofásico com fase Ti_{1-x}Al_xN-CFC, que corresponde ao

pico mais intenso. O filme do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13 não tratado é bifásico, com estruturas $Ti_{1-x}Al_xN$ -CFC e hexagonal, sugerindo propriedades diferentes destes filmes como a dureza, o que provavelmente acarretará diferença de desempenho em desgaste (ZHOU, 1999; IKEDA, 1991). Conclui-se que os teores de alumínio dos filmes dos conjugados BA $Ti_{1-x}Al_xN$ e AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não tratado sejam, respectivamente até em torno de 60% atômico de alumínio (teor relacionado à faixa monofásica) e em torno de 60 a 70% atômico (teor relacionado à faixa bifásica), fixando-se a quantidade de nitrogênio e considerando 50% da composição do filme (Figuras 3.1 e 3.2) (KIMURA, 2003; ZHOU, 1999; IKEDA, 1991).

Os resultados da análise de DRX corroboram a existência de filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ monofásicos (estrutura CFC), bifásicos (estruturas CFC e hexagonal) e monofásicos (estrutura hexagonal).

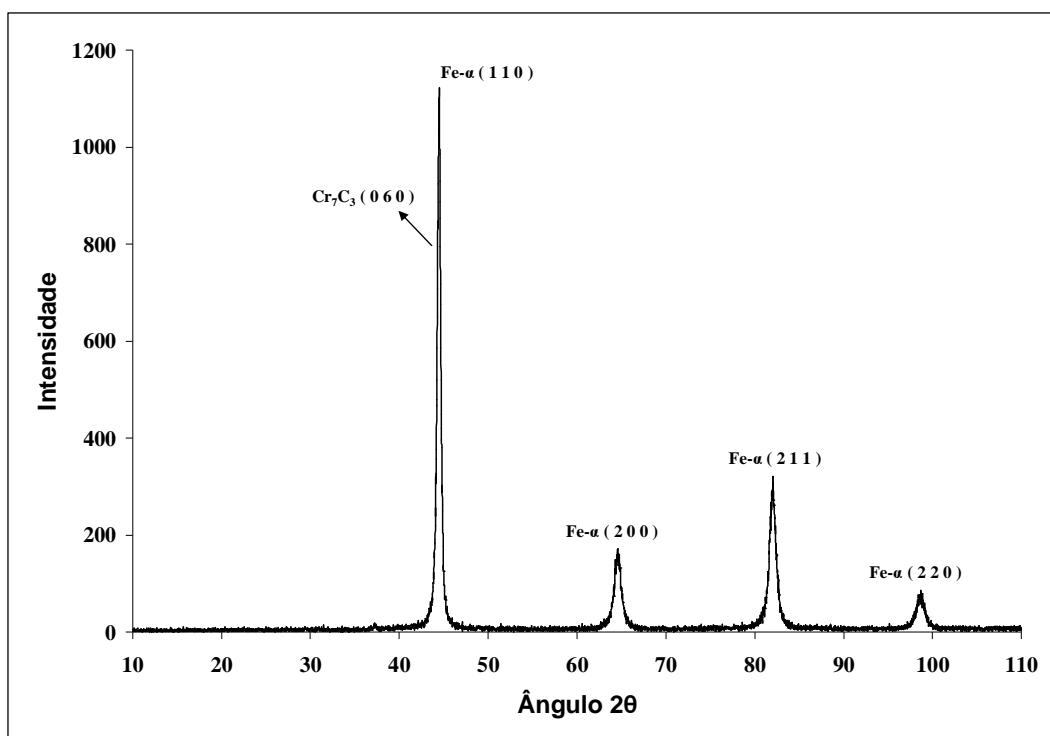


Figura 5.1- Difratograma do aço AISI H13 temperado e revenido.

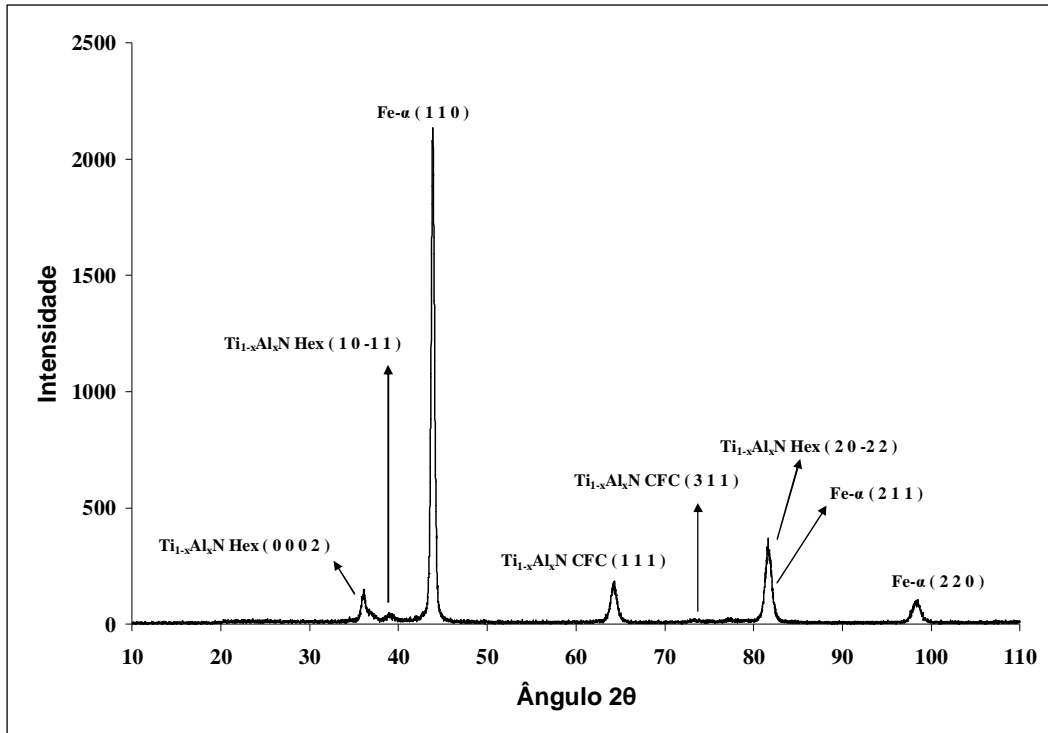


Figura 5.2 - Difratoograma do conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN /AISI H13 temperado e revenido.

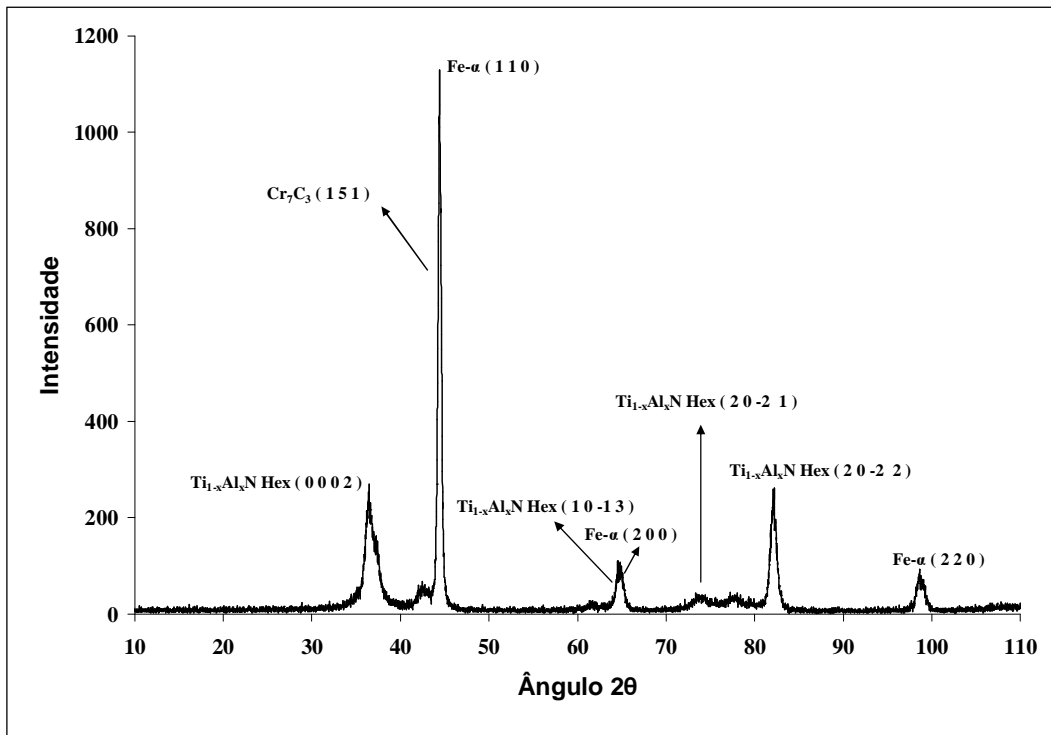


Figura 5.3- Difratoograma do conjugado AA Ti_{1-x}Al_xN /AISI H13 temperado e revenido.

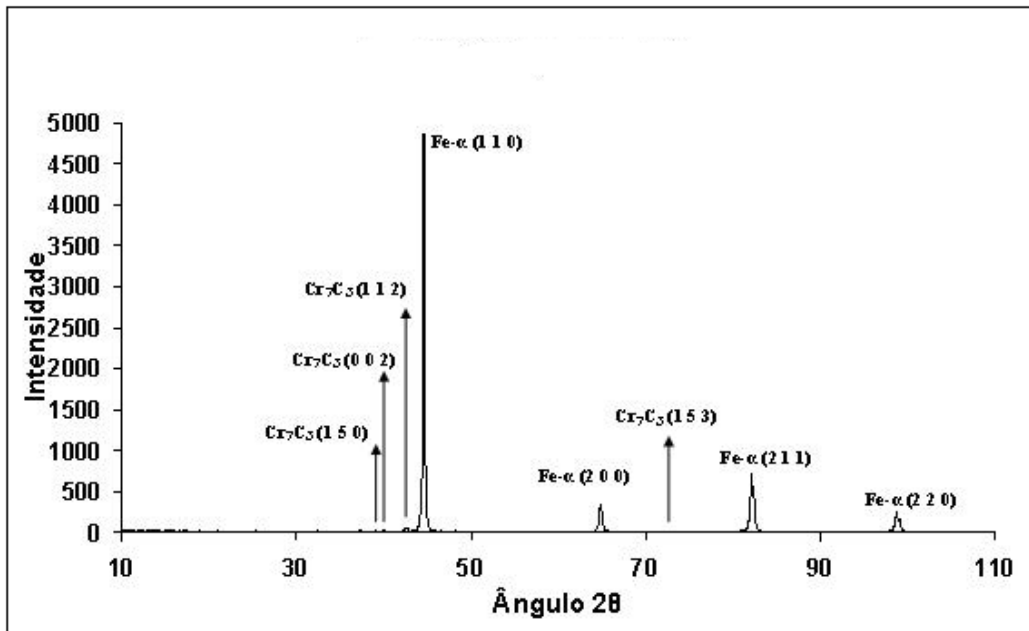


Figura 5.4 - Difratoograma do aço AISI H13 não temperado.

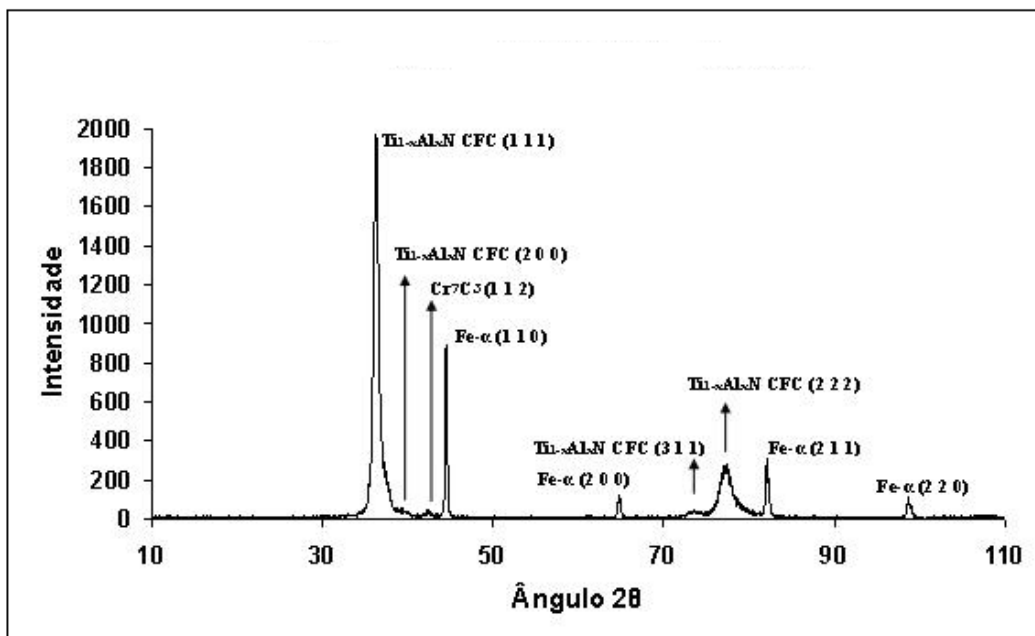


Figura 5.5- Difratoograma do conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN / AISI H13 não temperado.

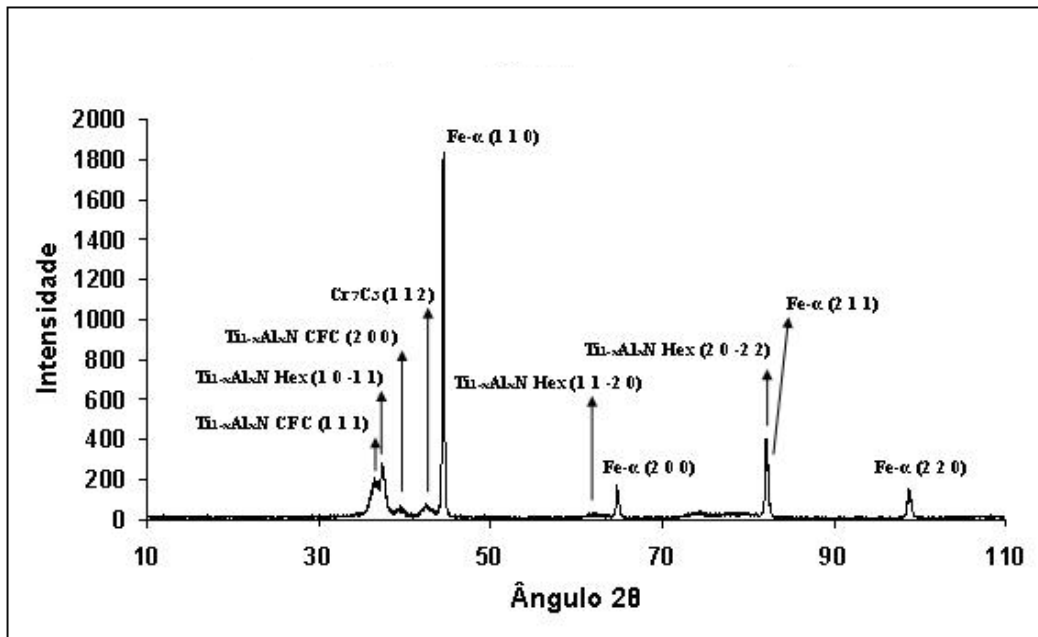


Figura 5.6- Difratoograma do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13 não temperado.

5.2 Teste de adesão Rockwell C

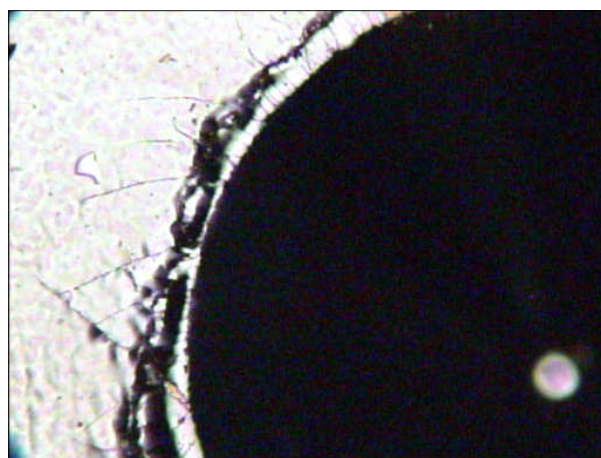
De acordo com as imagens de microscopia óptica (Figura 5.7) obtidas após os testes de adesão, considerando os sistemas do aço H13 não temperado, observa-se que o filme BA $Ti_{1-x}Al_xN$ monofásico CFC apresentou melhor adesão ao aço H13 não temperado que o filme AA $Ti_{1-x}Al_xN$ bifásico, o que é evidenciado pela maior delaminação do segundo filme em relação ao primeiro (considerando a comparação de duas regiões de detalhes das trincas), sendo a comparação baseada na Figura 4.1.

Em relação aos sistemas do aço temperado e revenido (Figura 5.8), observa-se que ambos os filmes BA (bifásico) e AA (monofásico hexagonal) $Ti_{1-x}Al_xN$ apresentaram boa adesão ao substrato H13 temperado e revenido (considerando a comparação de duas regiões de detalhes das trincas). Este fato deve ser considerado na comparação entre o desempenho destes conjugados em desgaste.

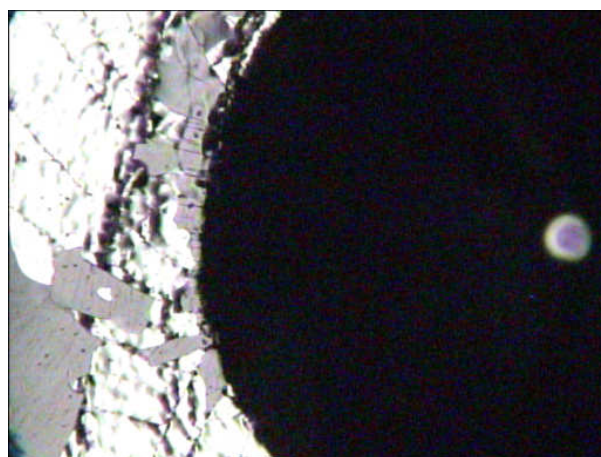
Ambas as imagens demonstram que as trincas apresentam-se circulares. Recobrimentos podem desenvolver trincas que se propagam inteiramente no filme (trincas coesivas) ou trincas que se propagam ao longo da interface filme-substrato (trincas adesivas). Para trincas coesivas, dois diferentes comportamentos podem ser usualmente observados, dependendo das características do sistema e da indentação. Um arranjo de trincas circulares é desenvolvido sob a ação de tensões radiais. Se as tensões tangenciais predominarem, trincas radiais ocorrerão preferencialmente. Em alguns casos, a dureza do substrato é usada como indicador do tipo de trinca coesiva que será formada. Estudos anteriores evidenciaram que substratos mais macios favorecem trincas circulares, enquanto trincas radiais ocorrem preferencialmente em substratos mais duros (PIANA, 2005). Assim, os resultados obtidos para os padrões de trinca dos conjugados estudados evidenciam que os conjugados de substrato aço AISI H13 (mais macio em relação a outros substratos, como o metal duro-WC-Co (DUCROS, 2003) tiveram trincas circulares, indicando que a dureza do substrato influenciou os padrões de trinca.

Ressalta-se que as imagens dos conjugados do aço H13 temperado e revenido (Figura 5.8) demonstram que as trincas do conjugado BA (filme bifásico) apresentam espaçamento

inferior às do conjugado AA (filme monofásico hexagonal), sugerindo que o conjugado BA é menos tenaz ou mais duro (ZHANG, 2005), fato que provavelmente influenciará o seu desempenho em desgaste. As imagens do teste de adesão também demonstram que as indentações realizadas nos conjugados do aço não temperado foram bem maiores que as indentações nos conjugados do aço temperado e revenido, o que sugere a influência da dureza do substrato, sendo o aço temperado e revenido mais duro que o aço não temperado.

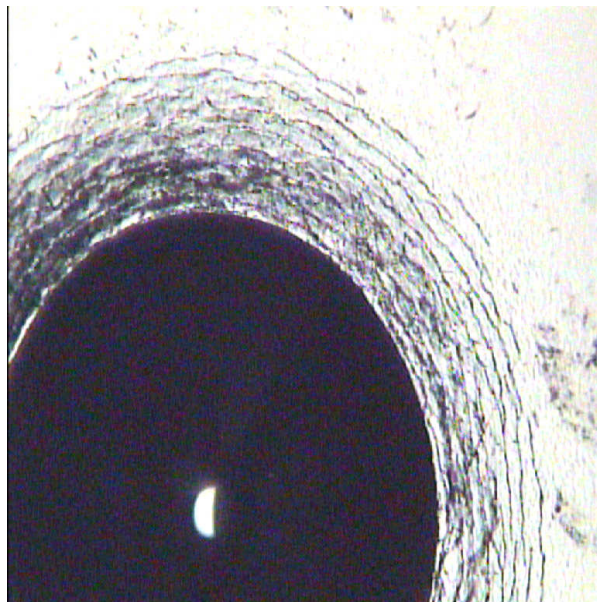


a)

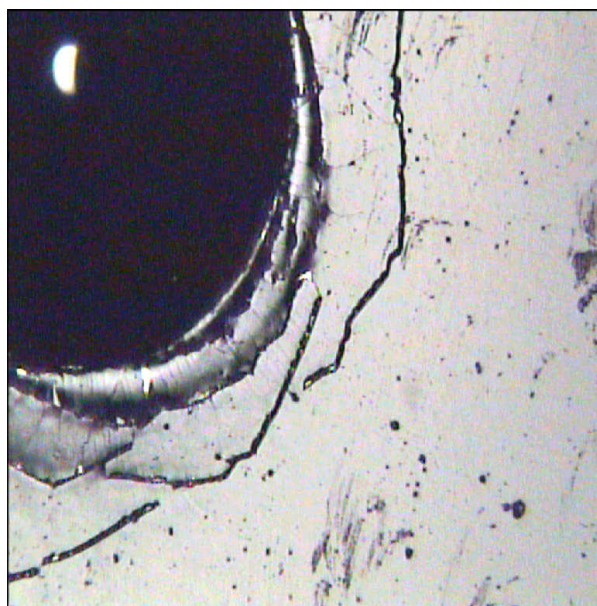


b)

Figura 5.7- Imagens de microscopia óptica dos testes de adesão Rockwell C dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ em AISI H13 não temperado. 150 Kgf (100X) a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13 e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13.



a)



b)

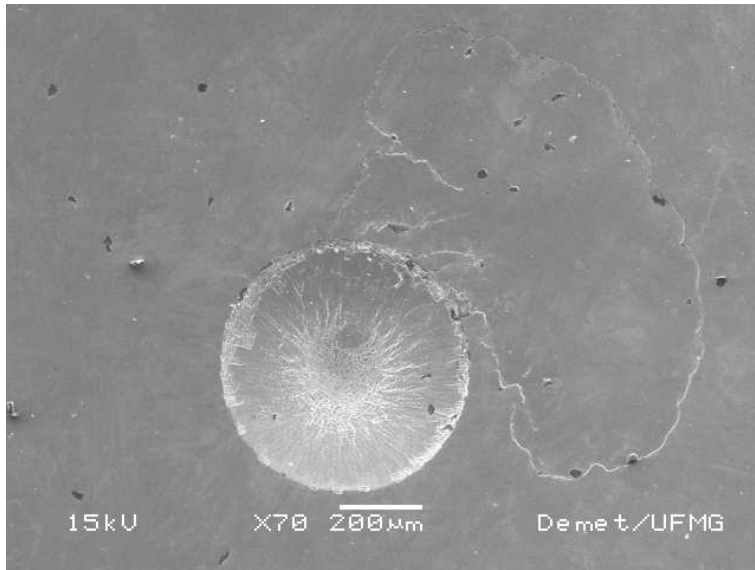
Figura 5.8- Imagens de microscopia óptica dos testes de adesão Rockwell C dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ em AISI H13 temperado e revenido. 150 Kgf (100X) a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13 e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / AISI H13.

As imagens de MEV após os testes de adesão dos conjugados BA e AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado (Figuras 5.9, 5.10 e 5.11) evidenciam a existência de trincas circulares ao redor das indentações de ambos os conjugados. A presença de trincas circulares corrobora o fato de substratos mais macios apresentarem trincas circulares, evidenciando que a dureza do substrato influencia os padrões de trinca existentes ao redor da indentação (DUCROS, 2003).

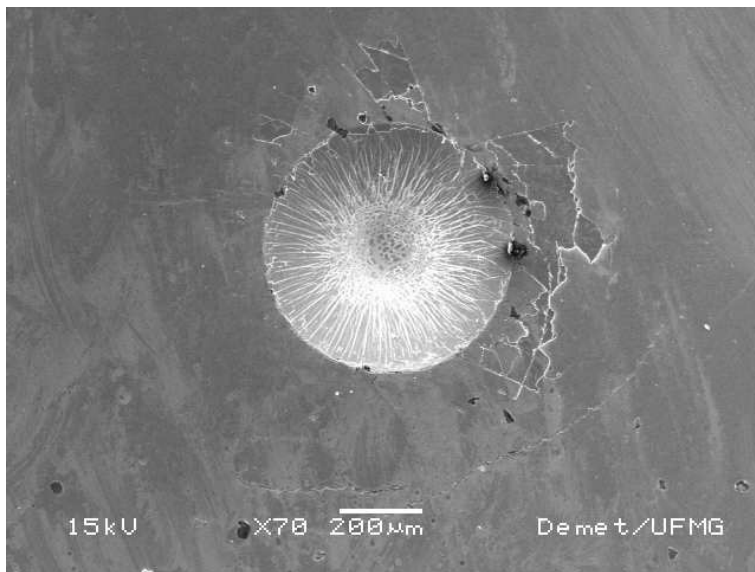
Em todas as cargas aplicadas, não observa-se delaminação do filme BA $Ti_{1-x}Al_xN$ (monofásico CFC) ao redor da indentação, sugerindo que o filme BA $Ti_{1-x}Al_xN$ apresentou boa adesão ao substrato H13 não temperado. Entretanto, na maior carga aplicada -150 Kgf (Figura 5.11), observa-se uma possível delaminação do filme AA $Ti_{1-x}Al_xN$ (bifásico), o que pode confirmar as imagens de microscopia ótica obtidas. Este resultado evidencia que este filme apresentou pior adesão ao aço H13 não temperado do que o filme BA, fato que deve ser considerado na comparação entre o desempenho destes dois conjugados em desgaste.

As imagens de MEV após os testes de adesão dos filmes ao aço temperado e revenido (Figuras 5.12 a 5.18) corroboram as imagens de microscopia ótica no fato de ambos os filmes BA e AA apresentarem boa adesão ao aço, em todas as cargas aplicadas.

Ressalta-se que em ambas as cargas aplicadas, as imagens do conjugado BA (filme bifásico) com aumento de 500 X evidenciam que este conjugado apresenta trincas radiais, características de sistemas mais duros (DUCROS, 2003). Este resultado confirma a hipótese obtida com a imagem de microscopia ótica (Figura 5.8), que sugere maior número de trincas (menor tenacidade ou maior dureza) do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ /H13 temperado (filme bifásico) em relação ao conjugado AA (filme hexagonal).

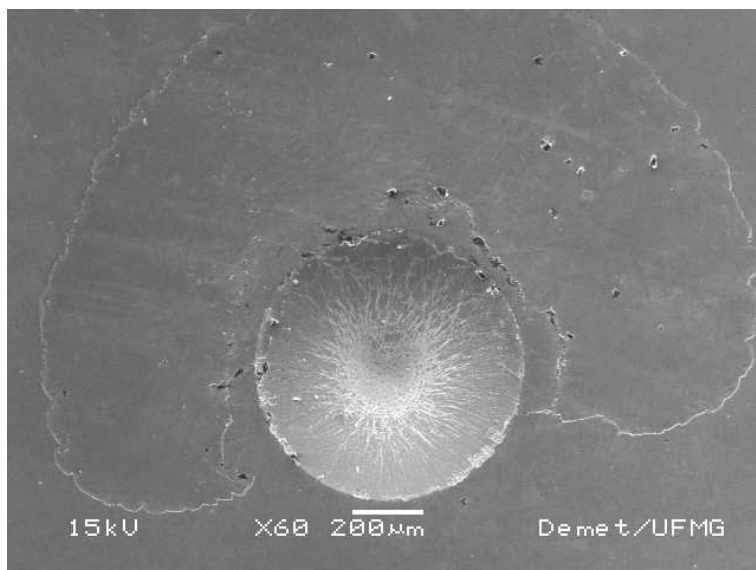


a)

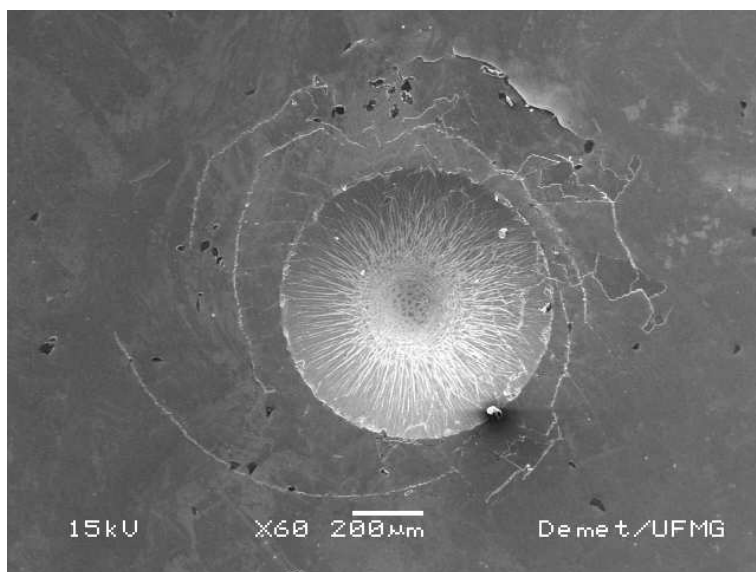


b)

Figura 5.9 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado (filme CFC) e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado (filme bifásico). 62,5Kgf (70X).

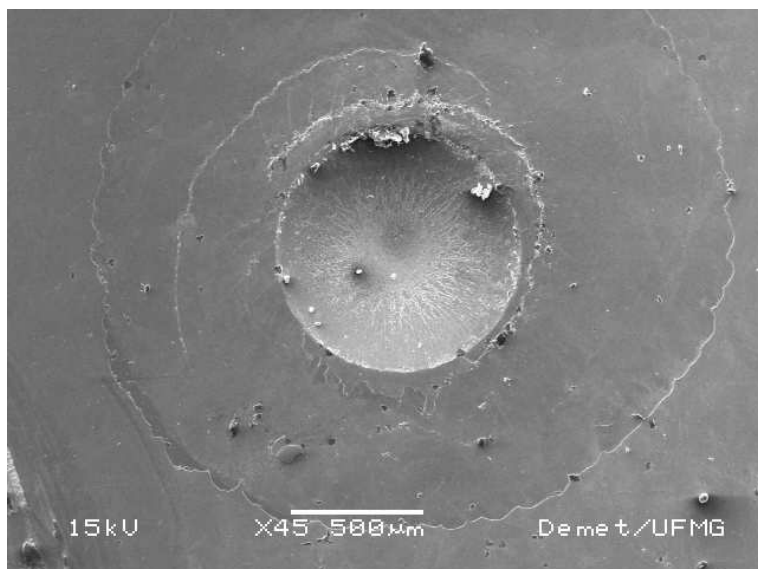


a)

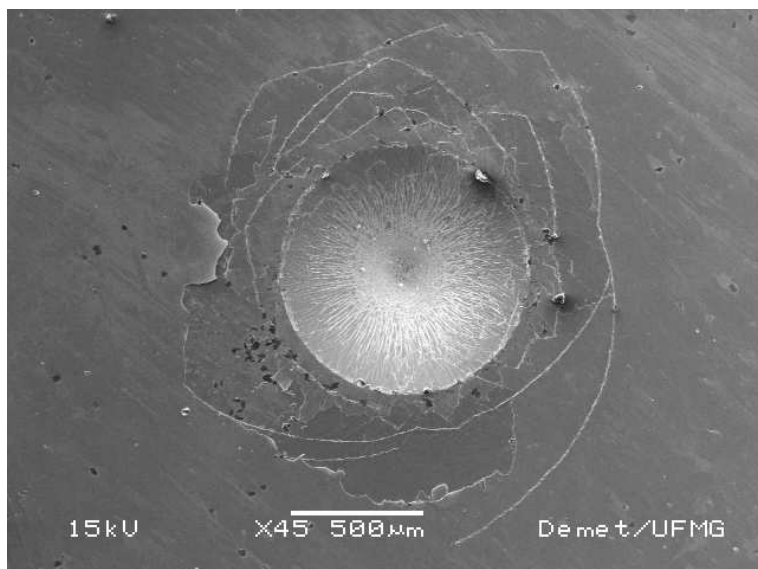


b)

Figura 5.10 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado (filme CFC) e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado (filme bifásico) . 100Kgf (60X).



a)

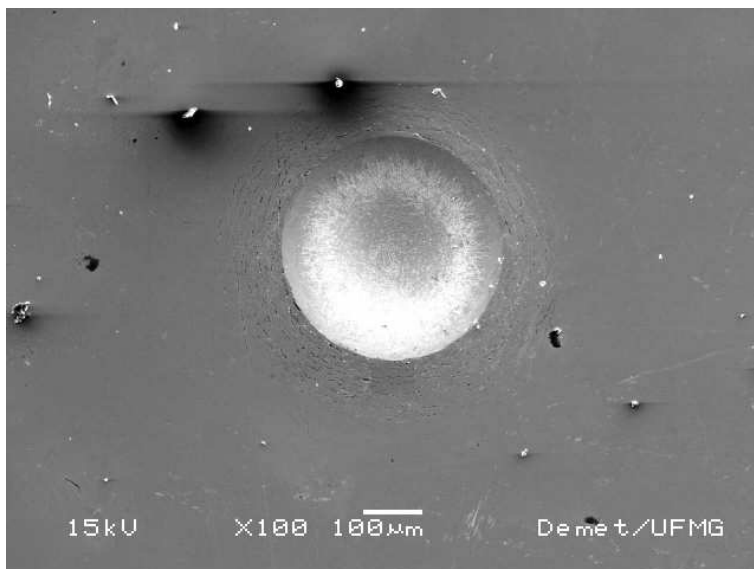


b)

Figura 5.11 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado (filme CFC) e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado (filme bifásico) .150Kgf (45X).

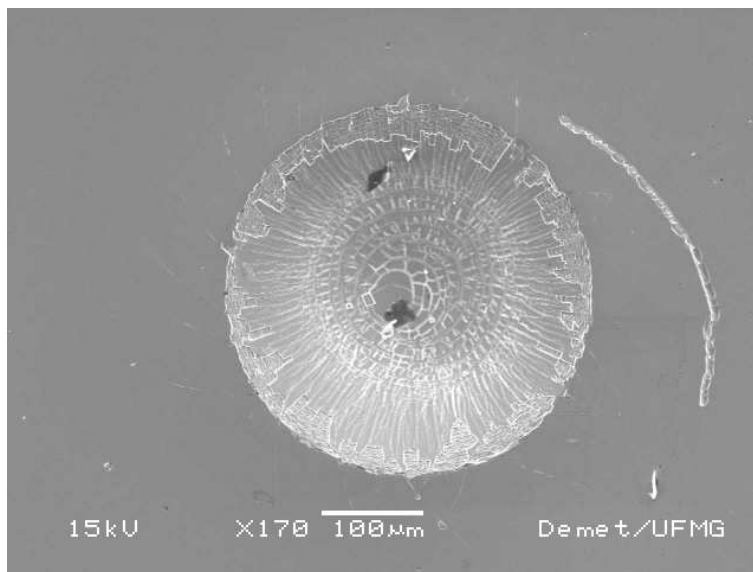


a)

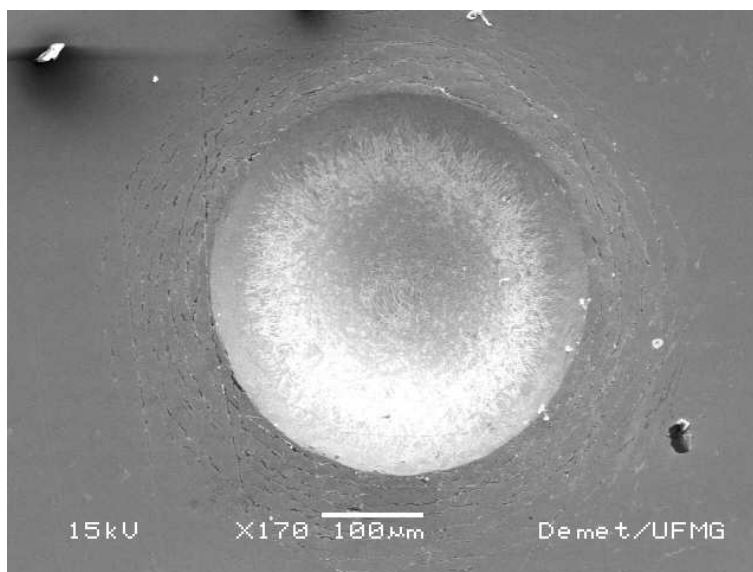


b)

Figura 5.12 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido (filme bifásico) e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido (filme hexagonal). 62,5Kgf (100X).



a)



b)

Figura 5.13 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido (filme bifásico) e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido (filme hexagonal). 62,5 Kgf (170X).

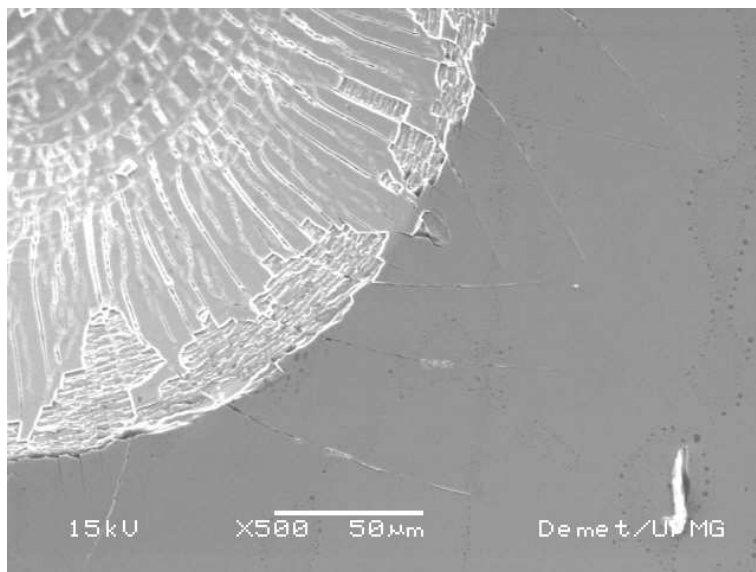
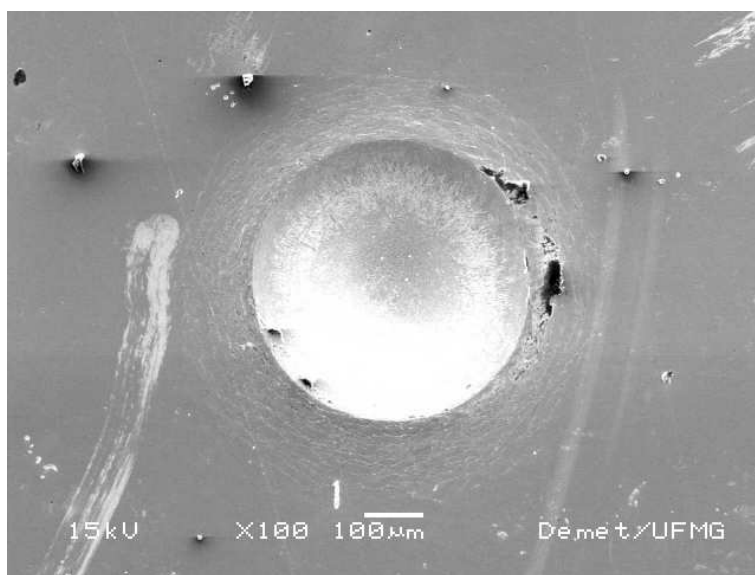


Figura 5.14 – Imagem de MEV do teste de adesão Rockwell C do conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN / H13 temperado e revenido (filme bifásico) -demonstração das trincas radiais. 62,5 Kgf (500X).



a)



b)

Figura 5.15 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido (filme bifásico) e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido (filme hexagonal). 100 Kgf (100X).

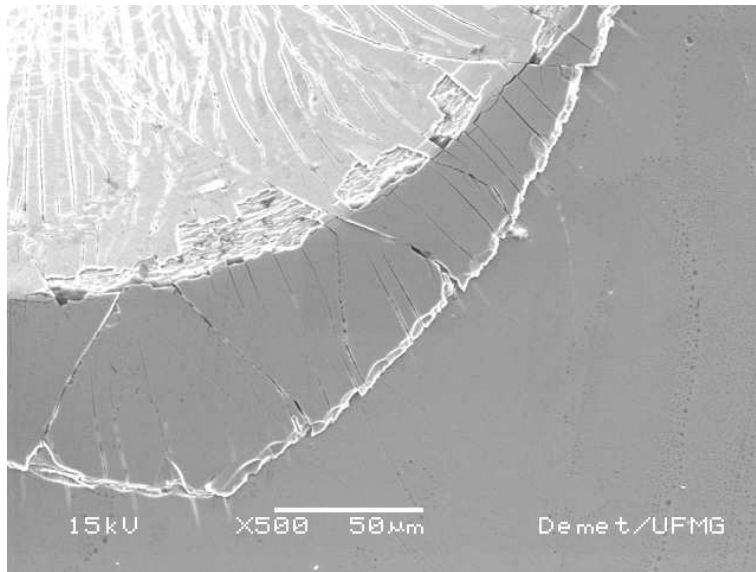
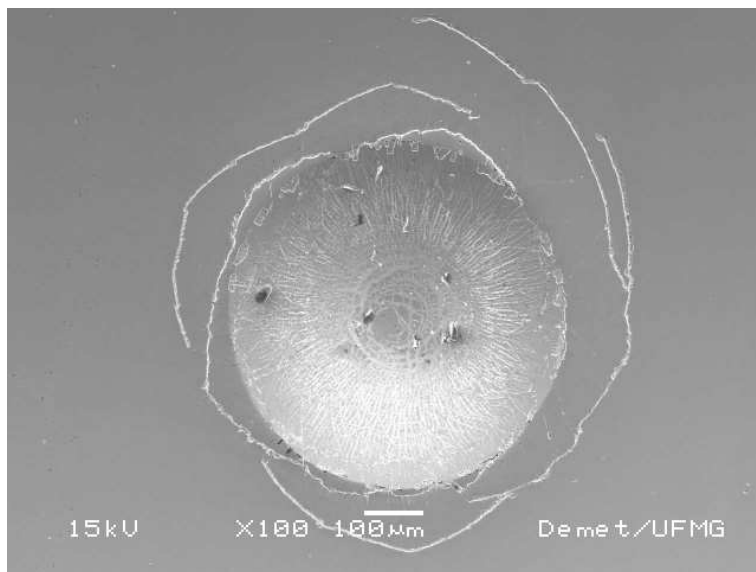
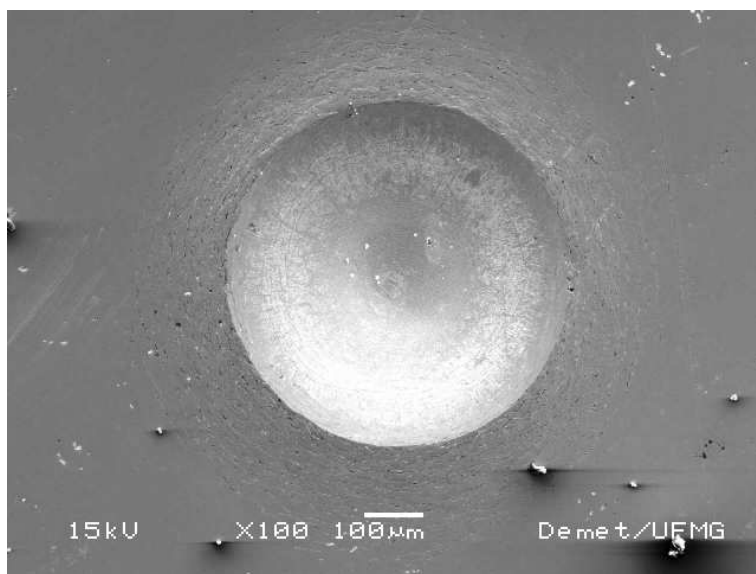


Figura 5.16 – Imagem de MEV do teste de adesão Rockwell C do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido (filme bifásico) -demonstração das trincas radiais. 100 Kgf (500X).

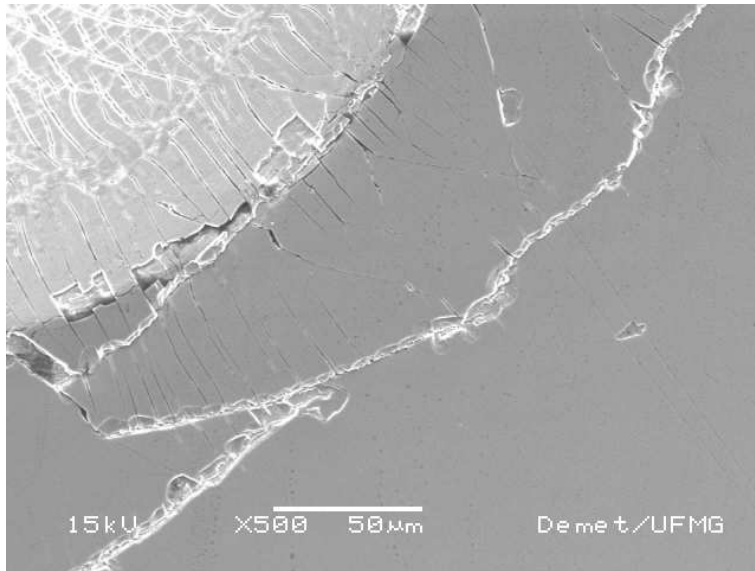


a)

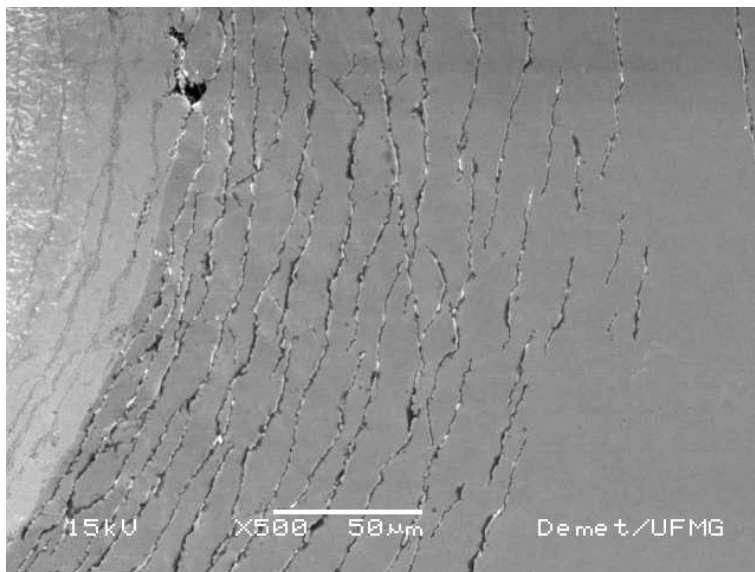


b)

Figura 5.17 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido (filme bifásico) e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido (filme hexagonal). 150 Kgf (100X).



a)



b)

Figura 5.18 – Imagens de MEV dos testes de adesão Rockwell C dos conjugados a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido (filme bifásico) e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado e revenido (filme hexagonal). 150 Kgf (500X).

5.3 Espectroscopia de Emissão Óptica por Centelhamento

As curvas obtidas por esta análise, que representam a variação dos elementos Al e Fe com a profundidade, são descritas nas Figuras 5.19 a 5.22.

Através dos gráficos obtidos, observa-se que em todas as curvas estudadas, o teor de alumínio inicia-se alto, diminuindo com o aumento da profundidade, demonstrando a transição dos filmes (que contêm Al) para os substratos (que não contêm Al). O contrário ocorre com o ferro (elemento dos substratos), cuja quantidade aumenta com a profundidade (transição dos filmes para os substratos). Todos os conjugados AA apresentam maior teor de alumínio em relação aos conjugados BA, corroborando os resultados da análise de DRX, que através das estruturas cristalinas, sugeriram diferença estrutural e, conseqüentemente, diferença de teor de alumínio entre os filmes, o que é confirmado pela Figura 3.1.

Em relação aos conjugados do aço não temperado, observa-se na mesma escala de profundidade (Figuras 5.19 e 5.20), que o encontro entre os teores de Al e Fe (correspondente à transição do filme para o substrato), ocorreu em torno de 3800 nm (3,8 μ m) para o conjugado BA (filme CFC) e em torno de 3000 nm (3 μ m) para o conjugado AA (filme bifásico), sugerindo que o filme do conjugado BA apresenta espessura ligeiramente maior. Ressalta-se que o teor de alumínio do filme AA é aproximadamente o dobro do teor de alumínio do filme BA, o que confirma a diferença estrutural observada na análise de DRX (filme BA é monofásico CFC e filme AA é bifásico).

Os conjugados relativos ao substrato aço temperado e revenido (Figuras 5.21 e 5.22) apresentaram curvas de composição química evidenciando, na mesma escala de profundidade, que o filme AA apresenta espessura de aproximadamente 3000 nm (3 μ m), consideravelmente maior que a espessura do BA, que é em torno de 1000 nm (1 μ m). Este resultado pode influenciar a análise da resistência ao desgaste dos conjugados, pois a espessura do filme é um fator que afeta o desgaste (DIAO, 1995). Observa-se menor diferença entre os teores de alumínio dos filmes BA e AA do aço temperado, em comparação aos filmes do outro substrato. Esta pequena diferença de teor de alumínio dos

revestimentos do aço temperado resultou em um filme bifásico (BA) e um filme monofásico hexagonal (AA).

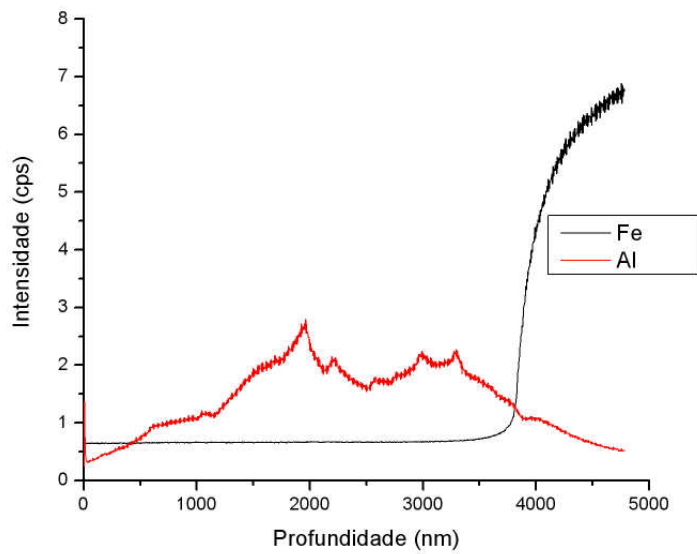


Figura 5.19- Variação da composição com a profundidade para o conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme CFC).

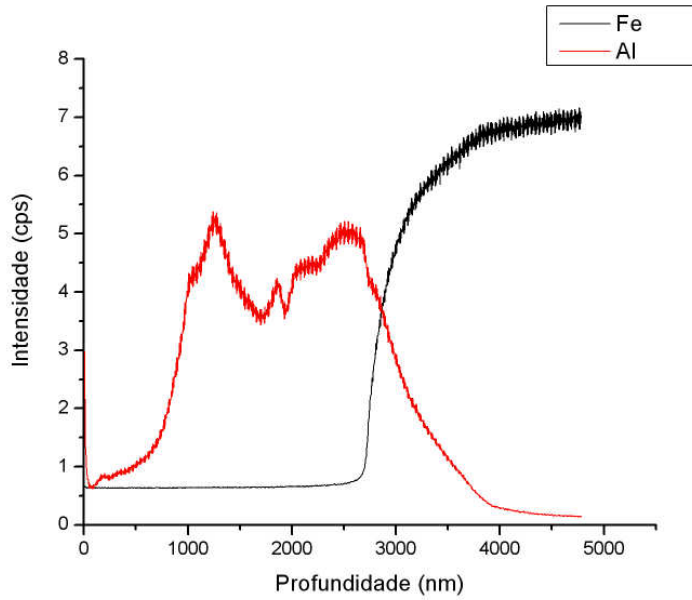


Figura 5.20- Variação da composição com a profundidade para o conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme bifásico).

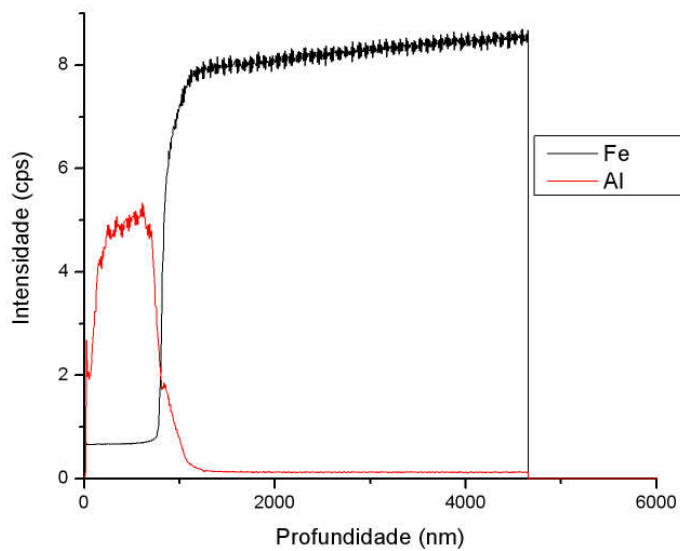


Figura 5.21- Variação da composição com a profundidade para o conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado (filme bifásico).

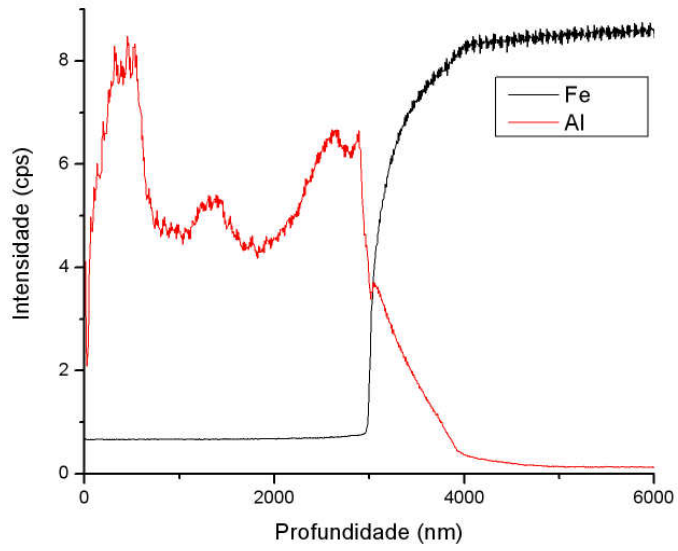


Figura 5.22- Variação da composição com a profundidade para o conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado (filme hexagonal).

5.4 Ensaios de Penetração Instrumentada

5.4.1 Determinação da dureza e do módulo de elasticidade dos sistemas

Os valores de dureza (em GPa), profundidade máxima de penetração (em μm) e módulos de elasticidade (em GPa) medidos na penetração instrumentada, estão nas Tabelas V.1 a V.4.

De acordo com a penetração instrumentada (Tabela V.1), observa-se que a deposição do filme AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (bifásico) sobre o aço H13 não temperado, aumentou a sua dureza superficial, considerando a maior carga aplicada (1900 mN), com maior influência do substrato. Entretanto, a adição do revestimento BA (monofásico CFC) não alterou significativamente a dureza do aço H13 não temperado, pois a 1900 mN observa-se que a dureza permaneceu praticamente constante. Ressalta-se uma influência significativa de ambos os filmes BA e AA na dureza do aço H13 temperado, a cargas superiores, como 1900 mN (Tabela V.2). Este fato sugere que, provavelmente a deposição dos filmes $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ sobre o aço H13 temperado influenciará mais o seu desempenho em desgaste do que a deposição dos filmes $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ sobre o aço H13 não temperado.

Nas menores cargas aplicadas (32, 50 e 100 mN), em relação aos sistemas do aço não temperado (Tabela V.1) observa-se que o filme do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ apresentou dureza superior ao filme do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$, fator que deve ser considerado na avaliação do desempenho dos conjugados em desgaste.

Este resultado confirma estudos realizados por (HASEGAWA, 2004; ZHOU, 1999; SHUM, 2003), que indicaram que filmes monofásicos CFC (como o BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$) apresentam dureza inferior a filmes bifásicos com estruturas CFC e hexagonal (como o AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$), sugerindo diferentes desempenhos destes conjugados em desgaste.

Em ambos os sistemas recobertos estudados, observa-se que a diminuição da dureza com o aumento da carga evidencia o crescimento da influência do substrato H13 com a profundidade de penetração.

As Tabelas V.3 e V.4 contêm valores dos módulos de elasticidade dos sistemas estudados, sendo a análise do módulo de elasticidade importante na avaliação do desempenho em desgaste dos sistemas (LEYLAND, 2000; PHARR, 1998). Em relação aos conjugados do aço não temperado (Tabela V.3), observa-se em geral, uma ligeira redução do módulo de elasticidade com o aumento da força aplicada, pois há a transição do filme cerâmico (ligações químicas mais fortes ou maior módulo de elasticidade) para o substrato metálico (ligações químicas mais fracas ou menor módulo de elasticidade) (CALLISTER, 2002).

Comparando os conjugados do aço não temperado estudados (Tabela V.3), o conjugado AA, nas menores cargas aplicadas (de 32 a 100 mN- maior influência do filme), apresentou módulos de elasticidade superiores ao conjugado BA. Este resultado corrobora o fato de filmes bifásicos (estruturas CFC e hexagonal) apresentarem módulos de elasticidade superiores a filmes monofásicos CFC (KUTSCHEJ, 2005; SHUM, 2003). Os valores de módulo de elasticidade do conjugado BA/ H13 não temperado (filme CFC) não variaram muito com a profundidade. O contrário é observado para o conjugado AA (filme bifásico), em que há variação do módulo de elasticidade com a profundidade, indicando o maior gradiente de intensidade das ligações químicas entre o filme AA e o substrato H13 não temperado (CALLISTER, 2002).

Os ensaios de penetração instrumentada (Tabela V.2) evidenciaram que a deposição dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ BA e AA sobre o aço H13 temperado e revenido aumentou a sua dureza superficial, fator que provavelmente influenciará o seu desempenho em desgaste (WILLIAMS, 2005; LEYLAND, 2000). Este fato foi observado em todas as cargas aplicadas, inclusive na maior carga (1900 mN), correspondente à maior influência do substrato.

O aumento do teor de alumínio do filme do conjugado $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (Tabela V.2) diminuiu substancialmente a dureza do filme $Ti_{1-x}Al_xN$ (durezas correspondentes à maior influência do filme- carga 32, 50, 300 e 100 mN e profundidade em torno de 0,2 μm).

A dureza obtida com a menor carga aplicada (32 mN) corresponde a uma profundidade de penetração (aproximadamente 0,3 μm), que é aproximadamente, menor ou igual à um décimo das espessuras dos filmes (em torno de 3,8 μm para o BA/H13 não temperado; 3 μm para o AA/ H13 não temperado; 1 μm para o BA/H13 temperado e revenido e 3 μm para o AA/ H13 temperado e revenido). Assim, o efeito do substrato pode ser desprezado na dureza medida a esta faixa de carga (SPAIN, 2005; DING, 2005).

Este resultado está de acordo com estudos realizados por (HASEGAWA, 2004; ZHOU, 1999; SHUM, 2003) que demonstraram que filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ com estrutura hexagonal apresentam dureza inferior à dureza dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ com estrutura cristalina bifásica $Ti_{1-x}Al_xN-CFC$ e hexagonal, sendo os filmes AA e BA $Ti_{1-x}Al_xN$ estudados, respectivamente. Além disso, estes resultados corroboram os resultados do teste de adesão (Figura 5.8), que demonstram que as trincas do conjugado BA apresentam espaçamento inferior às do conjugado AA, sugerindo que o conjugado BA (filme bifásico) é menos tenaz ou mais duro (ZHANG, 2005).

A diferença significativa observada entre os valores de dureza dos filmes BA e AA depositados sobre o aço H13 temperado e revenido (Tabela V.2), sugere diferença entre as resistências ao desgaste destes conjugados.

Supõe-se que o conjugado BA/ H13 temperado (filme bifásico e bem mais duro) terá melhor desempenho em desgaste do que o conjugado AA (filme hexagonal), pois em muitas situações, quanto maior a dureza do material, maior será a sua resistência ao desgaste (HUTCHINGS, 1992).

A comparação entre os substratos H13 não temperado e H13 temperado evidencia que os tratamentos de têmpera e revenimento do aço H13 aumentaram a sua dureza superficial, fato observado a 1900 mN.

Os valores de módulos de elasticidade obtidos para o aço temperado e revenido e seus conjugados (Tabela V.4) evidenciam que, comparando os conjugados, o sistema BA (filme bifásico) $Ti_{1-x}Al_xN$ apresentou módulos de elasticidade médios superiores (até a carga de 100 mN- maior influência do filme).

Considerando as cargas de maior influência do filme (32 a 100 mN), esta diferença pode ser explicada pelo fato deste filme apresentar-se bifásico (com uma estrutura CFC e a outra hexagonal), faixa de transição entre um filme mais metálico (com alumínio em solução sólida na estrutura do CFC), para um filme cerâmico (com solução sólida na estrutura hexagonal).

Estes resultados comprovam a literatura, que evidencia que a redução do módulo de elasticidade com o aumento do teor de alumínio do filme $Ti_{1-x}Al_xN$ e com a mudança de estrutura do campo bifásico para o campo hexagonal.

Observa-se que, na carga de 1900 mN, o aço H13 temperado apresentou módulo de elasticidade inferior aos dos conjugados, provavelmente devido ao fato do aço apresentar maior predomínio de ligações metálicas (fase Fe CCC e carbono em solução sólida em maior quantidade e a fase cerâmica Cr_7C_3 em menor quantidade), em comparação com as fases dos filmes, resultando em menores valores de módulo de elasticidade (KUTSCHEJ, 2005; PALDEY, 2003; CALLISTER, 2002).

Tabela V.1- Valores de dureza do substrato H13 não temperado e seus conjugados.

Força (mN)	H _{IT} Médio (GPa)	Desvio-padrão (GPa)	H _{máx} (μm)	Desvio-padrão (μm)
BA Ti _{1-x} Al _x N /H13 não temperado (filme CFC)				
32	30,824	5,754	0,267	0,017
50	20,145	2,781	0,392	0,019
100	6,540	0,402	0,862	0,020
300	3,478	0,156	1,957	0,039
1000	2,752	0,041	3,937	0,091
1900	2,544	0,068	5,578	0,049
AA Ti _{1-x} Al _x N /H13 não temperado (filme bifásico)				
32	44,265	7,997	0,231	0,015
50	32,263	5,760	0,320	0,022
100	25,508	2,645	0,492	0,020
300	7,209	0,764	1,435	0,056
1000	3,026	0,041	3,830	0,023
1900	2,916	0,068	5,328	0,049
H13 não temperado				
1900	2,536	0,10	5,71	0,14

Tabela V.2-Valores de dureza do substrato H13 temperado e revenido e seus conjugados.

Força (mN)	H _{IT} Médio (GPa)	Desvio-padrão (GPa)	H _{máx} (μm)	Desvio-padrão (μm)
BA Ti _{1-x} Al _x N /H13 temperado e revenido (filme bifásico)				
32	52,43	9,29	0,22	0,01
50	42,20	5,58	0,30	0,01
100	24,43	4,12	0,51	0,03
300	15,90	2,13	1,10	0,04
1000	9,27	0,50	2,46	0,07
1900	8,08	0,36	3,54	0,12
AA Ti _{1-x} Al _x N / H13 temperado e revenido (filme hexagonal)				
32	14,32	1,36	0,35	0,01
50	10,76	0,99	0,48	0,02
100	8,68	0,55	0,75	0,02
300	8,38	0,41	1,31	0,02
1000	7,75	0,44	2,49	0,05
1900	7,56	0,25	3,43	0,05
H13 temperado e revenido				
1900	6,26	0,23	6,04	0,14

Tabela V.3- Valores de módulos de elasticidade do substrato H13 não temperado e seus conjugados.

Força (mN)	E Médio (GPa)	Desvio-padrão (GPa)	hmáx (μm)	Desvio-padrão (μm)
BA Ti _{1-x} Al _x N /H13 não temperado (filme CFC)				
32	481,87	67,27	0,267	0,017
50	388,45	67,54	0,392	0,019
100	362,75	58,40	0,862	0,020
300	376,32	20,41	1,957	0,039
1000	396,33	17,36	3,937	0,091
1900	401,55	19,81	5,578	0,049
AA Ti _{1-x} Al _x N /H13 não temperado (filme bifásico)				
32	578,59	68,04	0,231	0,015
50	536,39	68,02	0,320	0,022
100	456,68	32,28	0,492	0,020
300	246,54	21,84	1,435	0,056
1000	191,49	5,18	3,830	0,023
1900	203,90	9,81	5,328	0,049
H13 não temperado				
1900	147,36	42,96	5,71	0,14

Tabela V.4-Valores de módulos de elasticidade do substrato H13 temperado e revenido e seus conjugados.

Força (mN)	E Médio (GPa)	Desvio-padrão (GPa)	hmáx (μm)	Desvio-padrão (μm)
BA Ti _{1-x} Al _x N /H13 temperado e revenido (filme bifásico)				
32	707,36	85,28	0,22	0,01
50	555,99	51,41	0,30	0,01
100	412,43	49,39	0,51	0,03
300	233,59	30,54	1,10	0,04
1000	197,01	24,33	2,46	0,07
1900	207,74	35,58	3,54	0,12
AA Ti _{1-x} Al _x N / H13 temperado e revenido (filme hexagonal)				
32	468,25	81,40	0,35	0,01
50	420,80	82,27	0,48	0,02
100	322,35	11,64	0,75	0,02
300	459,49	42,07	1,31	0,02
1000	370,88	51,45	2,49	0,05
1900	470,66	25,39	3,43	0,05
H13 temperado e revenido				
1900	312,43	17,86	4,88	0,53

5.4.2 Comparação entre os valores de dureza obtidos para os sistemas

A comparação realizada entre os valores médios de dureza obtidos a 1900 mN, feita através do “Software Minitab” (teste estatístico “t student”), para os sistemas aço H13 temperado e seus conjugados, está mostrada nas Tabelas V.5 e V.6.

O fato dos valores de p obtidos serem menores que α (0,05), indica que a hipótese H_0 (as durezas médias são iguais) deve ser rejeitada, ou seja, com 95% de confiança, as durezas médias obtidas a 1900 mN são diferentes, quando se compara o conjugado BA com o AA/ H13 temperado e cada conjugado com o substrato aço H13 temperado (Tabela V.5)

Tabela V.5- Comparação entre as durezas a 1900 mN para o aço H13 temperado e revenido e seus conjugados.

Força 1900mN		
MÉDIAS COMPARADAS	Valor de p	RESULTADO
AA e H13	0,000	Não são iguais
BA e H13	0,000	Não são iguais
AA e BA	0,001	Não são iguais

Os resultados dos testes estatísticos realizados para comparar as durezas dos conjugados obtidas a 32mN, estão contidos na Tabela V.6.

Tabela V.6- Comparação entre as durezas a 32 mN dos conjugados do aço temperado e revenido.

Força 32mN		
MÉDIAS COMPARADAS	Valor de p	RESULTADO
BA e AA	0,000	Não são iguais
BA e AA	0,000	BA > AA

De acordo com a Tabela V.6, conclui-se com 95% de confiança, que as durezas dos conjugados AA e BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 temperado são diferentes e o conjugado BA (filme bifásico) apresenta dureza superior, em comparação ao conjugado AA (filme hexagonal) (valor de $p < 0,05$, possibilitando rejeitar a hipótese H_0).

O teste estatístico “t student”, realizado para estabelecer a comparação entre os valores médios de dureza obtidos para os sistemas não temperados está demonstrado nas Tabelas V.7 e V.8.

Para a carga de 1900mN, o valor de p obtido foi menor que α (0,05), indicando que a hipótese H_0 deve ser rejeitada, ou seja, as médias dos valores de dureza não são iguais, comparando o conjugado BA com o AA/ H13 não temperado e cada conjugado com o substrato aço H13 não temperado com 95% de confiança (Tabela V.7).

Tabela V.7- Comparação entre as durezas a 1900 mN para o aço H13 não temperado e seus conjugados.

Força 1900mN		
MÉDIAS COMPARADAS	Valor de p	RESULTADO
AA e H13	0,000	Não são iguais
BA e H13	0,001	Não são iguais
AA e BA	0,000	Não são iguais

Na carga de 32 mN, os testes estatísticos realizados para verificar a diferença entre as durezas dos conjugados estão demonstrados na Tabela V.8.

Tabela V.8- Comparação entre as durezas a 32 mN dos conjugados do aço não temperado.

Força 32mN		
MÉDIAS COMPARADAS	Valor de p	RESULTADO
BA e AA	0,001	Não são iguais
BA e AA	0,001	AA > BA

Os valores de dureza a 32 mN (maior influência do filme) dos conjugados AA e BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperados, com 95% de confiança, são diferentes. Além disso, pode-se afirmar com 95% de confiança, que o valor da dureza do conjugado AA (filme bifásico) é maior que a dureza do conjugado BA (filme CFC) (valor de p menor que 0,05, o que implica que a hipótese H_0 deve ser rejeitada).

5.4.3 Valores de H/E obtidos para os sistemas

As Tabelas V.9 e V.10 contêm novamente os valores de dureza e de módulo de elasticidade dos sistemas estudados, incluindo o quociente entre eles ou (H/E).

Em relação aos sistemas do aço H13 não temperado (Tabela V.9), observa-se que o conjugado AA (filme bifásico) apresentou razão H/E superior ao conjugado BA (filme CFC) em todas as cargas aplicadas, sugerindo maior deformação elástica até a falha em desgaste. Nesse caso, a razão H/E também constitui e deverá ser considerada um fator determinante, além da dureza dos filmes, na comparação do desempenho em desgaste dos conjugados do aço não temperado (BEAKE, 2006; LEYLAND, 2000; PHARR, 1998).

Os valores de H/E obtidos para os sistemas do aço temperado e revenido (Tabela V.10) demonstram que o conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme bifásico) apresentou valores superiores de H/E em comparação ao conjugado AA (filme hexagonal) , em todas as cargas e profundidades de penetração referentes aos valores de H e E medidos. Este resultado sugere que o conjugado BA deverá obter maior deformação elástica até a falha em desgaste, fator positivo para otimizar o seu desempenho em desgaste, em comparação ao outro conjugado. Ressalta-se que este conjugado BA (filme bifásico) apresenta duas características positivas em relação ao desgaste, dureza superior e H/E superior, quando comparado ao outro conjugado AA (filme hexagonal). Considerando a carga de 1900 mN, este conjugado também apresentou H/E superior ao do aço H13 temperado e revenido, o que também sugere o seu melhor desempenho em desgaste quando comparado ao aço sem revestimento. A alta dureza do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ /H13 temperado e revenido (filme bifásico), associada ao seu alto H/E podem otimizar o seu desempenho em desgaste (BEAKE, 2006; LEYLAND, 2000; PHARR, 1998).

Tabela V.9- Razão H/E do aço não temperado e seus conjugados.

Sistema	H/E
BA $Ti_{1-x}Al_xN$ /H13 não temperado (filme CFC)	0,0639
	0,0519
	0,0180
	0,0092
	0,0069
	0,0063
AA $Ti_{1-x}Al_xN$ /H13 não temperado (filme bifásico)	0,0765
	0,0601
	0,0559
	0,0292
	0,0158
	0,0143
H13 não temperado	0,0172

Tabela V.10- Razão H/E do aço temperado e revenido e seus conjugados.

Sistema	H/E
BA $Ti_{1-x}Al_xN$ /H13 temperado e revenido (filme bifásico)	0,074
	0,0759
	0,0592
	0,0681
	0,0471
	0,0389
AA $Ti_{1-x}Al_xN$ /H13 temperado e revenido (filme hexagonal)	0,0306
	0,0256
	0,0269
	0,0182
	0,0209
	0,016
H13 temperado e revenido	0,0296

5.5 Perfilometria após o desgaste

5.5.1 Perfilometria após o desgaste contra Si₃N₄

5.5.1.1 Aço H13 não temperado e seus conjugados

As imagens topográficas das texturas superficiais dos sistemas estudados após o desgaste e a metodologia para a estimativa do volume de desgaste (item 4.7) estão ilustradas nas seguintes figuras.

Comparando os conjugados AA Ti_{1-x}Al_xN e BA Ti_{1-x}Al_xN do H13 não temperado, observa-se que a superfície após o uso do recurso de remoção de forma do segundo conjugado apresentou amplitude total (distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo) (Figuras 5.24 e 5.25) ligeiramente superior (17,5 µm) à superfície do primeiro conjugado (11,9 µm) (HOMMELMAP 4.0). Embora o parâmetro amplitude total não esteja diretamente associado à taxa de desgaste do material, que depende do volume (HUTCHINGS, 1992), a maior amplitude total do perfil do conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN (filme CFC) sugere seu o maior desgaste, considerando a comparação entre estes conjugados. Este fato é corroborado através da superfície invertida (em que os picos tornam-se vales) e de sua densidade de picos. As imagens de ambos os conjugados após o desgaste tiveram amplitude total inferior ao perfil do aço H13 não temperado (amplitude 31,5 µm- Figura 5.23), o que sugere o maior desgaste do aço sem recobrimento. Este fato também é confirmado através das imagens dos perfis invertidos (Figuras 5.26, 5.27 E 5.28) (HOMMELMAP 4.0).

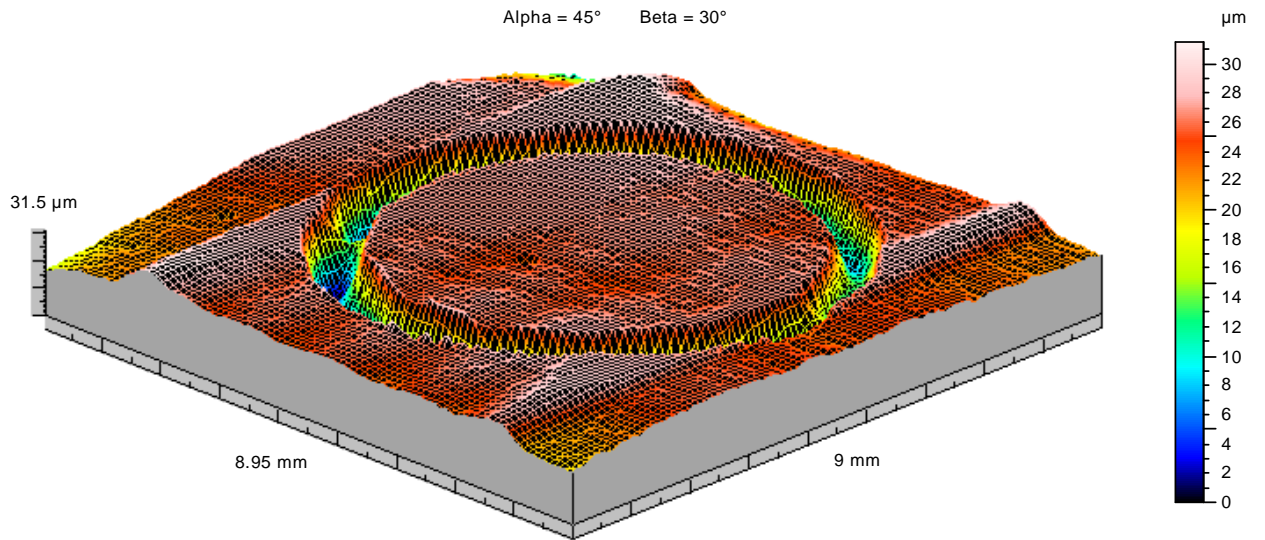


Figura 5.23- Superfície após remoção de forma do aço H13 não temperado.

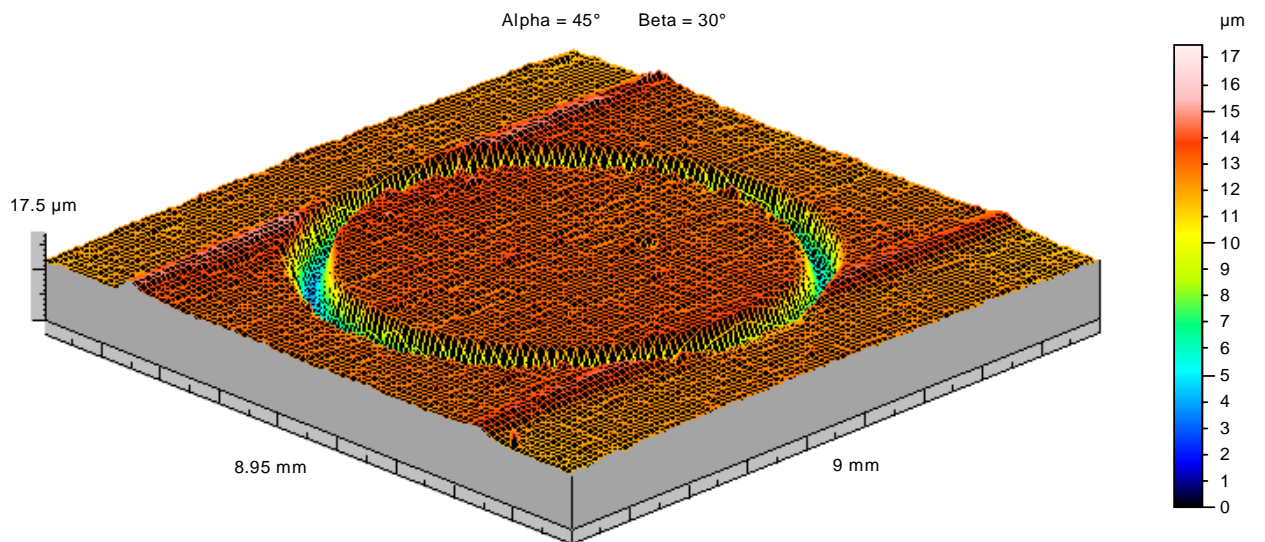


Figura 5.24- Superfície após remoção de forma do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado (filme CFC).

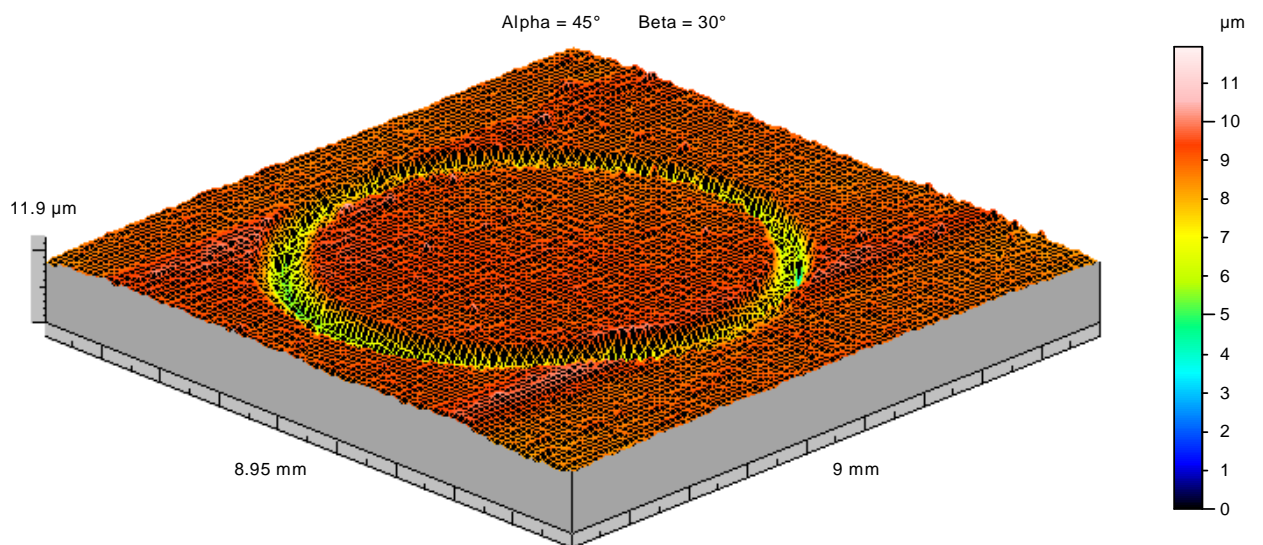


Figura 5.25- Superfície após remoção de forma do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme bifásico).

As densidades de picos dos perfis invertidos (que correspondem aos vales dos perfis sem inversão) (Figuras 5.26 a 5.31) demonstram que a superfície do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme CFC) apresenta a maior concentração de picos por mm^2 (em torno de 27 picos/ mm^2) em amplitudes em torno de 5 μm , sendo que a superfície do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme bifásico) possui a maior concentração de picos em torno de 45 picos/ mm^2 em amplitudes de aproximadamente 3 μm . Estes resultados indicam a superior concentração de vales de maiores amplitudes para o conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado, monofásico CFC, sugerindo o maior desgaste deste conjugado, em comparação ao conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$. Comparando o aço não temperado e seus conjugados, observa-se que a superfície invertida do aço H13 sem revestimento, com maior concentração de picos em torno de 9 picos/ mm^2 em amplitudes de aproximadamente 5 a 7 μm e o conjugado BA,

apresentaram as maiores concentrações de vales de maior amplitude, sugerindo o menor desgaste do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado (filme bifásico).

De acordo com os histogramas de densidade de picos das superfícies invertidas, para delimitar a região do traço de desgaste, realizou-se um corte em amplitudes correspondentes ao início do traço de desgaste nestes perfis. Assim, o corte foi feito em amplitudes inferiores a $4,9 \mu m$ no perfil do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$, a amplitudes menores que $2,8 \mu m$ no perfil do AA $Ti_{1-x}Al_xN$ e em amplitudes inferiores a $5 \mu m$ no perfil do aço H13 (ver Figuras 5.29 a 5.31).

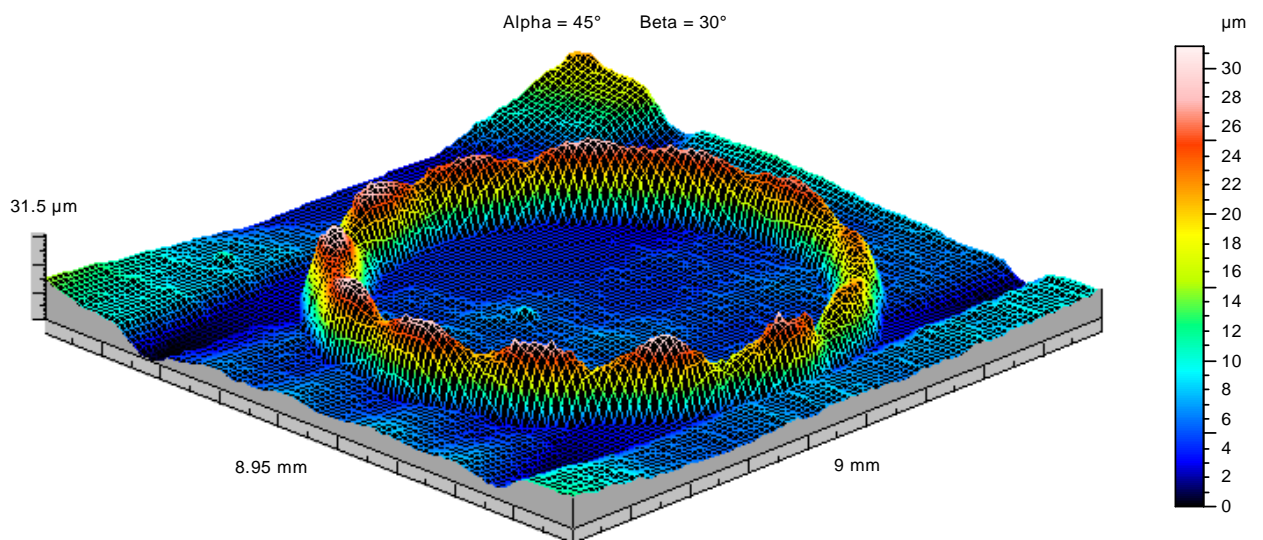


Figura 5.26- Superfície invertida do aço H13 não temperado.

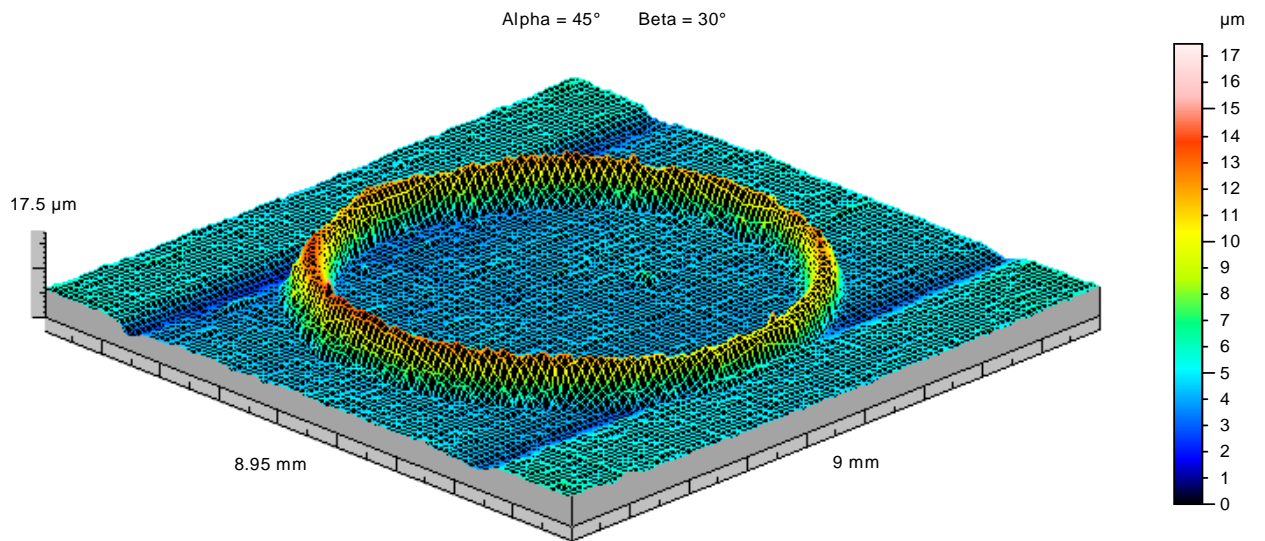


Figura 5.27- Superfície invertida do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado (filme CFC).

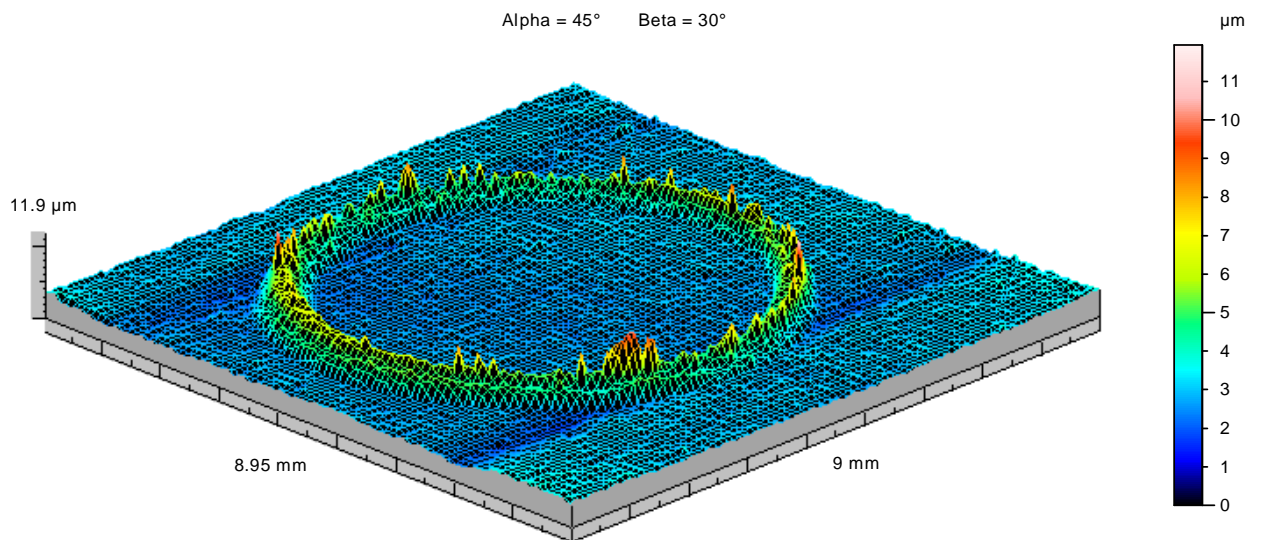


Figura 5.28- Superfície invertida do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado (filme bifásico).

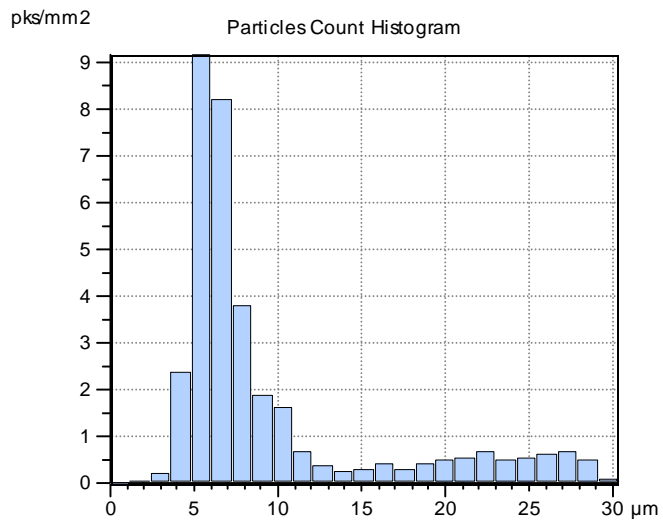


Figura 5.29- Histograma de densidade de picos da superfície invertida do aço H13 não temperado.

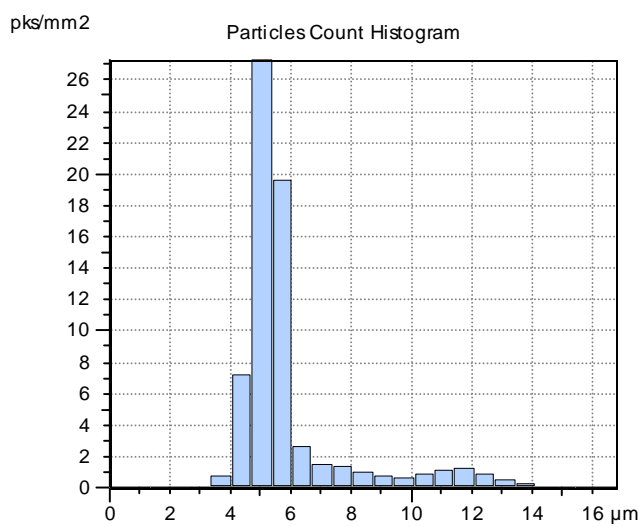


Figura 5.30- Histograma de densidade de picos da superfície invertida do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme CFC).

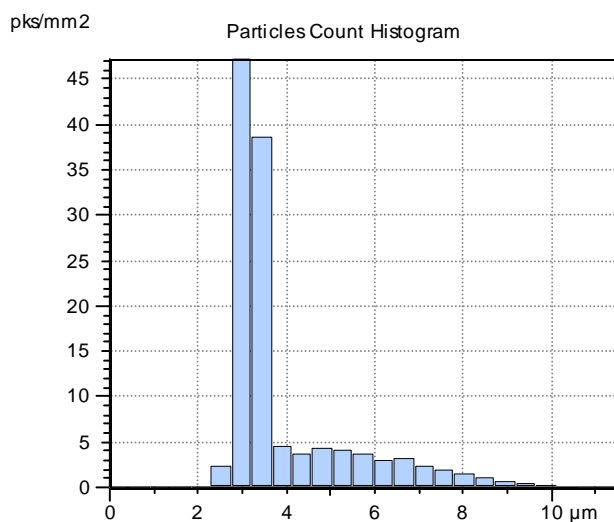


Figura 5.31- Histograma de densidade de picos da superfície invertida do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme bifásico).

As superfícies invertidas do aço H13 não temperado e de seus conjugados, obtidos após o primeiro procedimento de corte, realizado para delimitar a região do traço de desgaste, são ilustrados nas Figuras 5.32, 5.33 e 5.34. De acordo com estas imagens, observa-se que a largura do traço de desgaste e a amplitude total do perfil do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado (filme CFC) são superiores à largura do traço de desgaste e amplitude do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme bifásico), o que corrobora a evidência de um maior desgaste do primeiro conjugado. Na comparação entre os três sistemas estudados, ressalta-se que o perfil do aço H13 não temperado sem revestimento apresenta a maior amplitude total, o que sugere o seu maior desgaste em comparação aos sistemas recobertos. Este fato é

confirmado pelas imagens dos perfis sem inversão (retorno à posição inicial após o corte- Figuras 5.35, 5.36 e 5.37).

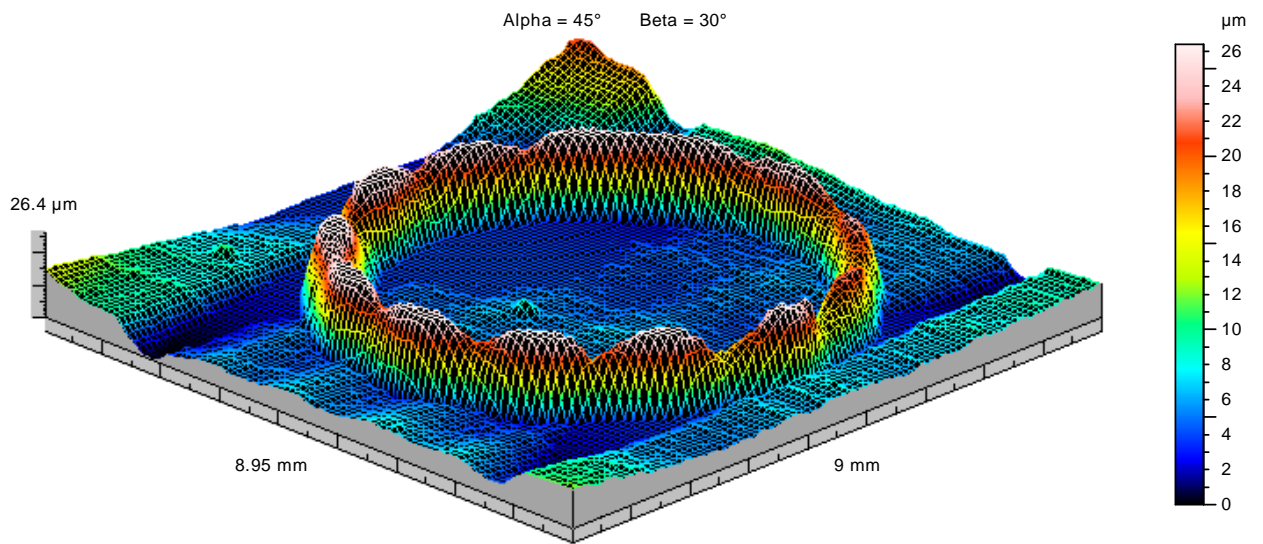


Figura 5.32- Superfície invertida após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do aço H13 não temperado.

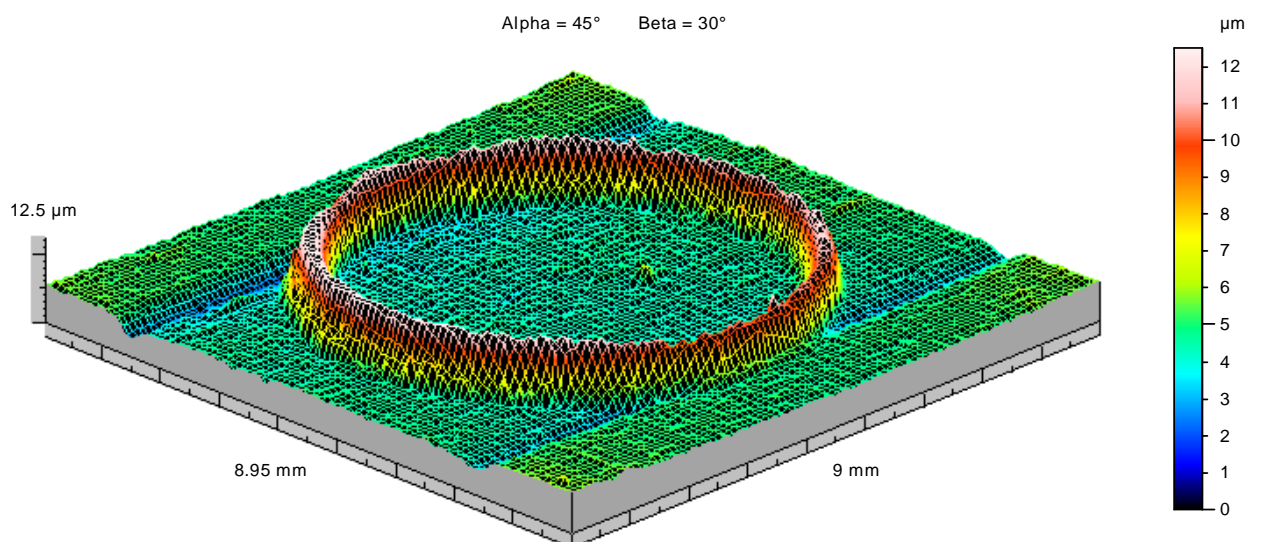


Figura 5.33- Superfície invertida após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado (filme CFC).

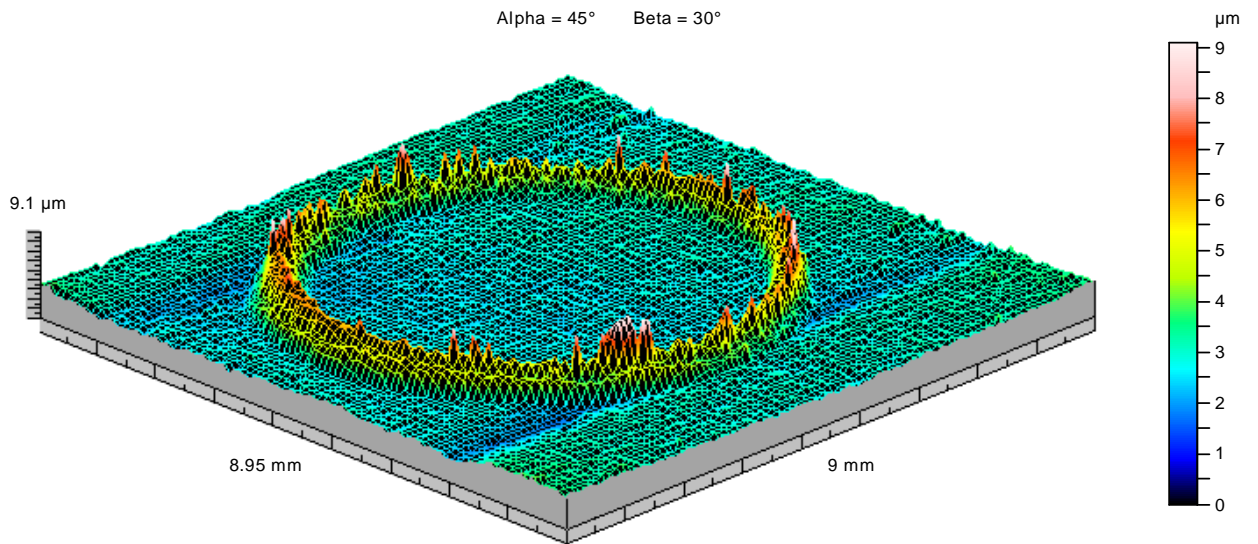


Figura 5.34- Superfície invertida após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado (filme bifásico).

As imagens sem inversão (retorno à posição inicial após o corte) estão contidas nas Figuras 5.35, 5.36 e 5.37.

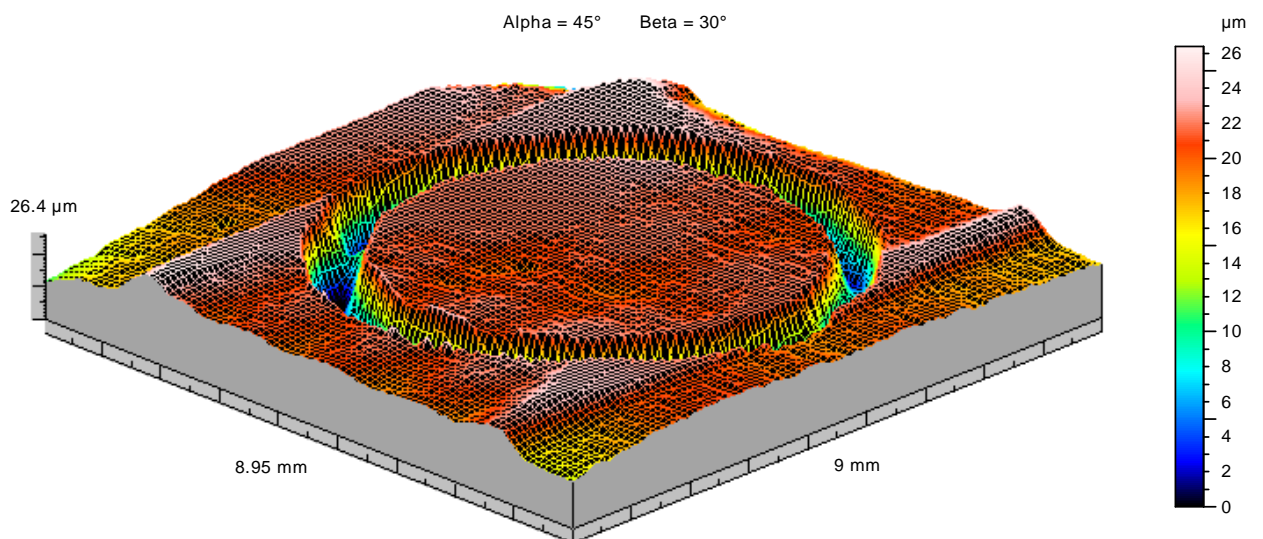


Figura 5.35- Superfície sem inversão (retorno à posição inicial) após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do aço H13 não temperado.

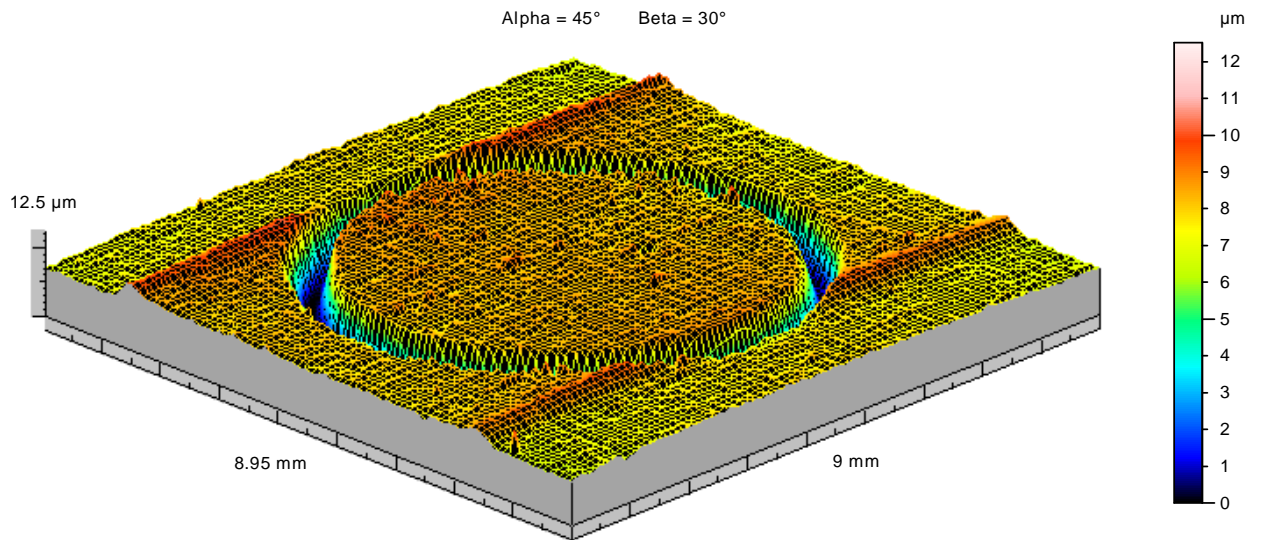


Figura 5.36- Superfície sem inversão (retorno à posição inicial) após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado (filme CFC).

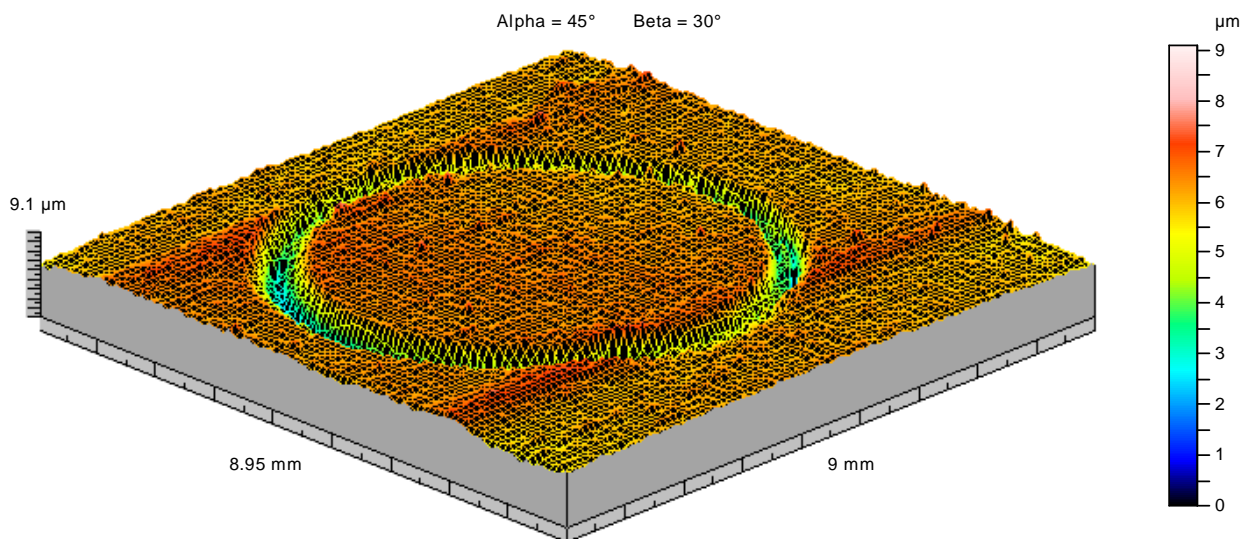


Figura 5.37- Superfície sem inversão (retorno à posição inicial) após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado (filme bifásico).

As imagens após o segundo corte (de 10 a 100%) nos perfis sem inversão para excluir os picos mais altos (10%), que provavelmente correspondem à rugosidade da superfície e que existem na superfície mesmo após o primeiro corte realizado, estão ilustradas nas Figuras 5.38, 5.39 e 5.40.

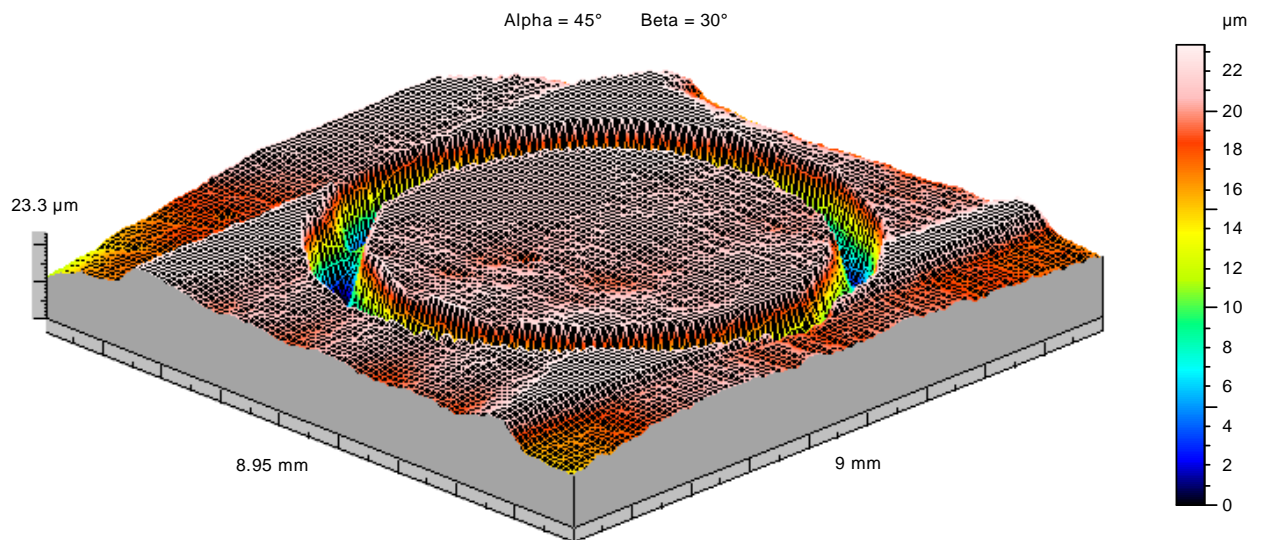


Figura 5.38- Superfície sem inversão após o corte para excluir os picos mais altos do aço H13 não temperado.

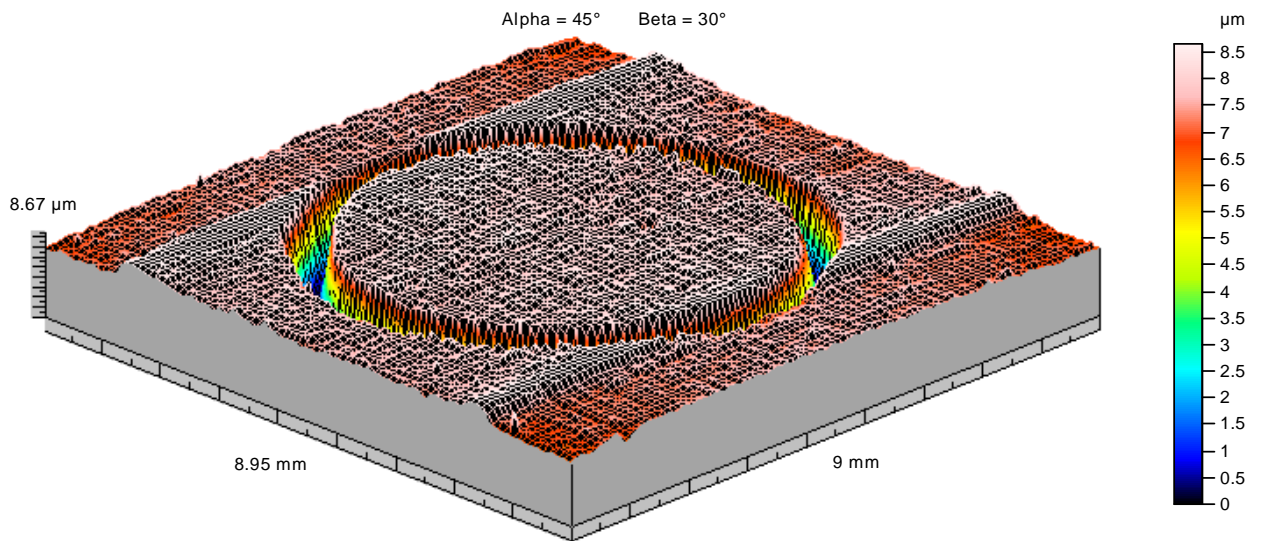


Figura 5.39- Superfície sem inversão após o corte para excluir os picos mais altos do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado (filme CFC).

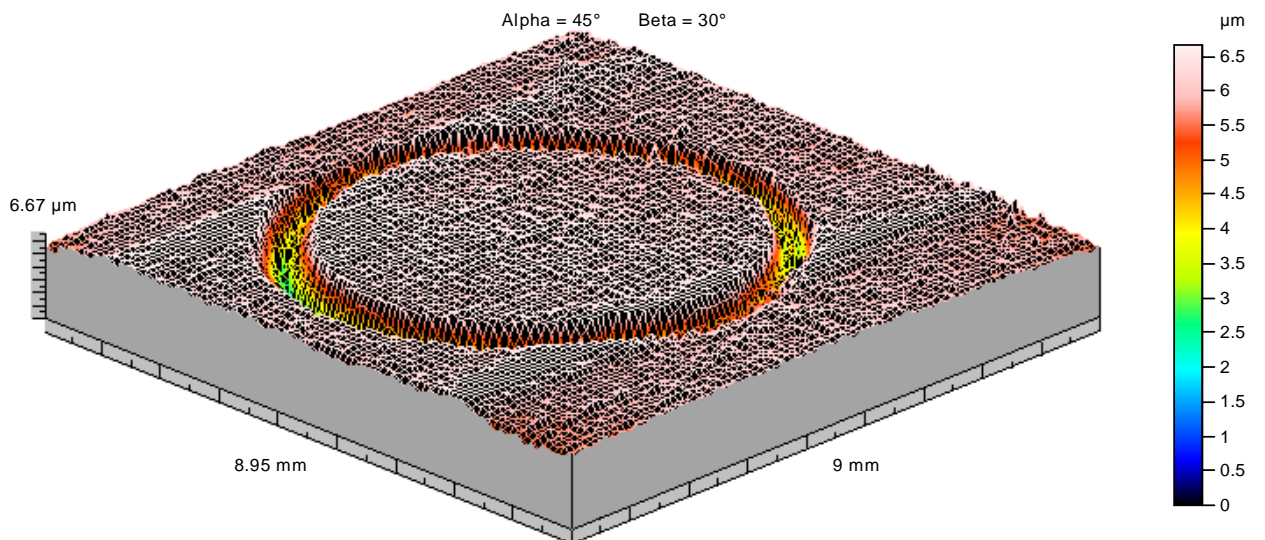


Figura 5.40- Superfície sem inversão após o corte para excluir os picos mais altos do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado (filme bifásico).

As imagens das superfícies estudadas após o procedimento de “Erase Defects”, usado para estabelecer o plano de referência e excluir toda a rugosidade externa aos traços de desgaste estão demonstradas nas Figuras 5.41, 5.42 e 5.43. Estas imagens confirmam, após estabelecer um plano de referência, a maior amplitude total do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$, quando comparado ao outro conjugado, evidenciando a maior distância do plano médio ao vale mais profundo do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme CFC), o que sugere a superior profundidade de desgaste deste conjugado. Estas imagens também corroboram a maior amplitude e superior largura do traço de desgaste do aço H13 não temperado sem revestimento, comparado aos sistemas recobertos.

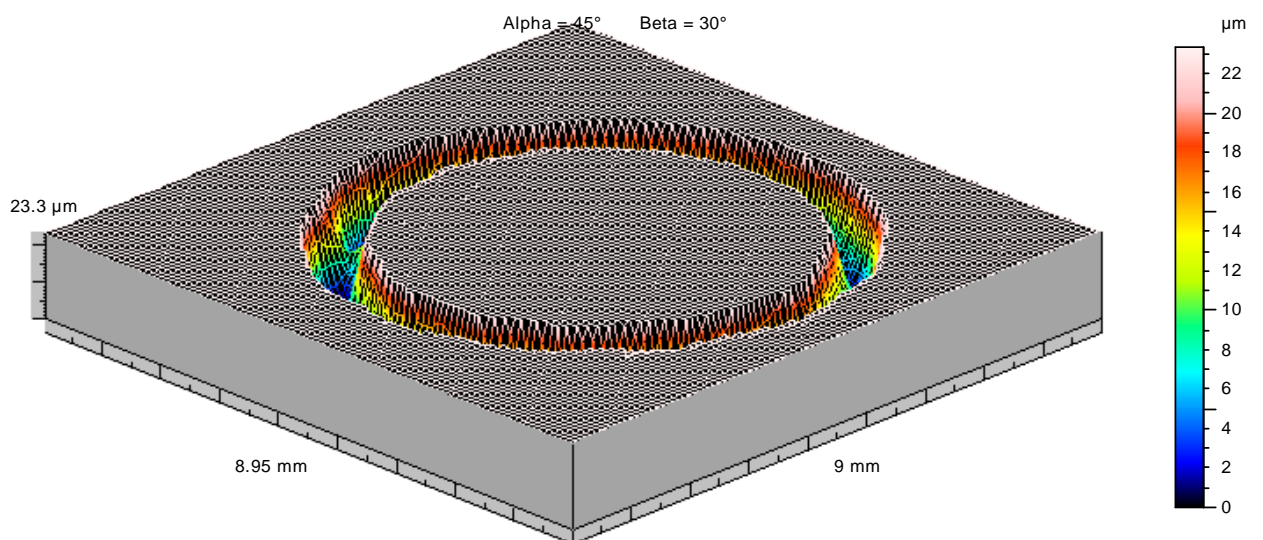


Figura 5.41- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do aço H13 não temperado.

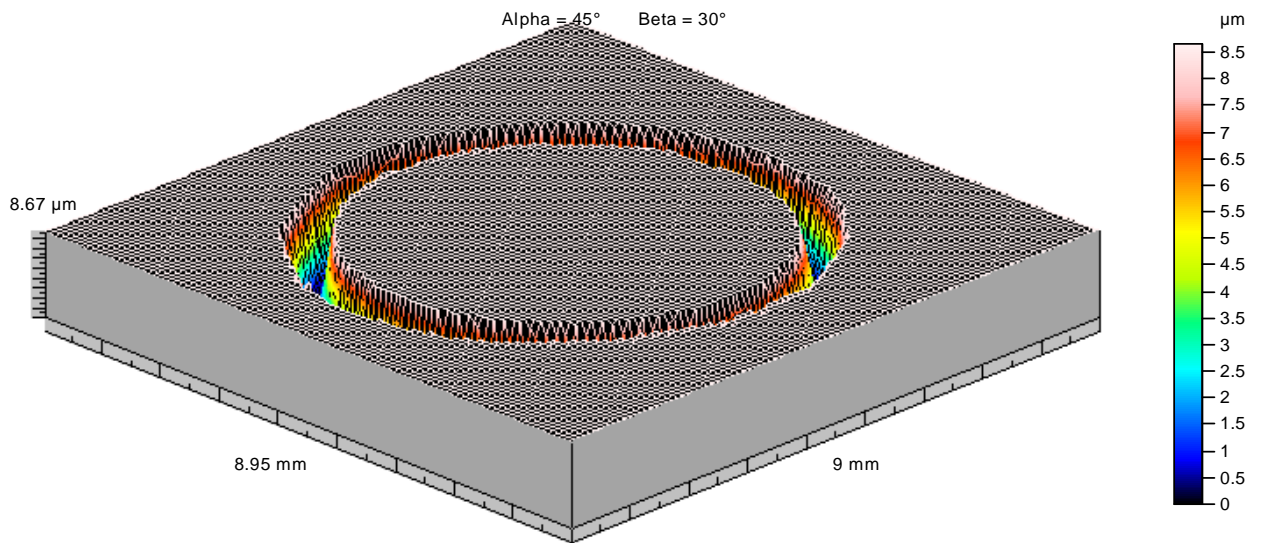


Figura 5.42- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado (filme CFC).

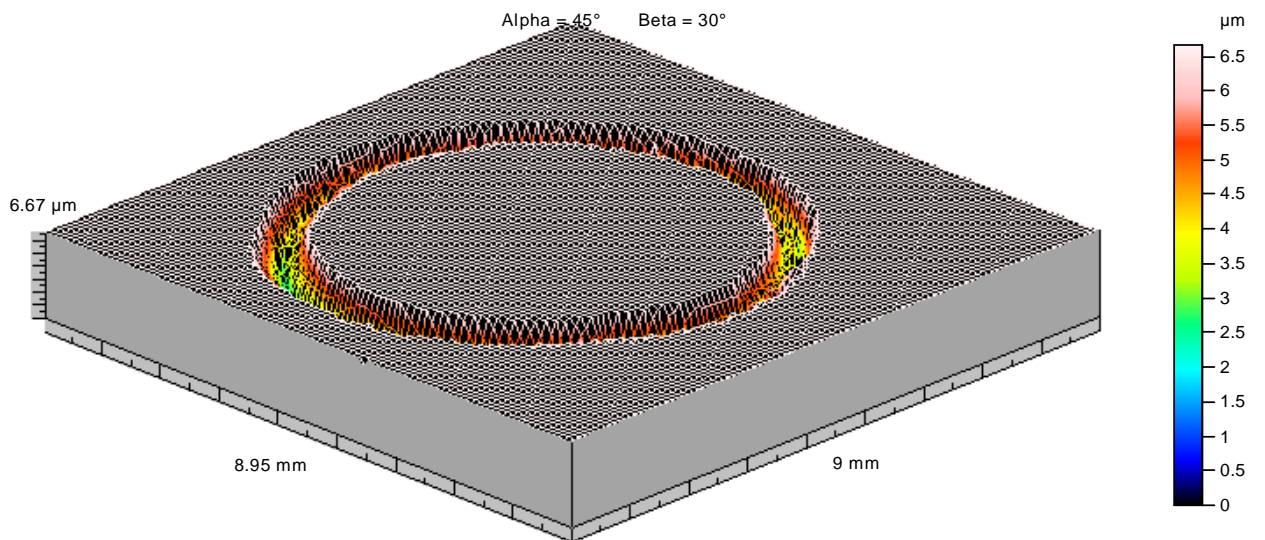
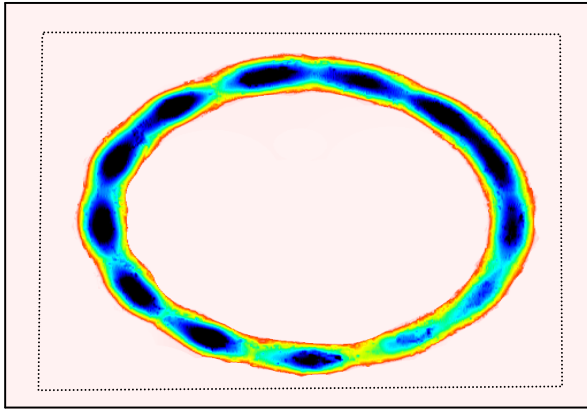


Figura 5.43- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado (filme bifásico).

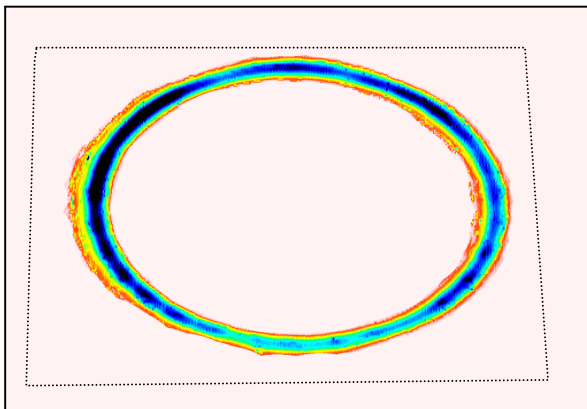
Os volumes e profundidades de vales (correspondentes ao volumes e profundidades dos traços de desgaste) obtidos da superfície após o “Erase Defects” (Figuras 5.44, 5.45 e 5.46) evidenciam que a superfície do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ não temperado apresentou volume de desgaste (volume de buracos) igual a $0,0531 \text{ mm}^3$, 108% superior ao volume da superfície do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$ ($0,0255 \text{ mm}^3$), corroborando a maior taxa de desgaste (volume/distância de deslizamento) (HUTCHINGS, 1992) do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ monofásico CFC, que apresenta menor dureza e menor razão H/E, além de melhor adesão do filme ao aço H13 não temperado. Ressalta-se que a superfície do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ apresentou, respectivamente, profundidades de desgaste máxima e média em torno de 30% e 140 % superiores, iguais a $8,67$ e $4,82 \text{ }\mu\text{m}$, contra $6,67$ e $2,01 \text{ }\mu\text{m}$ do conjugado AA bifásico CFC e hexagonal, o que confirma o melhor desempenho do conjugado AA em desgaste.

A superfície do aço H13 não temperado sem revestimento apresentou o maior volume de desgaste ($0,215 \text{ mm}^3$) e as maiores profundidade máxima ($23,3 \text{ }\mu\text{m}$) e média ($12,4 \text{ }\mu\text{m}$), quando comparado aos conjugados (Figuras 5.44, 5.45 e 5.46), indicando que a deposição dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ monofásicos CFC e bifásicos protegeu o aço H13 não temperado contra o desgaste.



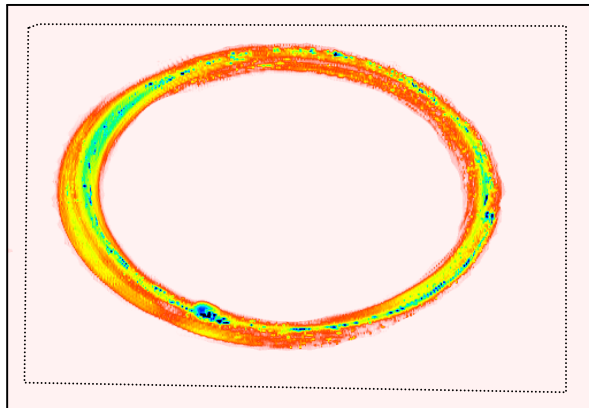
	Hole	
Surface (mm ²)	17.3	0
Volume (mm ³)	0.215	0
Max. depth/height (μm)	23.3	0
Mean depth/height (μm)	12.4	0

Figura 5.44- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do aço H13 não temperado.



	Hole	
Surface (mm ²)	11	0
Volume (mm ³)	0.0531	0
Max. depth/height (μm)	8.67	0
Mean depth/height (μm)	4.82	0

Figura 5.45- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN/H13 não temperado (filme CFC).



	Hole	
Surface (mm ²)	12.7	0
Volume (mm ³)	0.0255	0
Max. depth/height (μm)	6.67	0
Mean depth/height (μm)	2.01	0

Figura 5.46- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do conjugado AA Ti_{1-x}Al_xN/H13 não temperado (filme bifásico).

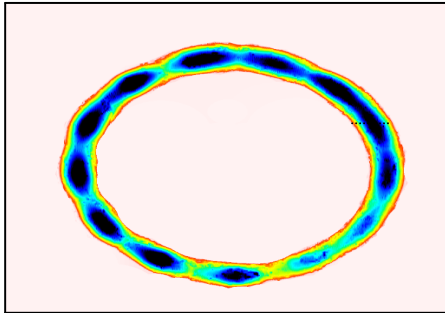
Os valores dos volumes de desgaste obtidos através dos três testes realizados (um teste e duas réplicas) para cada sistema conjugado e dois testes (um teste e uma réplica) para o aço não temperado, além do volume médio e do desvio padrão, estão contidos na Tabela V.11. Através desta tabela, observa-se que os valores médios de volumes de desgaste e seus desvios padrão, obtidos para os conjugados do aço não temperado corroboram o maior desgaste do conjugado BA (filme CFC), em relação ao conjugado AA (filme bifásico). Os valores da tabela também corroboram o maior desgaste do aço H13 não temperado sem revestimento, dentre os sistemas estudados.

Ressalta-se diferença considerável entre os volumes dos conjugados estudados, sendo a diferença média de volume de aproximadamente 82%. O volume de desgaste do aço H13 é, em média, 656 % maior que o do conjugado AA e 315% superior ao do conjugado BA.

Tabela V.11- Volumes de desgaste estimados por perfilometria para os sistemas do aço H13 não temperado.

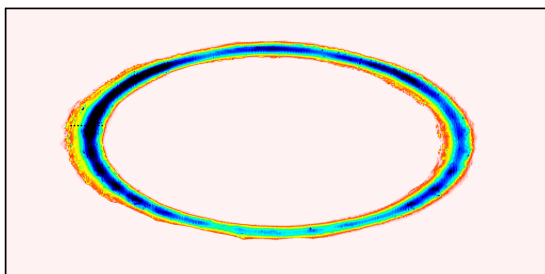
Volumes de desgaste (mm ³)	Volume Médio	Desvio padrão
Aço H13 não temperado	0,1905	0,0346
BA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme CFC)	0,0459	0,0105
AA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme bifásico)	0,0252	0,003

Para validar a metodologia elaborada através da perfilometria para a determinação do volume de desgaste dos sistemas, estimou-se o volume de desgaste utilizando a metodologia proposta pela Norma ASTM G 99-05 (itens 3.1 e 4.7), que estabelece o cálculo do volume de desgaste a partir das larguras médias e dos raios dos traços de desgaste. As Figuras 5.47, 5.48 e 5.49 demonstram a medição das larguras dos traços de desgaste. O valor da largura do traço de desgaste corresponde às distâncias horizontal e oblíqua entre os pontos assinalados no traço.



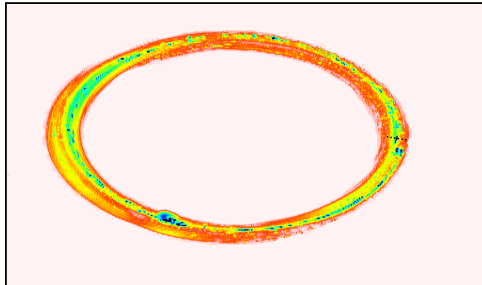
Cursor 1	Cursor 2
X = 7.06 mm	X = 7.84 mm
Y = 3.49 mm	Y = 3.49 mm
Z = 19.4 μm	Z = 16.1 μm
Horizontal distance	0.784 mm
Variation in height	3.29 μm
Oblique distance	0.784 mm

Figura 5.47- Demonstração da determinação da largura do traço de desgaste da superfície do aço H13 não temperado.



Cursor 1	Cursor 2
X = 1.61 mm	X = 1.03 mm
Y = 3.92 mm	Y = 3.93 mm
Z = 4.73 μm	Z = 5.25 μm
Horizontal distance	0.577 mm
Variation in height	0.52 μm
Oblique distance	0.577 mm

Figura 5.48- Demonstração da determinação da largura do traço de desgaste da superfície do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado (filme CFC).



Cursor 1	Cursor 2
X = 7.16 mm	X = 7.53 mm
Y = 4.27 mm	Y = 4.38 mm
Z = 4.13 μm	Z = 5.32 μm
Horizontal distance	0.392 mm
Variation in height	1.19 μm
Oblique distance	0.392 mm

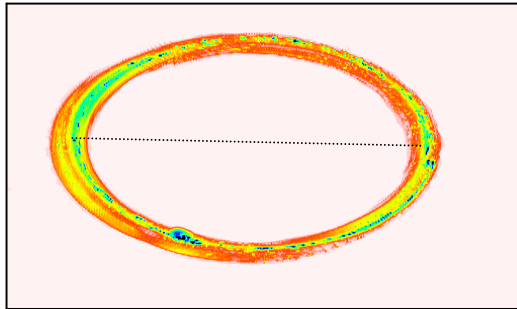
Figura 5.49- Demonstração da determinação da largura do traço de desgaste Da superfície do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado (filme bifásico).

A Tabela V.12 contém os valores das larguras dos traços de desgaste medidos e as larguras médias para os sistemas do aço não temperado. Observa-se variação entre os valores de largura do traço de desgaste de um mesmo sistema, sugerindo o desgaste não uniforme. Além disso, ao analisar o desvio padrão dos valores da largura média dos conjugados, verifica-se que os traços de desgaste dos conjugados apresentaram valores muito próximos de largura, parâmetro que não diferencia o seu desempenho em desgaste. Ressalta-se que o traço de desgaste do aço H13 não temperado sem revestimento apresentou largura média ligeiramente maior, confirmando o seu maior desgaste na comparação entre os sistemas estudados. Os valores de largura dos traços de desgaste estimados por perfilometria estão na mesma ordem de grandeza de estudos recentes contidos na literatura, sobre o desgaste de filmes $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ contra esferas de Si_3N_4 6 mm (mesmas condições experimentais deste trabalho), cuja largura do traço de desgaste variou entre 0,26 e 0,59 mm (BOBZIN, 2007).

Tabela V.12 - Estimativa da largura do traço de desgaste dos sistemas do aço H13 não temperado.

Larguras (mm)	Primeira medição	Segunda medição	Terceira medição	Quarta Medição	Largura Média	Desvio padrão
Aço H13 não temperado	0,683	0,734	0,924	0,784	0,781	0,104
BA Ti _{1-x} Al _x N/H13 não temperado (filme CFC)	0,645	0,47	0,699	0,577	0,598	0,099
AA Ti _{1-x} Al _x N/H13 não temperado (filme bifásico)	0,616	0,409	0,392	0,659	0,519	0,138

A Figura 5.50 demonstra a medição por perfilometria e a consequente confirmação do diâmetro do traço de desgaste do conjugado AA Ti_{1-x}Al_xN/H13 não temperado, dado fornecido ao software do Tribômetro antes de iniciar o teste de desgaste. A confirmação ou verificação do valor do diâmetro do traço ocorreu com o objetivo de aumentar a confiabilidade do uso do raio do traço de desgaste no posterior cálculo do volume através do procedimento da Norma ASTM G 99-05. Utilizou-se o procedimento de “Distância de Medição” do software *Mountains*, que determina a distância entre dois pontos definidos ao longo do traço de desgaste. O raio do traço de desgaste corresponde à distância horizontal da Figura 5.50. O valor de distância horizontal igual a 6,07 mm confirma que diâmetro do traço de desgaste é aproximadamente 6 mm, sendo 3 mm o seu raio.



Cursor 1	Cursor 2
X = 1.16 mm	X = 7.23 mm
Y = 3.98 mm	Y = 4.21 mm
Z = 2.91 μm	Z = 4.25 μm
Horizontal distance	6.07 mm
Variation in height	1.34 μm
Oblique distance	6.07 mm

Figura 5.50- Demonstração da determinação do diâmetro do traço de desgaste da superfície do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado (filme bifásico).

A Tabela V.13 contém os valores dos volumes de desgaste dos sistemas no aço não temperado, estimados através do procedimento da Norma ASTM G 99-05, obtidos a partir dos valores das larguras médias obtidas e dos raios do traço de desgaste e da esfera de Si_3N_4 , procedimento descrito no item 3.1. Através da tabela, observa-se que o procedimento descrito na Norma para a determinação do volume de desgaste corrobora a metodologia que utiliza a perfilometria, pois ambos evidenciam que o conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme CFC) no aço não temperado apresentou volume de desgaste superior, comparando os conjugados estudados e o aço H13 sem revestimento apresentou maior volume de desgaste médio que os sistemas recobertos.

Tabela V.13 - Volumes de desgaste estimados do procedimento da Norma ASTM G 99-05 para os sistemas do aço H13 não temperado.

Volumes de desgaste (mm ³)	Volume Médio	Desvio Padrão
Aço H13 não temperado	0,225	0,0339
BA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme CFC)	0,1557	0,0418
AA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme bifásico)	0,0828	0,0093

A Tabela V.14, para efeito de comparação, contém os volumes de desgaste estimados através da perfilometria tridimensional e os volumes de desgaste estimados através da Norma ASTM G 99-05. Observa-se diferenças significativas entre os valores de volume de desgaste calculados através dos dois procedimentos, o que pode ser explicado pelo fato da Norma ASTM G 99-05 utilizar a largura do traço de desgaste para estimar o volume. Este procedimento considera a largura constante e o desgaste da esfera desprezível em relação ao desgaste da amostra. Entretanto, observa-se que os traços de desgaste dos sistemas estudados apresentaram variação de largura, fato demonstrado nas imagens de perfilometria e nos valores de largura estimados para cada sistema (Tabela V.12). Assim, para um traço de desgaste não-uniforme (com variação de largura), a metodologia elaborada através da perfilometria mostrou-se mais precisa do que a metodologia descrita pela Norma ASTM G

99-05, devido ao fato da metodologia proposta estimar o volume correspondente à toda a região do traço de desgaste, o que considera a variação de largura (heterogeneidade) existente. Ressalta-se a menor diferença (18 %) entre os volumes obtidos através dos dois procedimentos, para o perfil do aço H13 sem revestimento.

Tabela V.14- Comparação entre os procedimentos de perfilometria e da Norma ASTM G 99-05 na determinação dos volumes de desgaste dos sistemas do aço não temperado.

Sistemas	Volume médio de desgaste obtido por perfilometria	Volume médio de desgaste estimado através da Norma ASTM G 99-05	Diferença percentual [(Volume Norma - Volume perfilom)/ Volume perfilom] x 100
Aço H13 não temperado	0,1905 ± 0,0346	0,225 ± 0,0339	18 %
BA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme CFC)	0,0459 ± 0,0105	0,1557 ± 0,0418	239 %
AA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme bifásico)	0,0252 ± 0,0030	0,0828 ± 0,0093	229 %

A Tabela V.15, que ilustra os valores das taxas e dos coeficientes de desgaste estimados para os conjugados, demonstra que na mesma carga aplicada no teste de desgaste, o conjugado monofásico CFC Ti_{1-x}Al_xN apresentou a maior taxa de desgaste Q (8,11 x 10⁻⁵ mm³/m) e os maiores coeficientes de desgaste adimensional (K) e dimensional (k)

(HUTCHINGS, 1992), em comparação com o conjugado bifásico $Ti_{1-x}Al_xN$, com taxa de desgaste Q igual a $4,45 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$.

Estes resultados indicam e corroboram a menor resistência ao desgaste do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado, dentre os conjugados. Os valores obtidos para os coeficientes de desgaste adimensional (que depende da dureza do material) evidenciam que, em todas as durezas medidas, o conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme CFC) apresentou maiores coeficientes de desgaste, o que confirma o pior desempenho deste conjugado em desgaste. Este fato é confirmado pelos valores de coeficiente de desgaste dimensional (k) obtidos. Ressalta-se a diferença de uma ordem de grandeza entre os valores deste coeficiente, obtidos quando se compara os conjugados estudados, sugerindo que o conjugado BA monofásico CFC apresentou consideravelmente menor resistência ao desgaste do que o conjugado bifásico, sendo a resistência ao desgaste igual a $1/k$ (Tabela V.16) (HUTCHINGS, 1992). A taxa de desgaste Q do aço H13 não temperado sem revestimento foi superior à taxa dos sistemas recobertos (Tabela V.15) e sua resistência ao desgaste $1/k$ foi inferior (Tabela V.16), o que corrobora a proteção do filme $Ti_{1-x}Al_xN$ contra o desgaste do aço H13 não temperado.

Deve ser enfatizado que o coeficiente de desgaste dimensional (k), por não depender da dureza do material conjugado, torna-se um parâmetro mais abrangente e preciso para a avaliação do desgaste, devido à dificuldade existente na escolha do (s) valor (es) de dureza do conjugado, procedimento necessário para a avaliação do desgaste através do coeficiente de desgaste adimensional (K). Os valores de k encontrados na Tabela V.15 são comparáveis a valores encontrados na literatura. Testes de desgaste realizados por Bobzin et. al. (2007) de conjugados $Cr_{1-x}Al_xN$ desgastados contra esferas de Si_3N_4 6 mm (mesmas condições experimentais deste trabalho), estimaram para estes conjugados valores de k entre 0,1 e $13 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{N}$ (BOBZIN, 2007). Ressalta-se o fato do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado ter apresentado melhor desempenho em desgaste que o conjugado BA, apesar de evidências do filme do primeiro conjugado possuir adesão pior ao aço. Este resultado evidencia que, para os sistemas do aço não temperado, a alta dureza do

filme $Ti_{1-x}Al_xN$ e a alta razão H/E influenciaram mais o desgaste dos conjugados do que a adesão dos filmes em relação ao substrato.

Ressalta-se que os valores de coeficientes de desgaste K encontrados são da ordem de 10^{-5} e 10^{-4} , indicando que o desgaste não foi severo (não houve alta taxa de desgaste). A literatura considera desgaste severo quando K está entre 10^{-4} e 10^{-2} (HUTCHINGS, 1992). Estes resultados corroboram a validação da metodologia utilizada através da perfilometria tridimensional para a determinação do volume de desgaste e, conseqüentemente, da taxa de desgaste dos materiais estudados.

Tabela V.15- Taxa e coeficientes de desgaste do aço H13 não temperado e seus conjugados.

Sistemas	W (N)	S (m)	V (mm ³)	Q (mm ³ /m)	HIT (GPa)	K	k (m ² /N)
Aço H13 não temperado	7	565,8	0,1905	$3,37 \times 10^{-4}$	2,536	$1,22 \times 10^{-4}$	$4,8 \times 10^{-5}$
BA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado (filme CFC)	7	565,8	0,0459	$8,11 \times 10^{-5}$	30,824	$3,57 \times 10^{-4}$	$1,16 \times 10^{-5}$
					20,145	$2,33 \times 10^{-4}$	$1,16 \times 10^{-5}$
					6,540	$7,5 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-5}$
					3,478	$4,02 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-5}$
					2,752	$3,18 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-5}$
					2,544	$2,95 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-5}$
AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado (filme bifásico)	7	565,8	0,0252	$4,45 \times 10^{-5}$	44,265	$2,81 \times 10^{-4}$	$6,4 \times 10^{-6}$
					32,263	$2,05 \times 10^{-4}$	$6,4 \times 10^{-6}$
					25,508	$1,62 \times 10^{-4}$	$6,4 \times 10^{-6}$
					7,209	$4,58 \times 10^{-5}$	$6,4 \times 10^{-6}$
					3,026	$1,92 \times 10^{-5}$	$6,4 \times 10^{-6}$
					2,916	$1,85 \times 10^{-5}$	$6,4 \times 10^{-6}$

W: Carga aplicada no teste de desgaste; S: Distância de deslizamento; V: Volume estimado por perfilometria; Q: Taxa de desgaste; HIT: Dureza medida em cada carga do teste de dureza; K: Coeficiente de desgaste adimensional; k: Coeficiente de desgaste dimensional.

Tabela V.16- Resistência ao desgaste do aço H13 não temperado e seus conjugados.

Sistemas	1/k (N /m ²)
Aço H13 não temperado	2,08 x 10 ⁴
BA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme CFC)	8,62 x 10 ⁴ 8,62 x 10 ⁴ 8,62 x 10 ⁴ 8,62 x 10 ⁴ 8,62 x 10 ⁴
AA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme bifásico)	1,56 x 10 ⁵ 1,56 x 10 ⁵ 1,56 x 10 ⁵ 1,56 x 10 ⁵ 1,56 x 10 ⁵

5.5.1.2 Aço H13 temperado e revenido e seus conjugados

A perfilometria após o desgaste do aço H13 temperado e revenido e seus conjugados está demonstrada nas seguintes figuras . Através das Figuras 5.52 e 5.53, observa-se que a superfície após o uso do recurso de remoção de forma do conjugado AA monofásico hexagonal apresentou amplitude total (12,2 μm) (distância entre o maior pico e o vale mais

profundo) superior à do conjugado BA bifásico ($9,21 \mu\text{m}$) (HOMMELMAP 4.0), o que pode evidenciar o maior desgaste do primeiro conjugado, comparando os conjugados estudados. O mesmo fato é observado na comparação entre a amplitude total da superfície do aço temperado e revenido ($15,9 \mu\text{m}$) em relação aos perfis dos seus conjugados (Figuras 5.51, 5.52 e 5.53). Ressalta-se a existência de picos (demonstrados pelas figuras) que interferem na amplitude total e não fazem parte dos traços de desgaste, correspondendo à rugosidade das superfícies. Este fato confirma a necessidade de realização dos procedimentos de corte nas superfícies dos conjugados estudados, o que é confirmado através das análises das superfícies invertidas em relação ao eixo z (Figuras 5.54, 5.55 e 5.56), em que os picos tornam-se vales e vice-versa. Além disso, observa-se que as imagens sem inversão e invertidas dos conjugados demonstram a maior largura do traço de desgaste do conjugado AA (filme monofásico hexagonal), em relação ao outro conjugado e a largura superior do traço do aço temperado em relação aos seus conjugados, sugerindo o maior desgaste do aço e o menor desgaste do conjugado BA (filme bifásico).

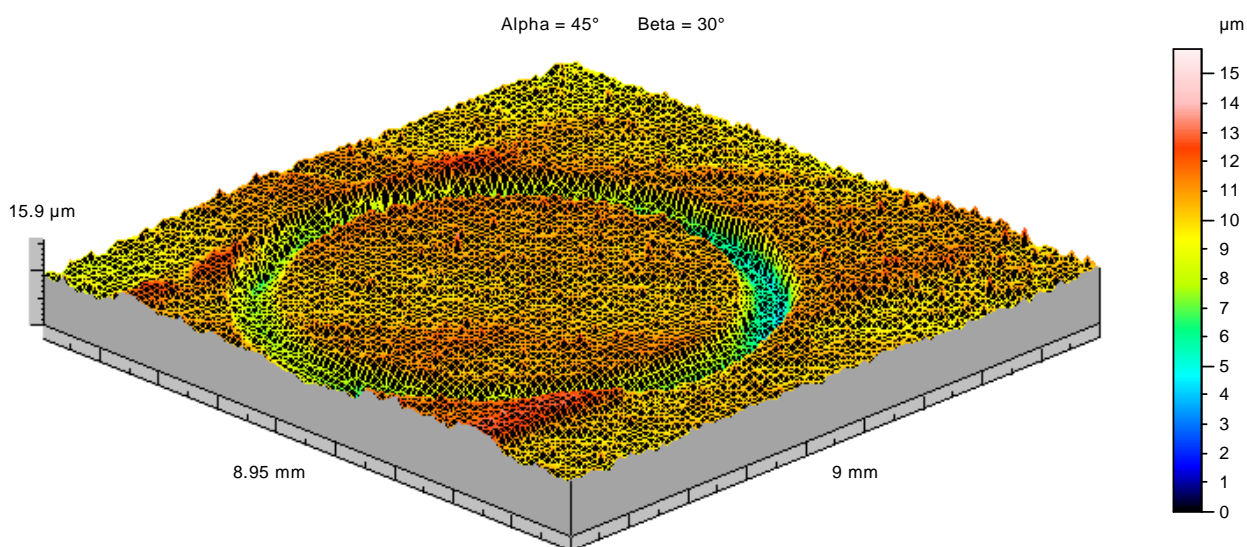


Figura 5.51- Superfície após remoção de forma do aço H13 temperado e revenido.

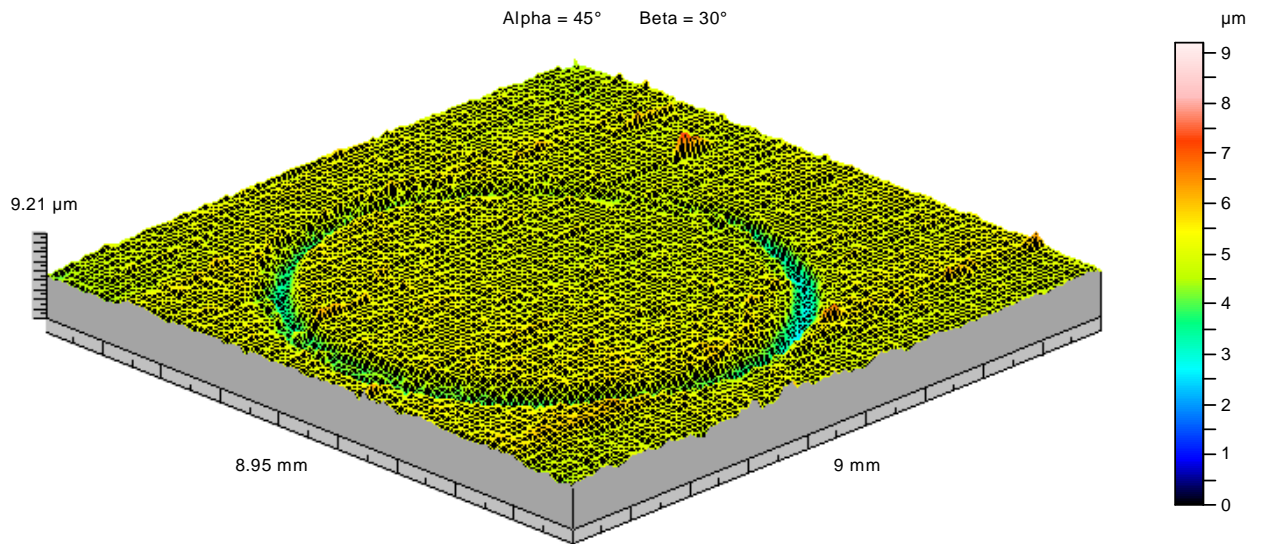


Figura 5.52 – Superfície após remoção de forma do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ temperado e revenido (filme bifásico).

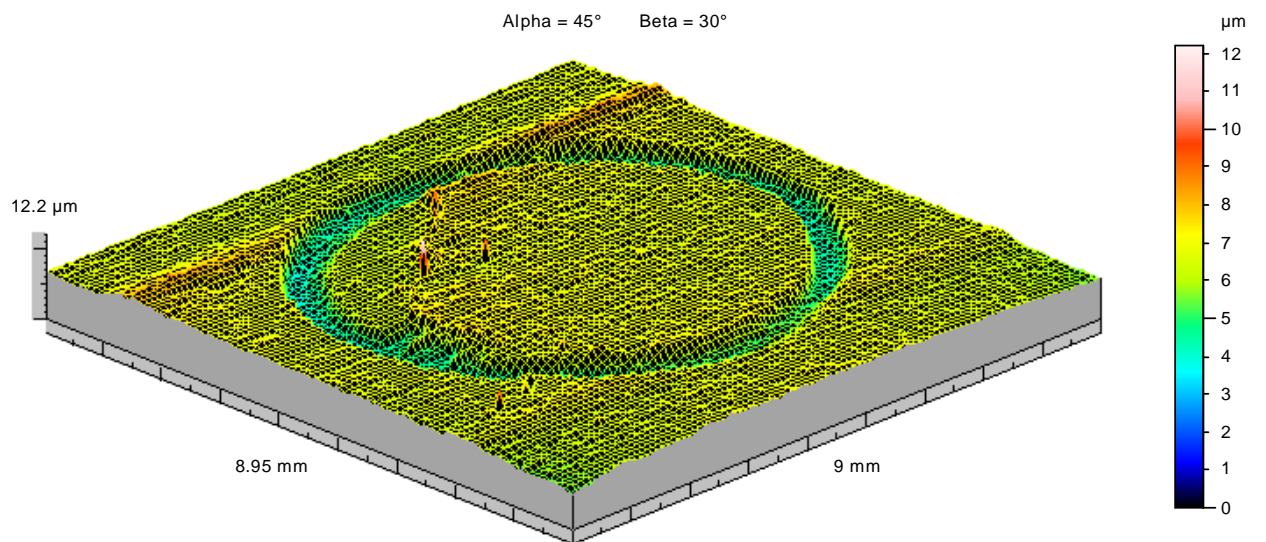


Figura 5.53- Superfície após remoção de forma do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ temperado e revenido (filme hexagonal).

As Figuras 5.58 e 5.59, correspondentes às densidades de picos das superfícies invertidas dos conjugados (que correspondem aos vales das superfícies sem inversão), evidenciam que o conjugado AA monofásico hexagonal apresenta a maior densidade de picos por mm^2 (aproximadamente 50 picos/mm^2) em amplitudes em torno de $5,5 \mu\text{m}$. A superfície do conjugado BA bifásico possui a maior concentração de picos em torno de 55 picos/mm^2 a amplitudes de aproximadamente $4,5 \mu\text{m}$, evidenciando ligeiramente uma maior concentração de vales de maiores amplitudes para o conjugado AA (filme hexagonal), o que sugere e corrobora o seu maior desgaste, comparando os conjugados.

A superfície invertida do aço temperado e revenido (Figura 5.57) apresentou a maior concentração de picos a aproximadamente $6 \mu\text{m}$, amplitude ligeiramente superior às amplitudes de maior concentração de picos dos conjugados, sugerindo o maior desgaste do aço. Ressalta-se que a delimitação da região do traço de desgaste nos histogramas de densidade de picos das superfícies invertidas do aço H13 temperado e revenido e seus conjugados englobou a realização de um corte de amplitudes menores que $4 \mu\text{m}$ na imagem do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme bifásico), um corte de amplitudes menores que $5 \mu\text{m}$ na superfície do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme hexagonal) e a amplitudes inferiores a $5,5 \mu\text{m}$ no aço temperado e revenido .

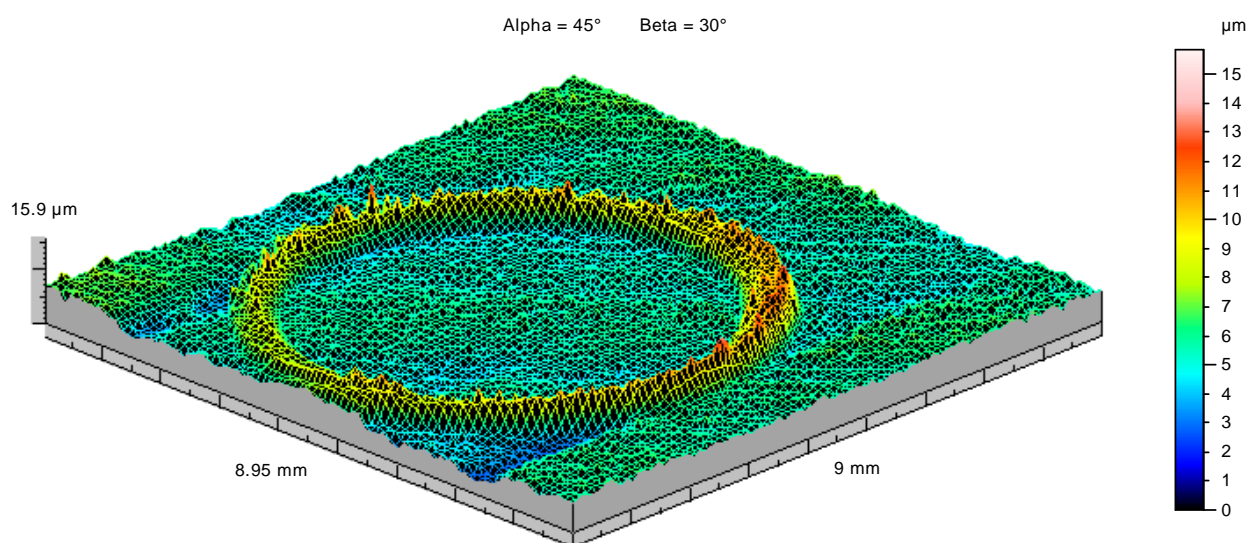


Figura 5.54- Superfície invertida do aço H13 temperado e revenido.

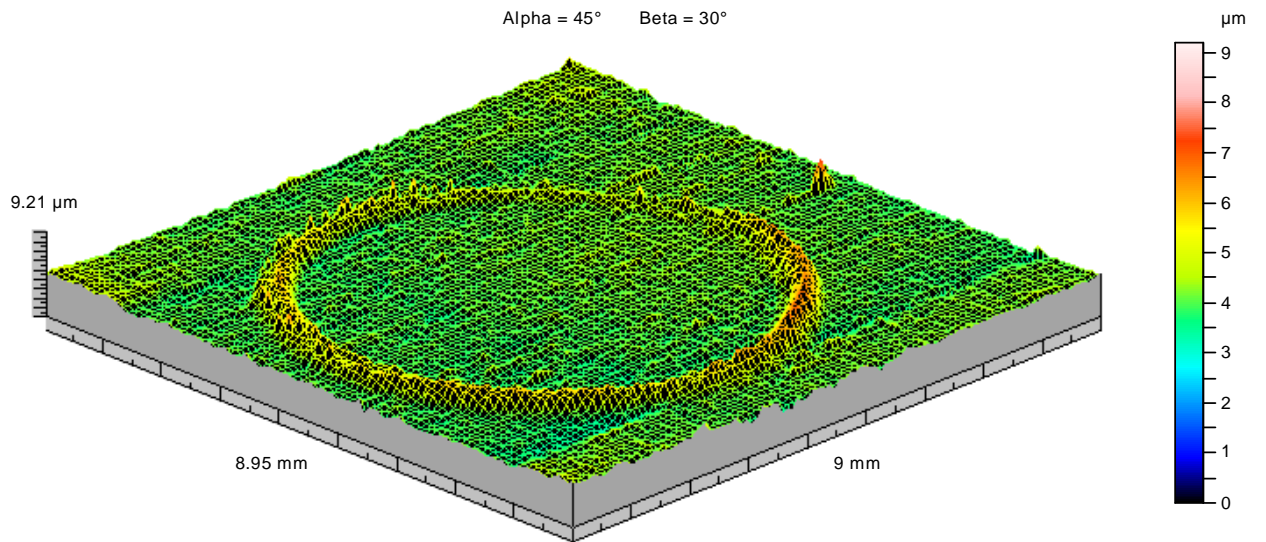


Figura 5.55- Superfície invertida do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ temperado e revenido (filme bifásico).

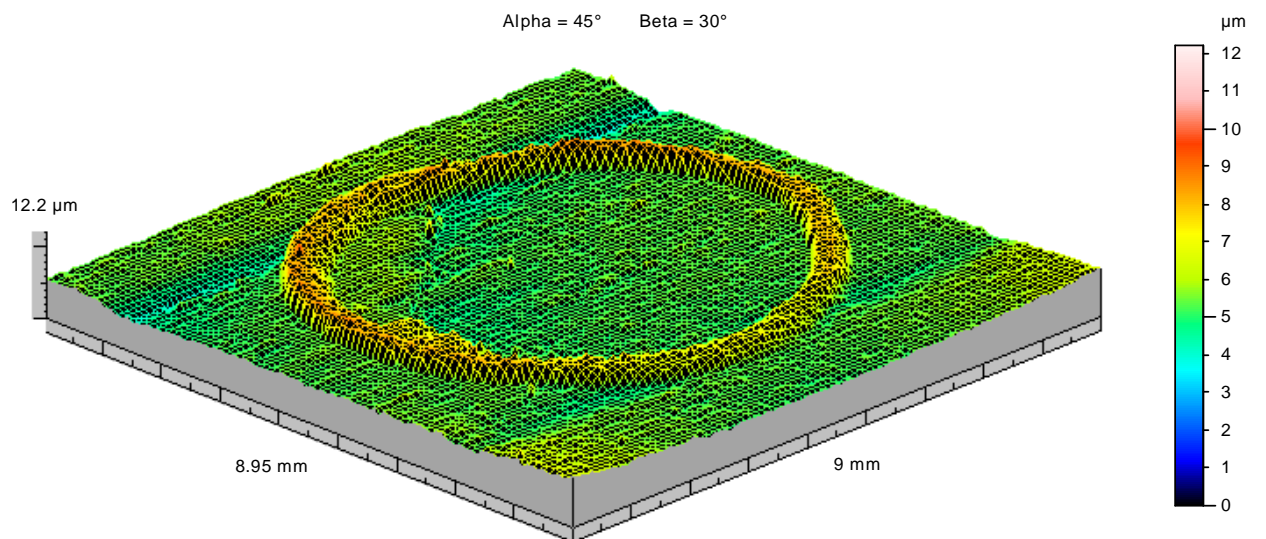


Figura 5.56- Superfície invertida do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ temperado e revenido (filme hexagonal).

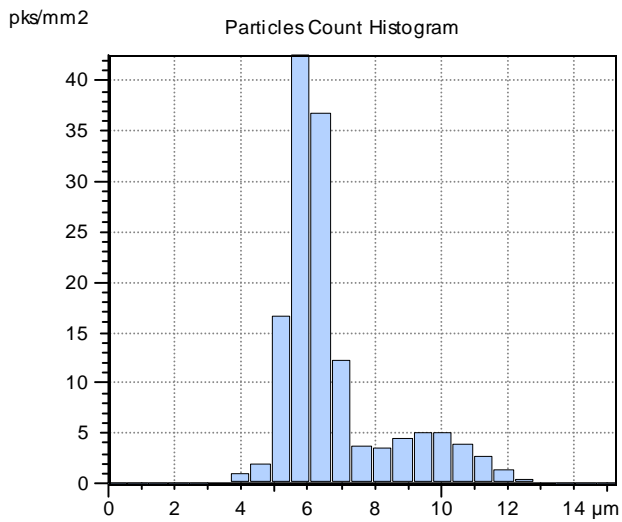


Figura 5.57- Histograma de densidade de picos da superfície invertida do aço H13 temperado e revenido.

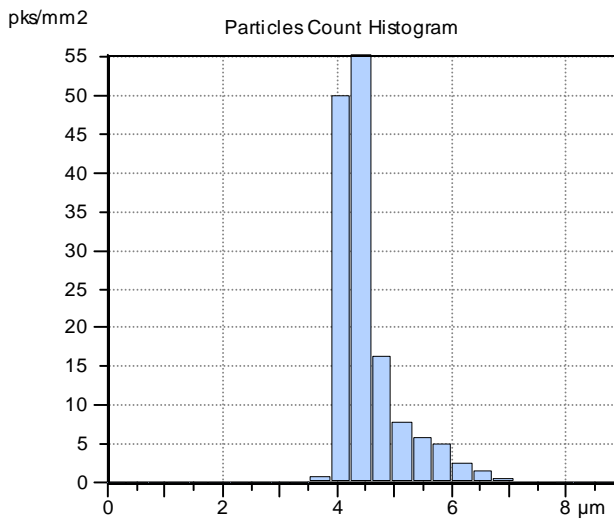


Figura 5.58- Histograma de densidade de picos da superfície invertida do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme bifásico).

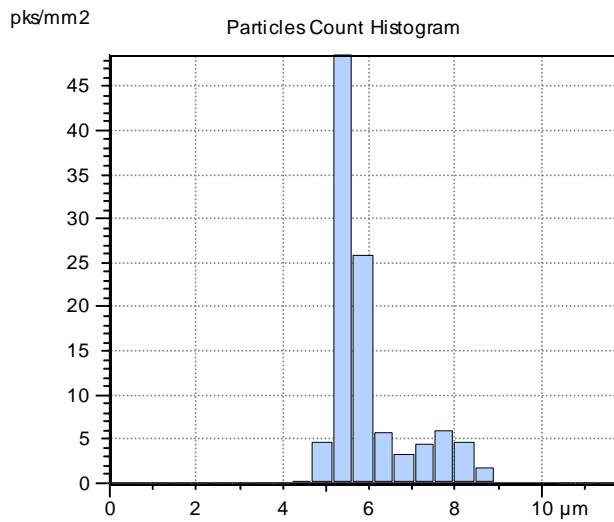


Figura 5.59- Histograma de densidade de picos da superfície invertida do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme hexagonal).

As Figuras 5.60, 5.61 e 5.62 correspondem às superfícies invertidas após o primeiro corte realizado, utilizado para delimitar a região do traço de desgaste. Estas figuras confirmam a maior amplitude e maior largura do traço de desgaste do conjugado AA monofásico hexagonal, comparando os conjugados estudados e a maior amplitude da superfície do aço sem revestimento, comparando os três sistemas. Estes fatos são corroborados pelas Figuras 5.63, 5.64 e 5.65, que correspondem à inversão em relação ao eixo z, para o retorno à posição inicial dos picos e vales.

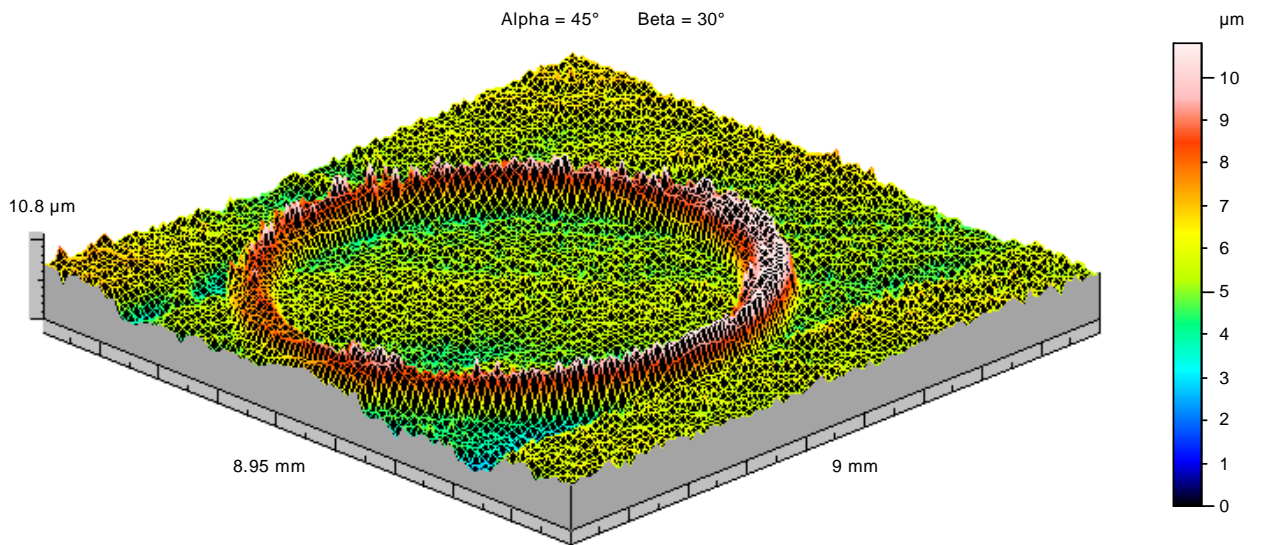


Figura 5.60- Superfície invertida após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do aço H13 temperado e revenido.

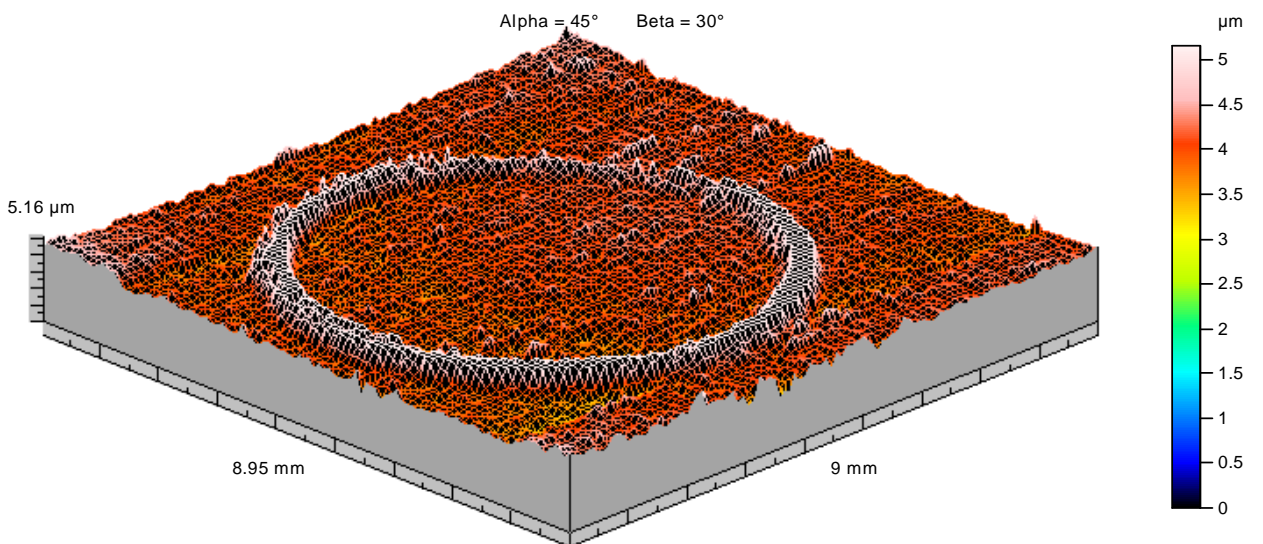


Figura 5.61- Superfície invertida após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ temperado e revenido (filme bifásico).

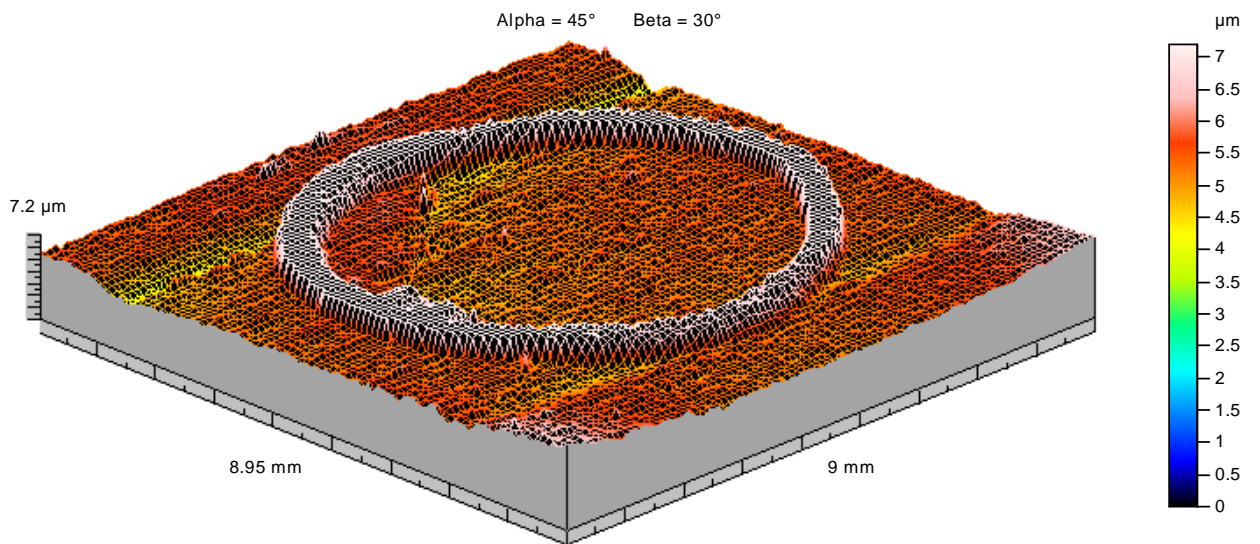


Figura 5.62- Superfície invertida após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ temperado e revenido (filme hexagonal).

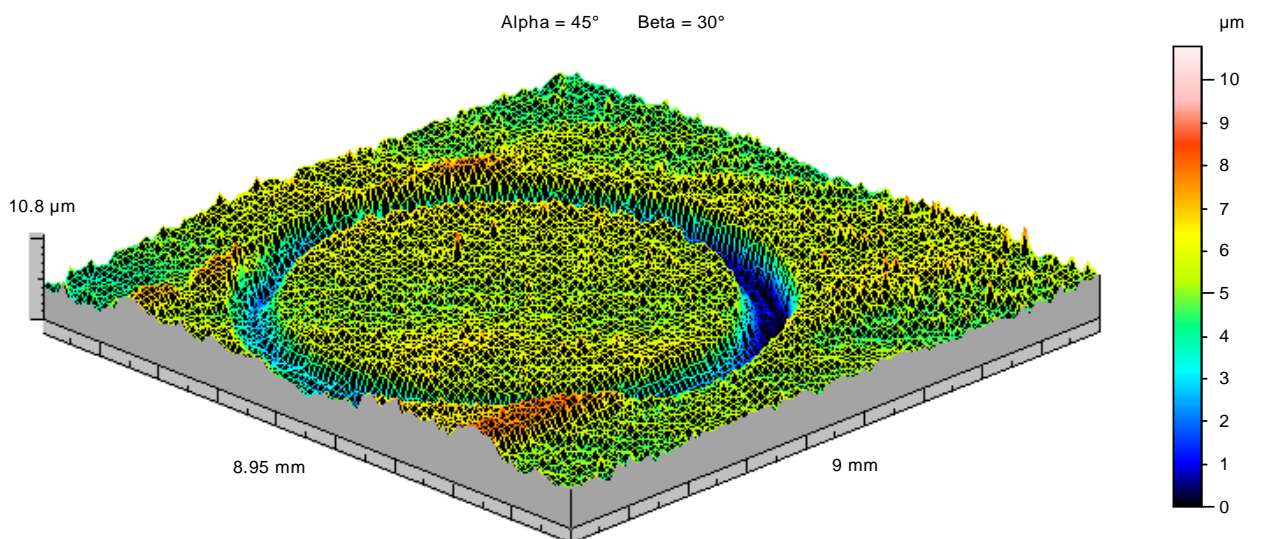


Figura 5.63- Superfície sem inversão (retorno à posição inicial) após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do aço H13 temperado e revenido.

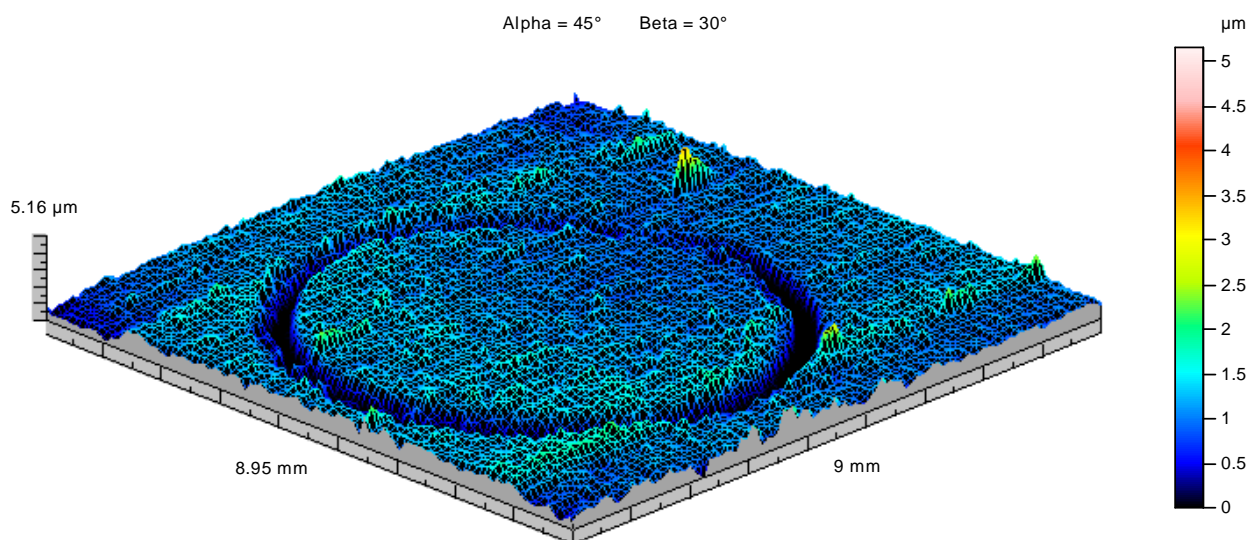


Figura 5.64- Superfície sem inversão (retorno à posição inicial) após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme bifásico).

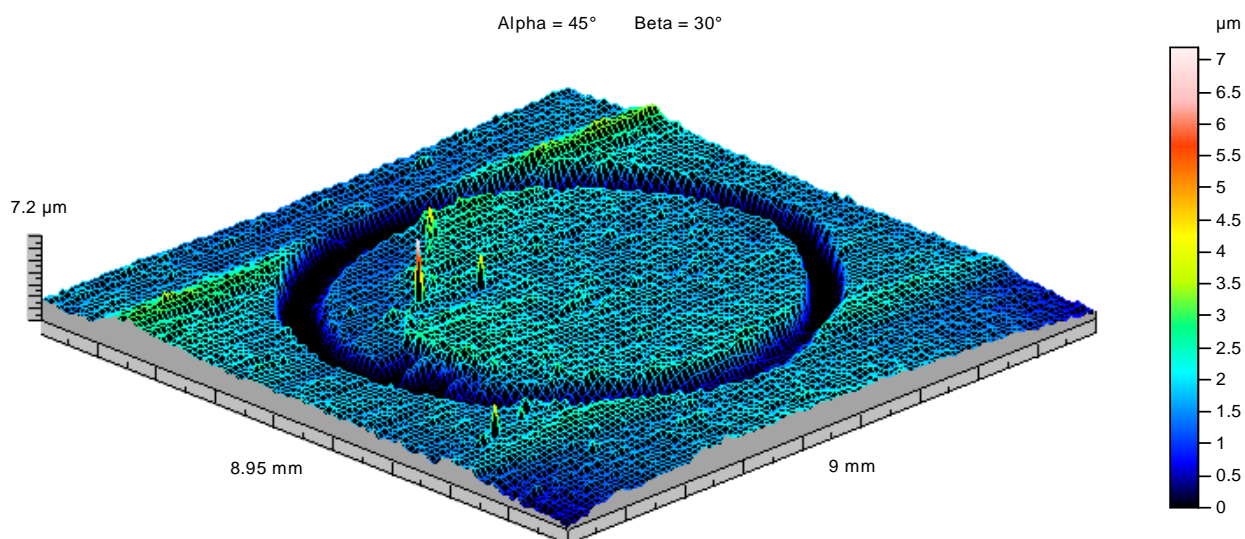


Figura 5.65- Superfície sem inversão (retorno à posição inicial) após o corte para delimitar a região do traço de desgaste do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN/H13$ temperado e revenido (filme hexagonal).

As Figuras 5.66, 5.67 e 5.68 demonstram as superfícies após o corte de 10 a 100%, realizado para excluir a interferência dos maiores picos na determinação do volume de desgaste, sendo estes picos correspondentes à rugosidade superficial que existe na superfície mesmo após o primeiro corte realizado. Estas figuras também evidenciam o melhor desempenho em desgaste do conjugado bifásico em relação ao conjugado monofásico hexagonal e dos conjugados estudados em relação ao aço H13 temperado e revenido sem revestimento.

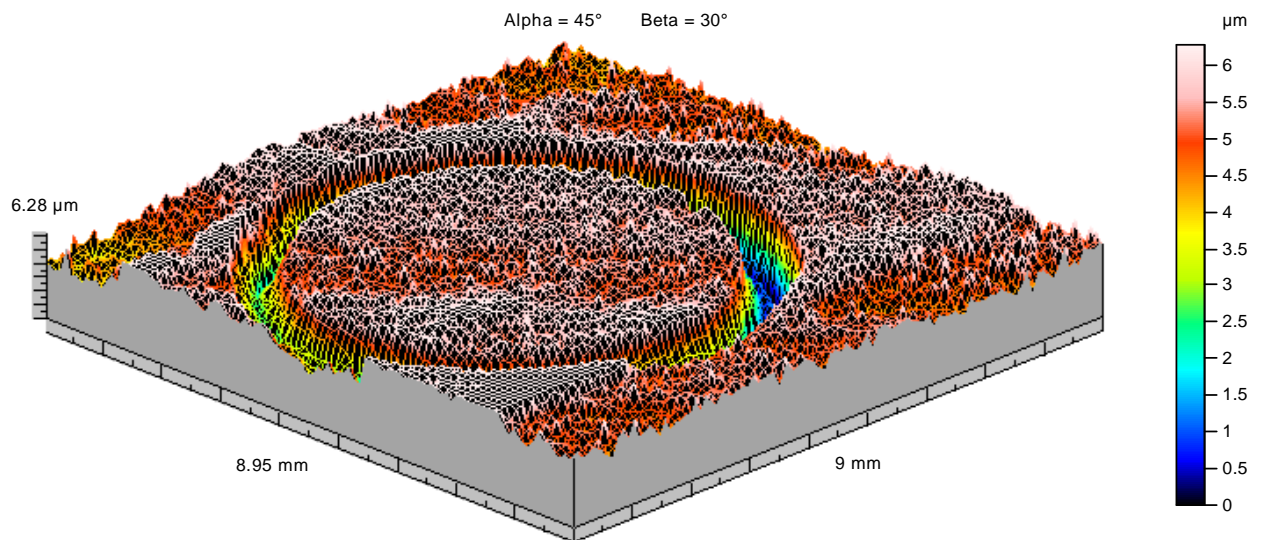


Figura 5.66- Superfície sem inversão após o corte para excluir os picos mais altos do aço H13 temperado e revenido.

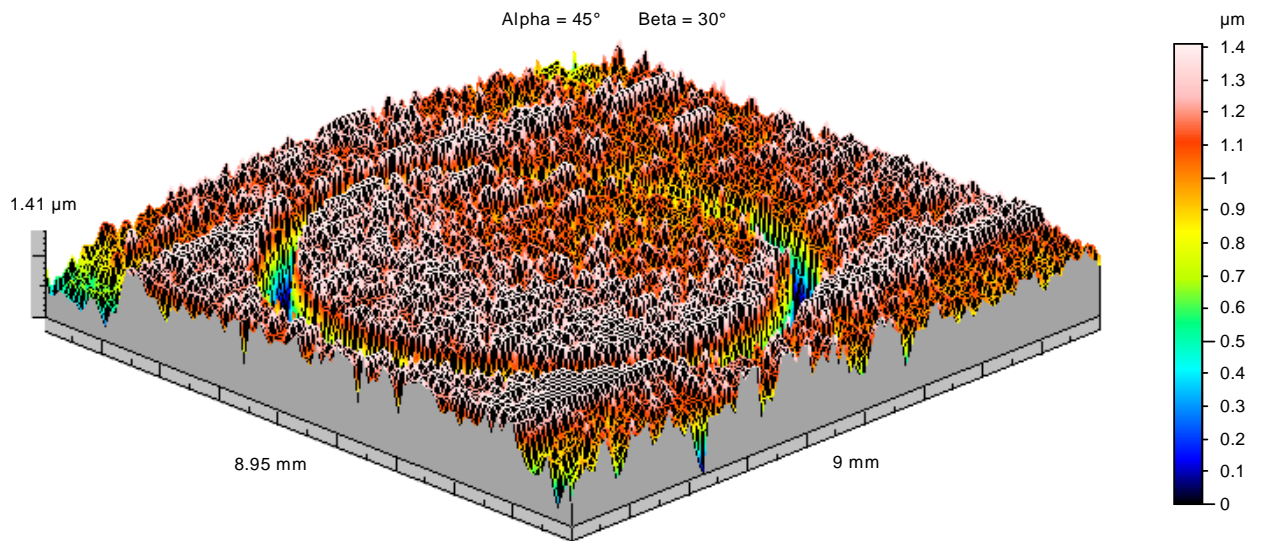


Figura 5.67- Superfície sem inversão após o corte para excluir os picos mais altos do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ temperado e revenido (filme bifásico).

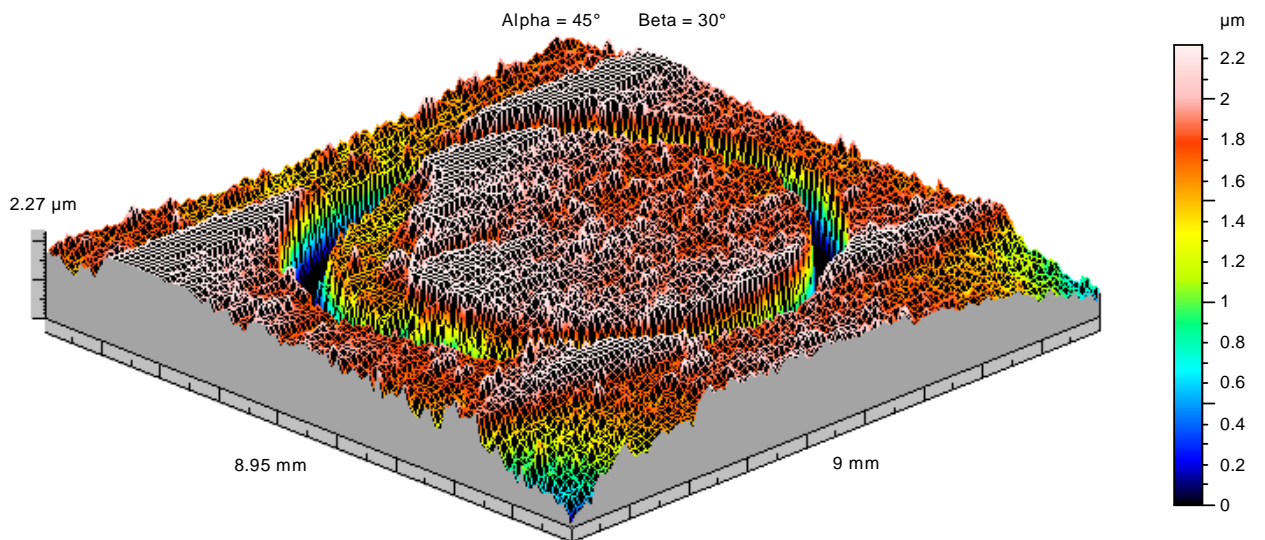


Figura 5.68- Superfície sem inversão após o corte para excluir os picos mais altos do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ temperado e revenido (filme hexagonal).

As imagens após o procedimento de “Erase Defects”, usado para estabelecer o plano de referência e excluir tudo que está em torno do traço de desgaste, estão ilustrados nas Figuras 5.69, 5.70 e 5.71. Estas imagens demonstram que a distância entre o plano de referência estabelecido e o vale mais profundo é superior para o conjugado AA (filme monofásico hexagonal), o que corrobora o seu maior desgaste em relação ao outro conjugado. Este fato também corrobora o maior desgaste do aço sem revestimento em comparação aos sistemas recobertos.

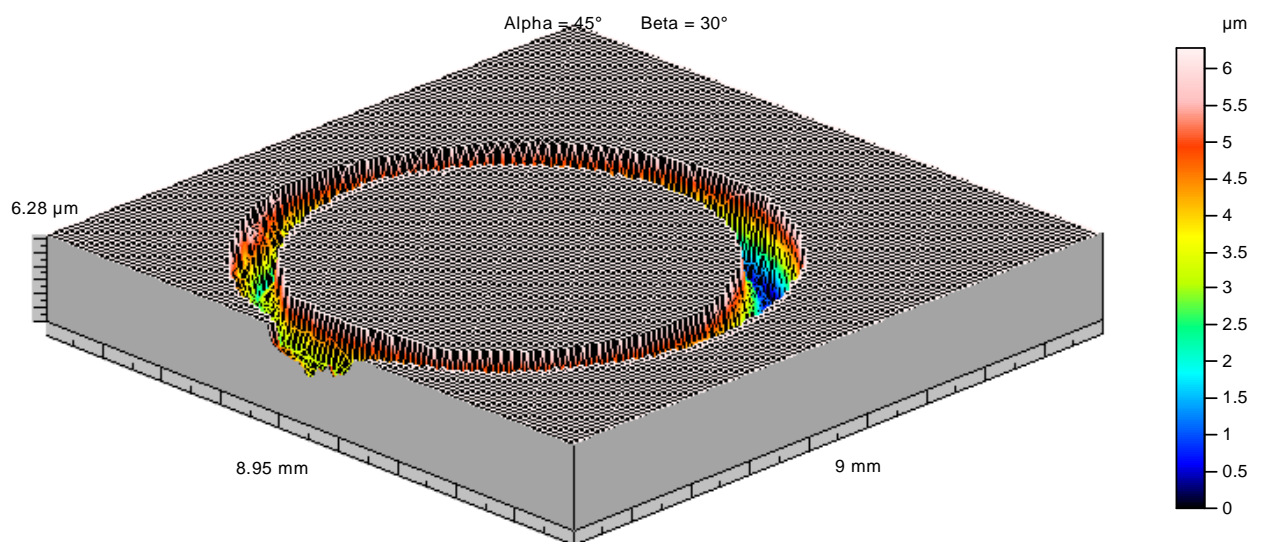


Figura 5.69- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do aço H13 temperado e revenido.

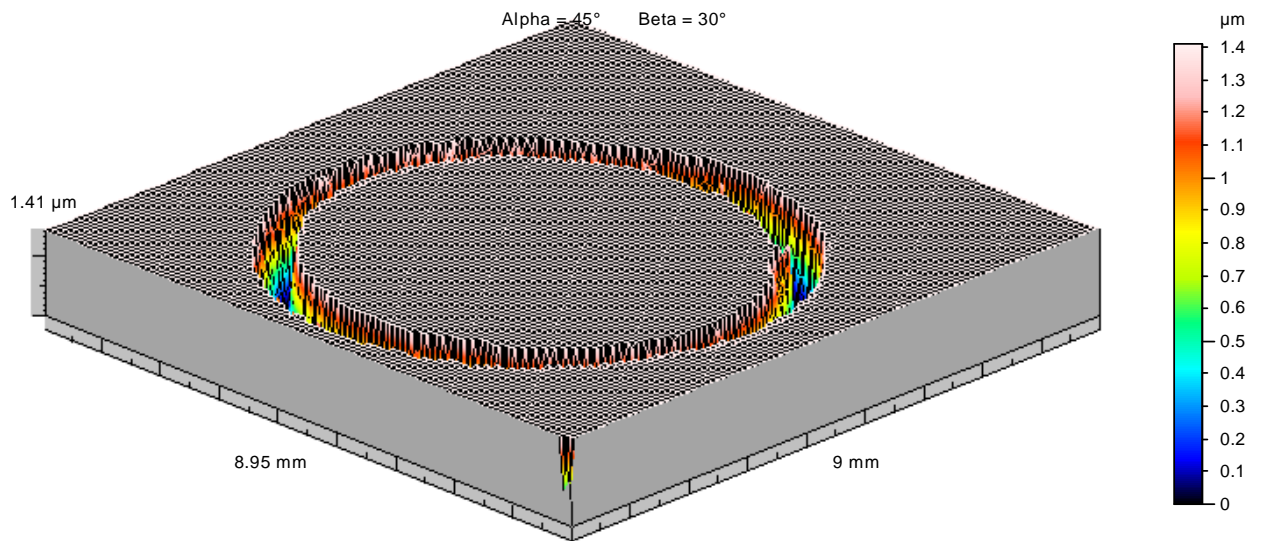


Figura 5.70- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ temperado e revenido (filme bifásico).

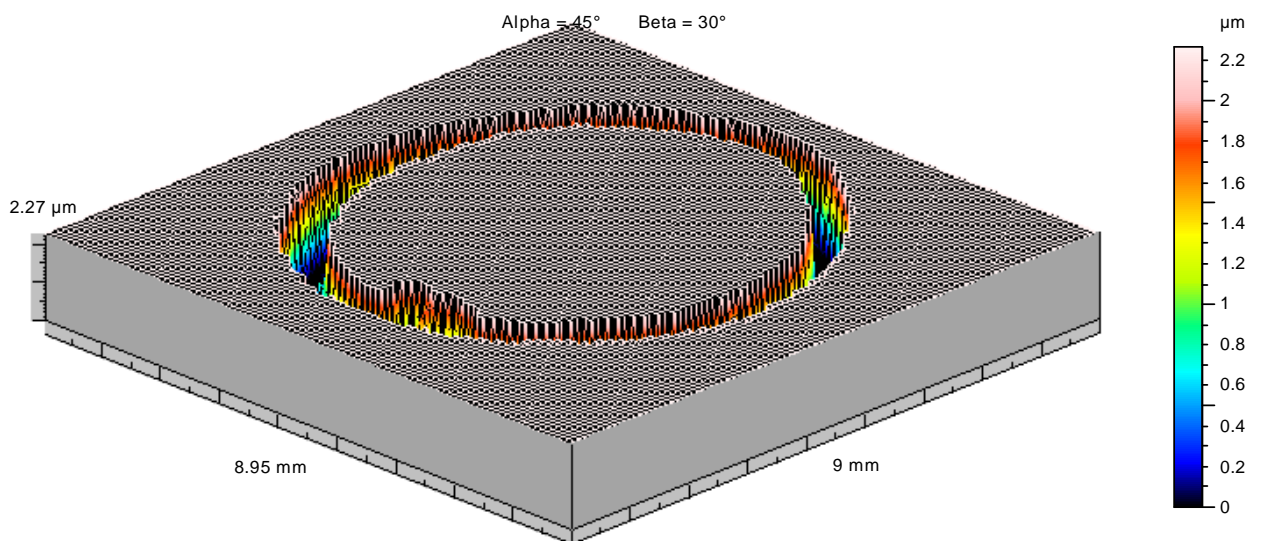
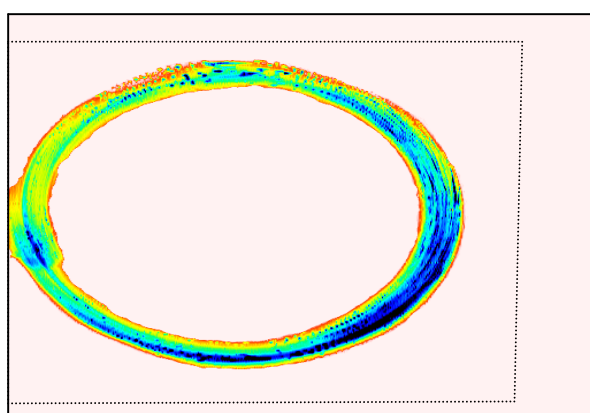


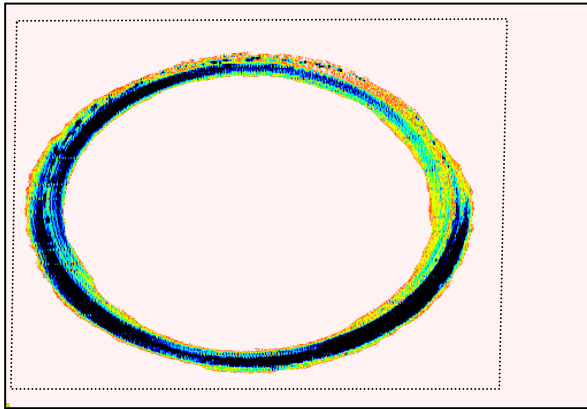
Figura 5.71- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ temperado e revenido (filme hexagonal).

As Figuras 5.72, 5.73 e 5.74 demonstram os volumes e profundidades de vales (correspondentes ao volumes e profundidades dos traços de desgaste) obtidos para as superfícies do aço H13 temperado e revenido e seus conjugados. Estas figuras sugerem que comparando os conjugados, a superfície do conjugado AA monofásico hexagonal obteve volume de desgaste ou vales ($0,0233 \text{ mm}^3$), maior que o volume do conjugado BA bifásico ($0,0105 \text{ mm}^3$), indicando a maior taxa de desgaste (volume/distância de deslizamento) (HUTCHINGS, 1992) do conjugado monofásico hexagonal, que apresenta menor dureza. Este fato é corroborado através dos valores das profundidades média e máxima dos traços de desgaste dos conjugados. Os parâmetros volume de desgaste ($0,0443 \text{ mm}^3$) e profundidades máxima ($6,28 \text{ }\mu\text{m}$) e média ($3,57 \text{ }\mu\text{m}$) do traço de desgaste foram superiores para o aço sem revestimento em relação aos seus conjugados, corroborando o pior desempenho em desgaste do aço.



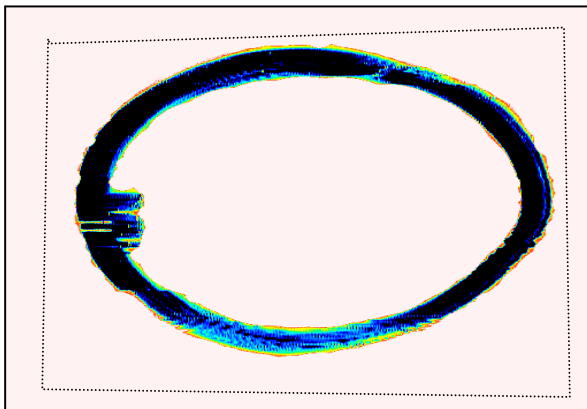
	Hole	
Surface (mm ²)	12.4	0
Volume (mm ³)	0.0443	0
Max. depth/height (μm)	6.28	0
Mean depth/height (μm)	3.57	0

Figura 5.72- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do aço H13 temperado e revenido.



	Hole	
Surface (mm ²)	10.7	0
Volume (mm ³)	0.0105	0
Max. depth/height (μm)	1.41	0
Mean depth/height (μm)	0.977	0

Figura 5.73- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN/H13 temperado e revenido (filme bifásico).



	Hole	
Surface (mm ²)	12	0
Volume (mm ³)	0.0233	0
Max. depth/height (μm)	2.27	0
Mean depth/height (μm)	1.94	0

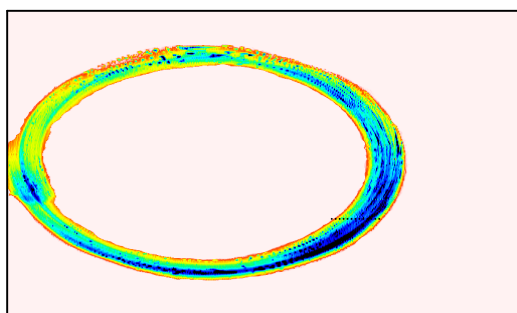
Figura 5.74- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do conjugado AA Ti_{1-x}Al_xN/H13 temperado e revenido (filme hexagonal).

Os valores dos volumes de desgaste obtidos para os sistemas do aço temperado e revenido, com a média e o desvio padrão, estão ilustrados na Tabela V.17. Estes valores confirmam o maior desgaste do conjugado AA monofásico hexagonal, comparando os conjugados estudados. Observa-se uma diferença média de volume em torno de 89% entre os volumes dos conjugados, que é significativa. Ressalta-se o fato do volume médio de desgaste do aço temperado sem revestimento ser significativamente superior aos volumes médios de desgaste dos sistemas recobertos.

Tabela V.17- Volumes de desgaste estimados por perfilometria para os sistemas do aço H13 temperado e revenido.

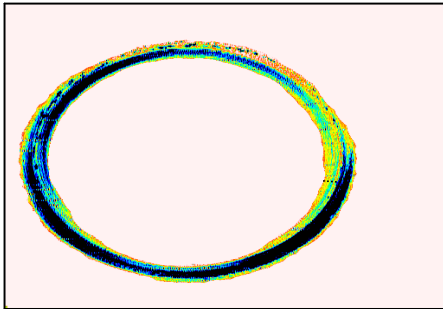
Volumes de desgaste (mm ³)	Volume Médio	Desvio padrão
Aço H13 temperado e revenido	0,0415	0,0039
BA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 temperado e revenido (filme bifásico)	0,0125	0,0021
AA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 temperado e revenido (filme hexagonal)	0,0236	0,0048

Estimou-se o volume de desgaste através da metodologia proposta pela Norma ASTM G 99-05 (itens 3.1 e 4.7), com o objetivo de validar a metodologia elaborada através da perfilometria. As Figuras 5.75, 5.76 e 5.77 ilustram a medição das larguras dos traços de desgaste (correspondentes às distâncias horizontal e oblíqua entre os pontos assinalados nos traços de desgaste).



Cursor 1	Cursor 2
X = 5.71 mm	X = 6.53 mm
Y = 6.11 mm	Y = 6.11 mm
Z = 4.92 μm	Z = 4.87 μm
Horizontal distance	0.823 mm
Variation in height	0.0435 μm
Oblique distance	0.823 mm

Figura 5.75- Demonstração da determinação da largura do traço de desgaste da superfície do aço H13 temperado e revenido.



Cursor 1	Cursor 2
X = 6.49 mm	X = 7.01 mm
Y = 5.22 mm	Y = 5.26 mm
Z = 1.41 μm	Z = 0 μm
Horizontal distance	0.52 mm
Variation in height	1.41 μm
Oblique distance	0.52 mm

Figura 5.76- Demonstração da determinação da largura do traço de desgaste da superfície do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ temperado e revenido (filme bifásico).



Cursor 1	Cursor 2
X = 7.91 mm	X = 8.34 mm
Y = 3.91 mm	Y = 3.9 mm
Z = 0 μm	Z = 1.4 μm
Horizontal distance	0.435 mm
Variation in height	1.4 μm
Oblique distance	0.435 mm

Figura 5.77- Demonstração da determinação da largura do traço de desgaste da superfície do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ temperado e revenido (filme hexagonal).

Os valores das larguras dos traços de desgaste para os sistemas do aço temperado estão demonstrados na Tabela V.18. Ressalta-se variação entre os valores de largura do traço de desgaste do conjugado AA, o que implica em um desgaste não uniforme. Este fato é demonstrado através da imagem tridimensional do traço de desgaste.

O traço de desgaste do conjugado AA (filme monofásico hexagonal) obteve a variação de largura entre 0,4169 e 0,8807 mm, contra a faixa de 0,5118 e 0,6442 mm do conjugado BA (filme bifásico), sugerindo, em média, superior largura do traço de desgaste do primeiro conjugado e corroborando o melhor desempenho do conjugado BA no desgaste.

Deve ser enfatizado que as larguras dos traços de desgaste estimadas por perfilometria estão na mesma ordem de grandeza de estudos recentes contidos na literatura, sobre o desgaste de filmes $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ contra esferas de Si_3N_4 6 mm (mesmas condições experimentais deste trabalho), em que a largura do traço de desgaste variou entre 0,26 e 0,59 mm (BOBZIN, 2007).

Os valores médios de largura estimados para o aço temperado e revenido foram muito próximos aos valores de largura do conjugado AA (filme hexagonal), o que demonstra que o parâmetro largura do traço não diferenciou estes sistemas quanto ao desgaste.

Tabela V.18- Estimativa da largura do traço de desgaste dos sistemas do aço H13 temperado e revenido.

Larguras (mm)	Primeira Medição	Segunda medição	Terceira Medição	Quarta Medição	Largura Média	Desvio padrão
Aço H13 temperado e revenido	0,691	0,757	0,823	0,955	0,807	0,112
BA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 temperado e revenido (filme bifásico)	0,531	0,613	0,654	0,52	0,579	0,065
AA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 temperado e revenido (filme hexagonal)	0,435	0,491	0,73	0,939	0,649	0,232

Os valores dos volumes de desgaste dos sistemas no aço temperado, estimados através do procedimento da Norma ASTM G 99-05, estão contidos na Tabela V.19. Os volumes de desgaste obtidos através do procedimento da Norma confirmam o maior desgaste do aço sem revestimento, dentre os sistemas estudados e o maior desgaste do conjugado AA (filme monofásico hexagonal), comparando os conjugados estudados. Assim, o procedimento descrito na Norma para a determinação do volume de desgaste confirma e valida a metodologia proposta.

Tabela V.19- Volumes de desgaste estimados do procedimento da Norma ASTM G 99-05 para os sistemas do aço H13 temperado e revenido.

Volumes de desgaste (mm ³)	Volume Médio	Desvio Padrão
Aço H13 temperado e revenido	0,2551	0,0281
BA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 temperado e revenido (filme bifásico)	0,0789	0,0203
AA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 temperado e revenido (filme hexagonal)	0,1524	0,0282

A Tabela V.20 contém a comparação entre os volumes de desgaste estimados por perfilometria tridimensional e os volumes estimados através da Norma ASTM G 99-05, sendo observadas diferenças entre os valores de volume obtidos nos dois procedimentos, o que era esperado porque a metodologia da Norma ASTM G 99-05 considera a largura constante e o desgaste da esfera desprezível em relação ao desgaste da amostra. Como os traços de desgaste dos sistemas estudados, principalmente do conjugado AA monofásico hexagonal, apresentaram variação de largura, a metodologia elaborada através da perfilometria apresentou-se mais adequada do que a metodologia descrita pela Norma

ASTM G 99-05, pelo fato da perfilometria considerar toda a área do traço de desgaste para estimar o volume.

Tabela V.20- Comparação entre os procedimentos de perfilometria e da Norma ASTM G 99-05 na determinação dos volumes de desgaste dos sistemas do aço temperado e revenido.

Sistemas	Volume médio de desgaste obtido por perfilometria	Volume médio de desgaste estimado através da Norma ASTM G 99-05	Diferença percentual [(Volume Norma- perfilom)/ Volume perfilom] x 100
Aço H13 temperado e revenido	0,0415 ± 0,0039	0,2551 ± 0,0281	515 %
BA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 temperado e revenido (filme bifásico)	0,0125 ± 0,0021	0,0789 ± 0,0203	531 %
AA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 temperado e revenido (filme hexagonal)	0,0236 ± 0,0048	0,1524 ± 0,0282	546 %

As taxas e os coeficientes de desgaste estimados para os sistemas do aço temperado estão contidos na Tabela V.21, onde observa-se que o conjugado AA monofásico hexagonal apresentou taxa de desgaste Q ($4,17 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$) e coeficientes de desgaste adimensional (K) e dimensional (k) (HUTCHINGS, 1992) superiores aos do conjugado BA bifásico (taxa

Q igual a $2,21 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{m}$), o que corrobora o desgaste superior do conjugado AA monofásico hexagonal, comparando os conjugados. Ressalta-se, comparando os conjugados, que em todas as durezas medidas, o conjugado AA obteve valores superiores de coeficientes de desgaste adimensional (que depende da dureza do material), indicando maior severidade de desgaste, o que é corroborado pelos coeficientes de desgaste dimensionais (k) obtidos. Como a resistência ao desgaste é definida como $1/k$, pode-se afirmar que comparando os conjugados estudados, o conjugado AA monofásico hexagonal apresentou menor resistência ao desgaste (Tabela V.22). O aço H13 temperado e revenido sem revestimento obteve a menor resistência ao desgaste por deslizamento $1/k$ (Tabela V.22), confirmando a viabilidade do uso do filme $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (HUTCHINGS, 1992). Os valores de coeficiente de desgaste adimensional K obtidos são da ordem de 10^{-5} e 10^{-4} , indicando que o desgaste destes sistemas não foi severo (HUTCHINGS, 1992).

Testes de desgaste realizados por Bobzin et. al. (2007) de conjugados $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ desgastados contra esferas de Si_3N_4 6 mm (mesmas condições experimentais deste trabalho), estimaram para estes conjugados valores de k entre 0,1 e $13 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{N}$, o que sugere que os valores de k (parâmetro mais abrangente para a avaliação do desgaste) contidos na Tabela V.21 são comparáveis a valores encontrados na literatura, o que confirma a viabilidade da metodologia proposta por perfilometria para determinar o volume de desgaste (BOBZIN, 2007).

Os resultados obtidos por perfilometria tridimensional evidenciando que, dentre os três sistemas do aço H13 temperado estudados, o conjugado BA (filme bifásico) apresentou o melhor desempenho em desgaste, podem ser explicados pelo fato deste conjugado possuir alta dureza e um alto índice H/E, o que implica em maior deformação elástica até a falha em desgaste (BEAKE, 2006; LEYLAND, 2000; PHARR, 1998). Este conjunto de fatores explica o seu superior desempenho em desgaste.

Tabela V.21 - Taxa e coeficientes de desgaste do aço H13 temperado e revenido e seus conjugados.

Sistemas	W (N)	S (m)	V (mm ³)	Q (mm ³ /m)	HIT (GPa)	K	k (m ² /N)
Aço H13 temperado e revenido	7	565,8	0,0415	$7,33 \times 10^{-5}$	3,12	$3,3 \times 10^{-5}$	$1,05 \times 10^{-5}$
BA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 temperado e revenido (filme bifásico)	7	565,8	0,0125	$2,21 \times 10^{-5}$	52,43	$1,66 \times 10^{-4}$	$3,16 \times 10^{-6}$
					42,20	$1,33 \times 10^{-4}$	$3,16 \times 10^{-6}$
					24,43	$7,71 \times 10^{-5}$	$3,16 \times 10^{-6}$
					15,90	$5,01 \times 10^{-5}$	$3,16 \times 10^{-6}$
					9,27	$2,92 \times 10^{-5}$	$3,16 \times 10^{-6}$
					8,08	$2,55 \times 10^{-5}$	$3,16 \times 10^{-6}$
AA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 temperado e revenido (filme hexagonal)	7	565,8	0,0236	$4,17 \times 10^{-5}$	14,32	$8,53 \times 10^{-5}$	$5,96 \times 10^{-6}$
					10,76	$6,41 \times 10^{-5}$	$5,96 \times 10^{-6}$
					8,38	$5,17 \times 10^{-5}$	$5,96 \times 10^{-6}$
					8,68	$4,99 \times 10^{-5}$	$5,96 \times 10^{-6}$
					7,75	$4,62 \times 10^{-5}$	$5,96 \times 10^{-6}$
					7,56	$4,5 \times 10^{-5}$	$5,96 \times 10^{-6}$

W: Carga aplicada no teste de desgaste; S: Distância de deslizamento; V: Volume estimado por perfilometria; Q: Taxa de desgaste; HIT: Dureza medida em cada carga do teste de dureza; K: Coeficiente de desgaste adimensional; k: Coeficiente de desgaste dimensional

5.5.1.3 Comparação entre o desgaste dos sistemas do aço H13 não temperado e do aço H13 temperado e revenido

A Tabela V.23 contém valores comparativos dos volumes de desgaste, taxa Q e coeficiente de desgaste dimensional k para os sistemas do aço temperado e não temperado. Através da tabela, observa-se que a têmpera e o revenimento do aço H13 melhoraram significativamente o seu desempenho em desgaste, resultando em menor volume, taxa e severidade de desgaste, devido ao aumento da dureza. O desempenho em desgaste do conjugado BA (filme bifásico) do aço temperado e revenido foi superior, em comparação ao conjugado BA (filme monofásico CFC) do aço não temperado.

Provavelmente, devido à maior dureza do substrato H13 temperado e do fato do seu filme ser bifásico (mais duro) do que o filme do aço não temperado (monofásico CFC e menos duro). Em relação aos conjugados AA, a resistência ao desgaste ($1/k$) do conjugado do aço temperado (filme monofásico hexagonal) foi ligeiramente maior, apesar da menor dureza do seu filme, devido à influência da maior dureza do aço H13 temperado e revenido (7,56 GPa a 1900 mN), em relação ao aço não temperado (2,916 GPa a 1900 mN) (WILLIAMS, 2005; HUTCHINGS, 1992).

Tabela V.23- Tabela comparativa entre a taxa e coeficiente de desgaste dimensional dos sistemas dos aços H13 temperado e revenido e H13 não temperado.

Sistemas	V (mm ³)	Q (mm ³ /m)	k (m ² /N)
Aço H13 não temperado	0,1905	$3,37 \times 10^{-4}$	$4,8 \times 10^{-5}$
BA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme CFC)	0,0459	$8,11 \times 10^{-5}$	$1,16 \times 10^{-5}$
AA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme bifásico)	0,0252	$4,45 \times 10^{-5}$	$6,4 \times 10^{-6}$
Aço H13 temperado e revenido	0,0415	$7,33 \times 10^{-5}$	$1,05 \times 10^{-5}$
BA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 temperado e revenido (filme bifásico)	0,0125	$2,21 \times 10^{-5}$	$3,16 \times 10^{-6}$
AA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 temperado e revenido (filme hexagonal)	0,0236	$4,17 \times 10^{-5}$	$5,96 \times 10^{-6}$

V: Volume estimado por perfilometria; Q: Taxa de desgaste; k: Coeficiente de desgaste dimensional

5.5.2 Perfilometria após o desgaste contra WC-Co

Como descrito na Metodologia, foram realizados testes de desgaste dos conjugados e do aço não temperado contra WC-Co para corroborar a metodologia utilizada para estimar o volume de desgaste. O uso do WC-Co é explicado pela sua maior faixa de dureza dentre as esferas disponíveis, o que assegura o seu maior efeito abrasivo (Tabela IV.1) (HUTCHINGS, 1992). Estes testes foram feitos apenas com os sistemas do aço não temperado devido à maior disponibilidade de amostras existentes destes sistemas.

Para ilustrar o desgaste dos sistemas do aço H13 não temperado contra WC-Co, obteve-se imagens das superfícies estudadas após o procedimento de “Erase Defects”, usado para estabelecer o plano de referência e excluir toda a rugosidade externa aos traços de desgaste das superfícies, demonstradas nas Figuras 5.78, 5.79 e 5.80. Comparando os conjugados estudados, observa-se que a amplitude total do perfil do conjugado BA (conjugado de menor dureza) é significativamente superior à do outro conjugado, sugerindo o maior desgaste do conjugado BA (filme CFC) contra WC-Co, dentre os conjugados (HOMMELMAP 4.0).

As Figuras 5.81, 5.82 e 5.83 ilustram os volumes e profundidades de vales obtidos para os sistemas após o desgaste contra WC-Co. Estas imagens demonstram a menor resistência ao desgaste (maior volume e profundidade média) do aço H13 não temperado sem revestimento e a maior resistência ao desgaste do conjugado AA (filme bifásico), que apresenta menor volume e profundidades média e máxima da superfície, além de maior dureza.

Os resultados obtidos para os sistemas do aço H13 não temperado após o desgaste contra WC-Co confirmam os resultados obtidos após o desgaste contra Si_3N_4 , em relação ao

melhor desempenho do conjugado AA (mais duro) e pior desempenho do aço H13 sem revestimento.

Ressalta-se que os volumes de desgaste obtidos para o mesmo material contra WC-Co foram inferiores ao volumes de desgaste contra Si_3N_4 , o que corrobora a influência do abrasivo e do par em contato (tribo-sistema), nos resultados dos testes de desgaste (KATO, 2000).

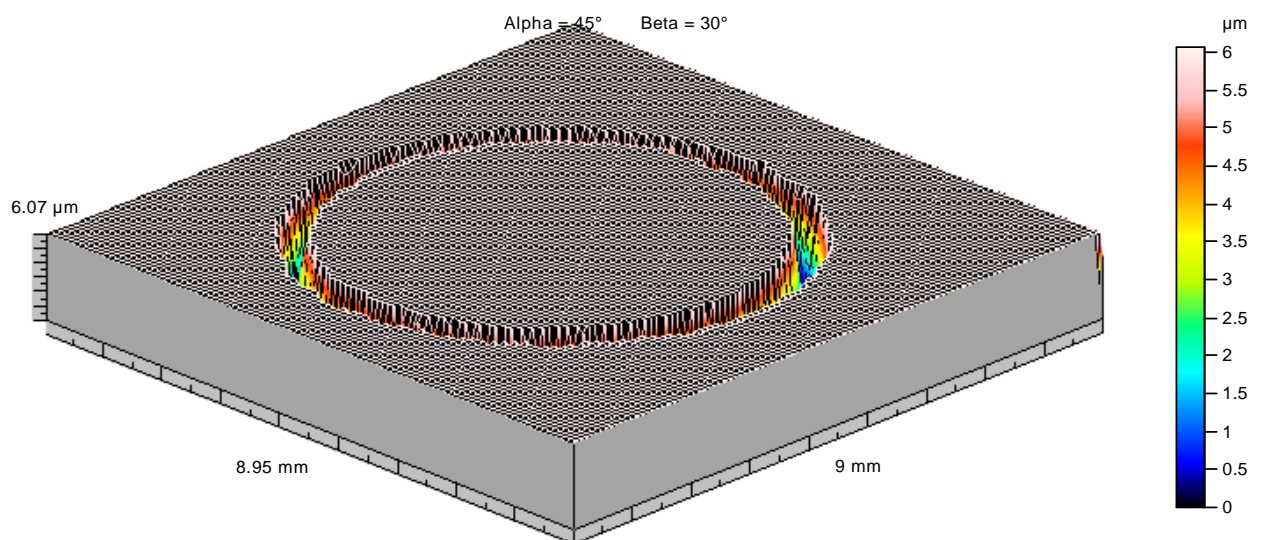


Figura 5.78- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do aço H13 não temperado após desgaste contra WC-Co.

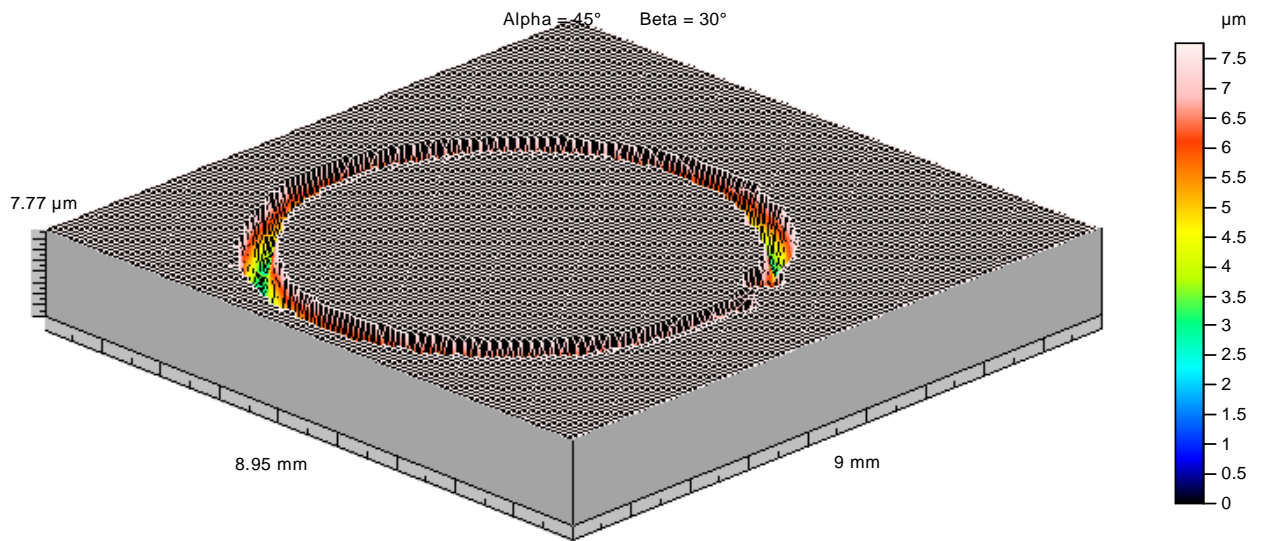


Figura 5.79- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado após desgaste contra WC-Co (filme CFC).

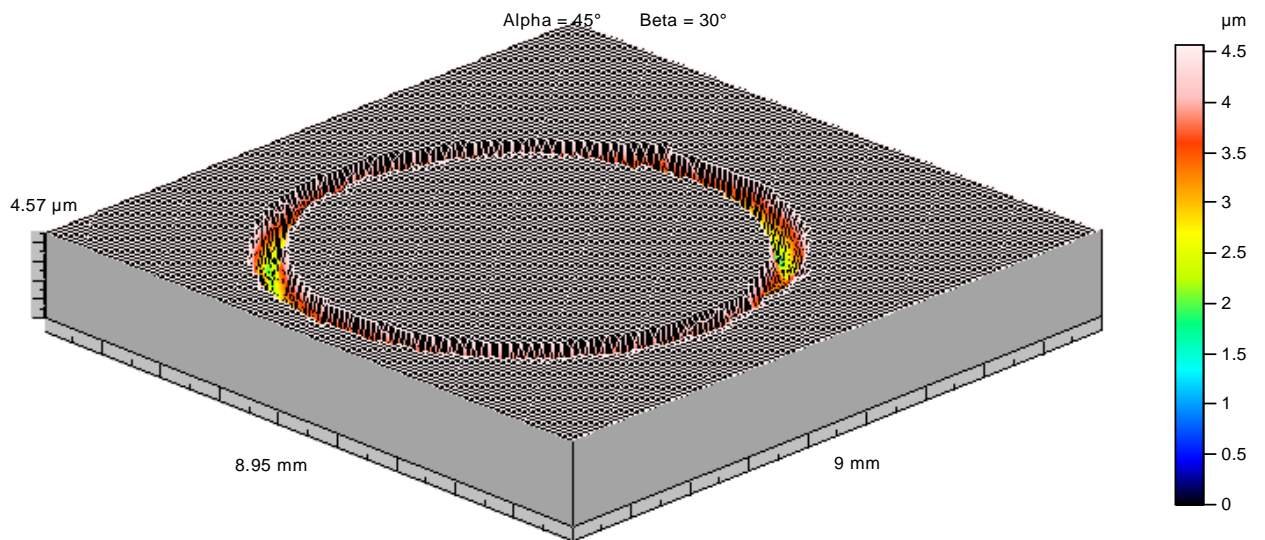
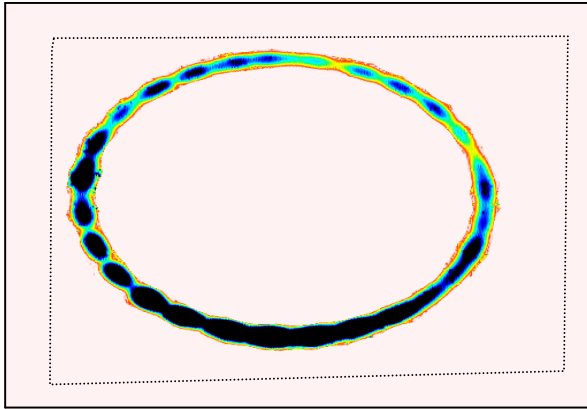
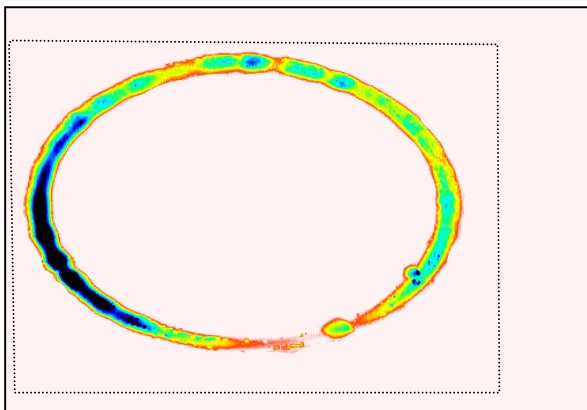


Figura 5.80- Superfície sem inversão após o “Erase Defects” do conjugado AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}/\text{H13}$ não temperado após desgaste contra WC-Co (filme bifásico).



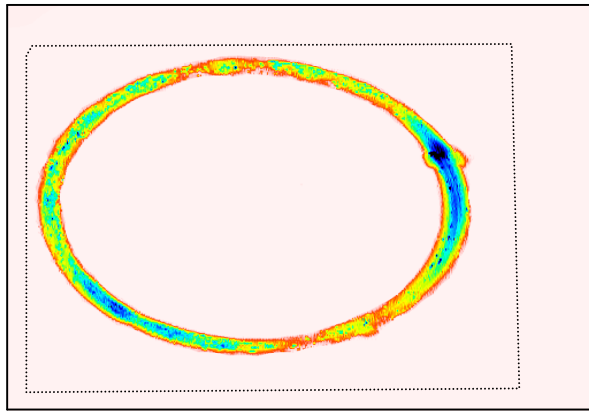
	Hole	
Surface (mm ²)	8.06	0
Volume (mm ³)	0.0337	0
Max. depth/height (μm)	6.07	0
Mean depth/height (μm)	4.18	0

Figura 5.81- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do aço H13 não temperado após desgaste contra WC-Co.



	Hole	
Surface (mm ²)	8.05	0
Volume (mm ³)	0.0298	0
Max. depth/height (μm)	7.77	0
Mean depth/height (μm)	3.71	0

Figura 5.82- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do conjugado BA Ti_{1-x}Al_xN/H13 não temperado após desgaste contra WC-Co (filme CFC).



	Hole	
Surface (mm ²)	8.18	0
Volume (mm ³)	0.0152	0
Max. depth/height (μm)	4.57	0
Mean depth/height (μm)	1.86	0

Figura 5.83- Volume e profundidade de vales e picos da superfície do conjugado AA Ti_{1-x}Al_xN/H13 não temperado após desgaste contra WC-Co (filme bifásico).

A Tabela V.24 contém os valores dos volumes de desgaste obtidos para os sistemas do aço não temperado após o desgaste contra WC-Co, com a média e o desvio padrão, corroborando o melhor desempenho do conjugado AA (de filme bifásico, maior dureza e maior H/E) em desgaste, em comparação ao outro conjugado.

Tabela V.24 - Volumes de desgaste estimados por perfilometria para os sistemas do aço H13 não temperado após desgaste contra WC-Co.

Volumes de desgaste (mm ³)	Volume Médio	Desvio padrão
Aço H13 não temperado	0,0326	0,0015
BA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme CFC)	0,0275	0,0033
AA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme bifásico)	0,019	0,0053

As taxas e os coeficientes de desgaste estimados para os sistemas do aço não temperado após o desgaste contra WC-Co estão contidos na Tabela V.25. Esta tabela corrobora os resultados obtidos após o desgaste destes sistemas contra nitreto de silício, pois a deposição de ambos os filmes aumentou a resistência ao desgaste (1/k) do aço H13 não temperado, com o melhor desempenho do conjugado AA (filme bifásico e com maior dureza). Ressalta-se que na maior carga aplicada para a medição de dureza (1900 mN), ambos os conjugados apresentaram valores de coeficientes de desgaste dimensionais k inferiores ao aço sem revestimento, evidenciando menor severidade de desgaste.

Os resultados dos testes de desgaste contra WC-Co também evidenciam que a dureza e o fator H/E foram fatores muito importantes no desgaste dos sistemas.

A Tabela V.26 contém resultados da resistência ao desgaste (1/k) (HUTCHINGS, 1992) dos sistemas do aço não temperado após o desgaste contra WC-Co, corroborando o melhor desempenho (maior resistência ao desgaste) do conjugado AA (que possui maior dureza e razão H/E).

Tabela V.25- Taxa e coeficientes de desgaste do aço H13 não temperado e seus conjugados após desgaste contra WC-Co.

Sistemas	W (N)	S (m)	V (mm ³)	Q (mm ³ /m)	HIT (GPa)	K	k (m ² /N)
Aço H13 não temperado	7	565,8	0,0326	$5,76 \times 10^{-5}$	2,536	$2,09 \times 10^{-5}$	$8,23 \times 10^{-6}$
BA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme CFC)	7	565,8	0,0275	$4,86 \times 10^{-5}$	30,824	$2,14 \times 10^{-4}$	$6,94 \times 10^{-6}$
					20,145	$1,4 \times 10^{-4}$	$6,94 \times 10^{-6}$
					6,540	$4,54 \times 10^{-5}$	$6,94 \times 10^{-6}$
					3,478	$2,4 \times 10^{-5}$	$6,94 \times 10^{-6}$
					2,752	$1,9 \times 10^{-5}$	$6,94 \times 10^{-6}$
					2,544	$1,77 \times 10^{-5}$	$6,94 \times 10^{-6}$
AA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme bifásico)	7	565,8	0,019	$3,36 \times 10^{-5}$	44,265	$2,12 \times 10^{-4}$	$4,8 \times 10^{-6}$
					32,263	$1,55 \times 10^{-4}$	$4,8 \times 10^{-6}$
					25,508	$1,2 \times 10^{-4}$	$4,8 \times 10^{-6}$
					7,209	$3,5 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-6}$
					3,026	$1,45 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-6}$
					2,916	$1,4 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-6}$

W: Carga aplicada no teste de desgaste; S: Distância de deslizamento; V: Volume estimado por perfilometria; Q: Taxa de desgaste; HIT: Dureza medida em cada carga do teste de dureza; K: Coeficiente de desgaste adimensional; k: Coeficiente de desgaste dimensional.

Tabela V.26- Resistência ao desgaste do aço H13 não temperado e seus conjugados contra WC-Co.

Sistemas	1/k (N /m ²)
Aço H13 não temperado	1,21 x 10 ⁵
BA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme CFC)	1,44 x 10 ⁵ 1,44 x 10 ⁵ 1,44 x 10 ⁵ 1,44 x 10 ⁵ 1,44 x 10 ⁵
AA Ti _{1-x} Al _x N/ H13 não temperado (filme bifásico)	2,08 x 10 ⁵ 2,08 x 10 ⁵ 2,08 x 10 ⁵ 2,08 x 10 ⁵ 2,08 x 10 ⁵

Os resultados obtidos por perfilometria demonstram que a resistência ao desgaste dos conjugados estudados foi muito dependente da dureza do conjugado e da dureza do substrato estudado. Como a estrutura cristalina afeta a dureza dos filmes e o tratamento térmico de têmpera e revenimento afeta a dureza dos substratos, observa-se que estes dois fatores tiveram influência significativa no desgaste dos sistemas estudados.

5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) antes do desgaste

De acordo com os resultados da análise de EDS (Tabelas V.27 e V.28), observa-se que o filme do conjugado AA $Ti_{1-x}Al_xN$ /AISI H13 não temperado (filme bifásico) apresentou teor superior de alumínio em comparação com o filme do conjugado BA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme monofásico CFC), o que é evidenciado pela maior quantidade de alumínio em relação ao titânio, considerando 50% de filme (mantendo o nitrogênio fixo). As análises realizadas nas duas regiões dos filmes, confirmam o maior teor de alumínio (em relação a 50% atômico do filme) presente no filme AA $Ti_{1-x}Al_xN$.

Tabela V.27 – Composição química da região 1 dos conjugados BA $Ti_{1-x}Al_xN$ e AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado (considerando-se 50% atômico do filme).

Elemento	% Atômica BA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme CFC)	% Atômica AA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme bifásico)
Al	15,11	48,19
Ti	84,89	51,81

Tabela V.28 – Composição química da região 2 dos conjugados BA $Ti_{1-x}Al_xN$ e AA $Ti_{1-x}Al_xN$ / H13 não temperado (considerando-se 50% atômico do filme).

Elemento	% Atômica BA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme CFC)	% Atômica AA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme bifásico)
Al	15,31	47,80
Ti	84,69	52,20

Os resultados da análise de EDS obtidos para os conjugados do aço H13 temperado e revenido (Tabelas V.29 e V.30) demonstram que esta análise não possibilitou a diferenciação dos teores de alumínio entre os filmes BA e AA, provavelmente devido ao fato do filme BA ser bifásico e do filme AA ser hexagonal, o que pode resultar em quantidades bem próximas de alumínio (Figuras 3.1 e 3.2).

Outro fator que possivelmente influenciou a análise com a microsonda pode ser o fato do filme AA (espessura de 3 μm) ser bem mais espesso que o filme BA (espessura de 1 μm), o que é observado na análise de Espectroscopia de Emissão Óptica por Centelhamento (Figuras 5.21 e 5.22).

Esta análise possibilitou diferenciar estes filmes em relação ao teor de alumínio.

Tabela V.29 – Composição química da região 1 dos conjugados BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ e AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ / H13 temperado e revenido (considerando-se 50% atômico do filme).

Elemento	% Atômica BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme bifásico)	% Atômica AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme hexagonal)
Al	38,80	43,06
Ti	61,20	56,94

Tabela V.30 – Composição química da região 2 dos conjugados BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ e AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ / H13 temperado e revenido (considerando-se 50% atômico do filme).

Elemento	% Atômica BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme bifásico)	% Atômica AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme hexagonal)
Al	38,78	43,44
Ti	61,22	56,56

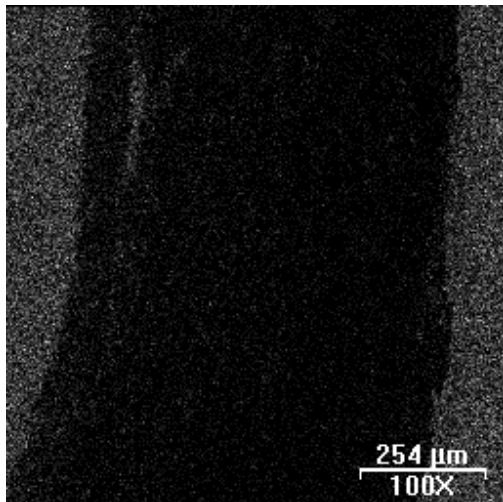
5.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) após o desgaste

5.7.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) após o desgaste contra Si_3N_4

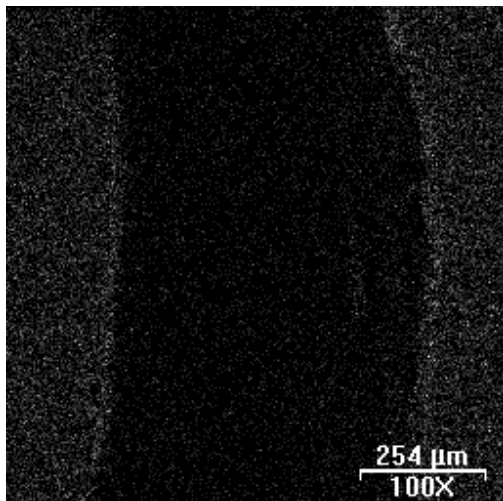
Através das imagens de composição por raios-x dos traços de desgaste dos sistemas, observa-se (Figuras 5.84, 5.85 e 5.86) entre os sistemas do aço não temperado menor concentração de Al (elemento do filme), além do maior teor de Fe exposto na região do traço (elemento do substrato) no conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme monofásico CFC), sendo que o traço de desgaste deste conjugado apresenta maior largura. Este resultado sugere o maior desgaste do conjugado BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$, que apresenta menor dureza.

Em relação aos sistemas do aço temperado e revenido (Figuras 5.87, 5.88 e 5.89), ressalta-se que o conjugado AA (filme monofásico hexagonal) apresentou menor quantidade de alumínio e maior quantidade de ferro no interior do traço de desgaste, sendo o seu traço mais largo que o do outro conjugado. As imagens também indicam adesão de silício (elemento do abrasivo) nos traços de desgaste de ambos os conjugados estudados.

Assim, estes resultados corroboram a análise de perfilometria tridimensional, que indicou maior desgaste do conjugado BA (filme monofásico CFC) comparando os conjugados do aço não temperado e maior desgaste do conjugado AA (filme hexagonal) dentre os conjugados do aço temperado.

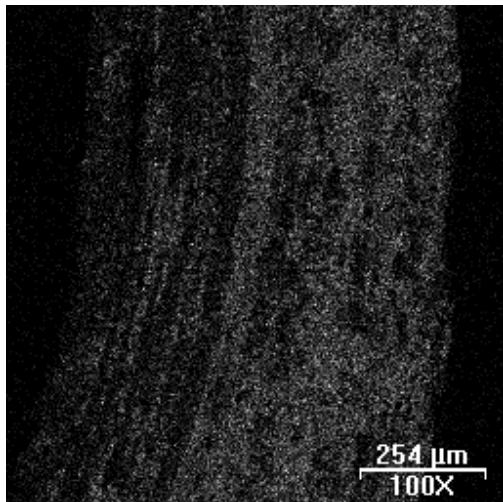


a)

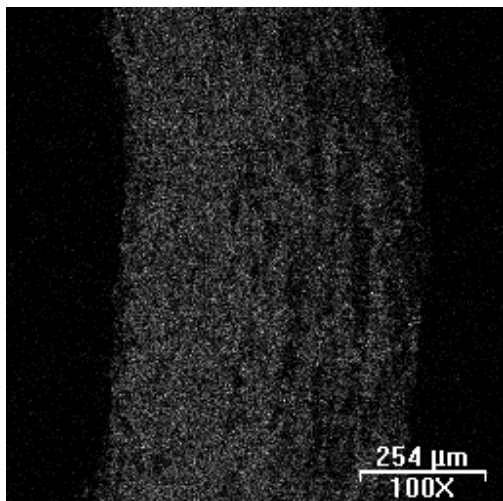


b)

Figura 5.84- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 não temperado após o desgaste contra Si_3N_4 (100X)- Elemento Al. a) BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme CFC) e b) AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme bifásico).

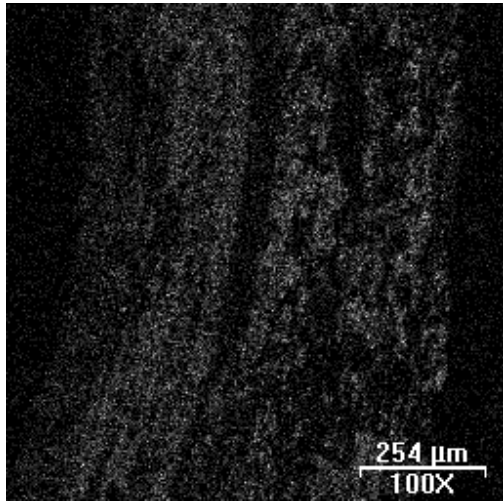


a)

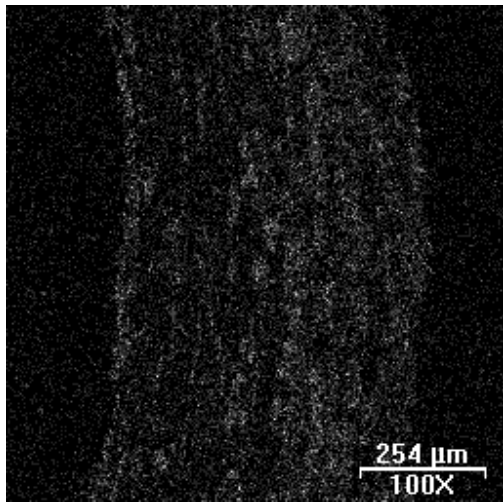


b)

Figura 5.85- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 não temperado após o desgaste contra Si_3N_4 (100X)- Elemento Fe. a) BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme CFC) e b) AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme bifásico).

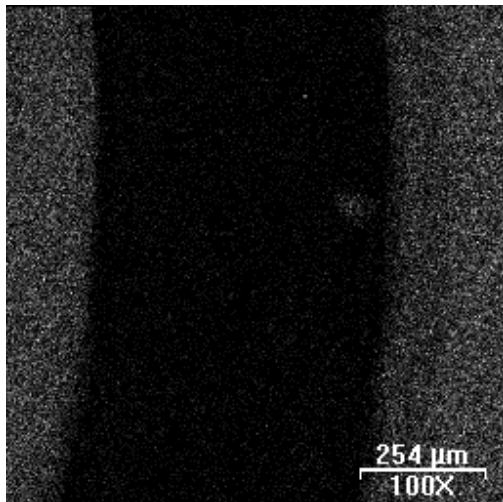


a)

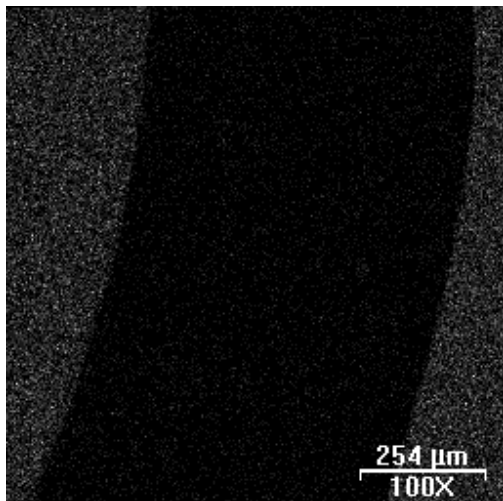


b)

Figura 5.86- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 não temperado após o desgaste contra Si_3N_4 (100X)- Elemento Si. a) BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme CFC) e b) AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme bifásico).

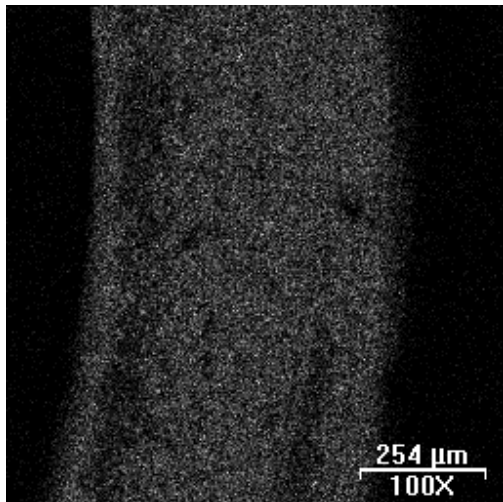


a)

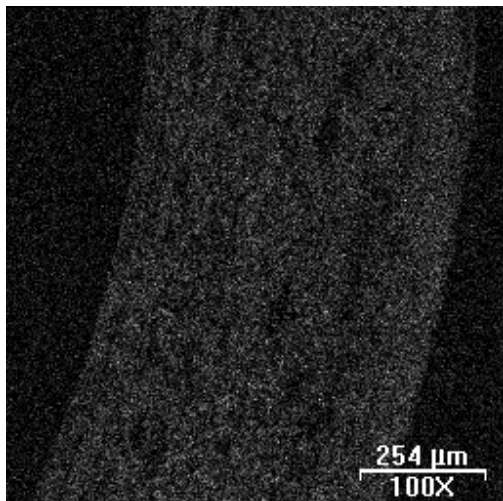


b)

Figura 5.87- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 temperado após o desgaste contra Si_3N_4 (100X)- Elemento Al. a) BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme bifásico) e b) AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme hexagonal) .

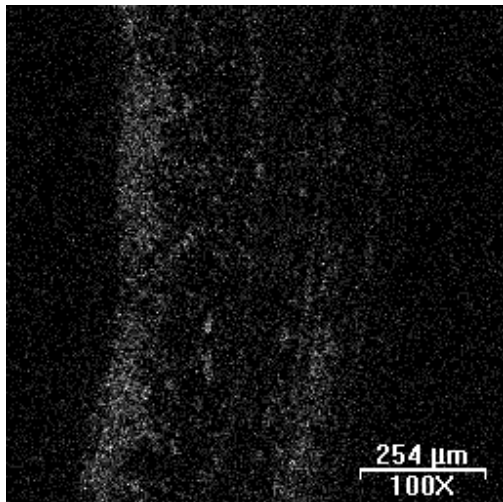


a)

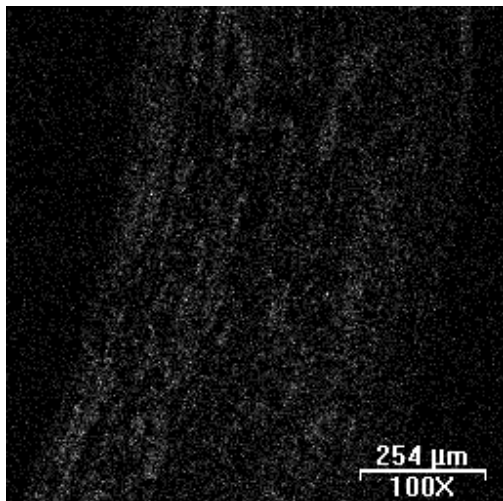


b)

Figura 5.88- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 temperado após o desgaste contra Si_3N_4 (100X)- Elemento Fe. a) BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme bifásico) e b) AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme hexagonal).



a)



b)

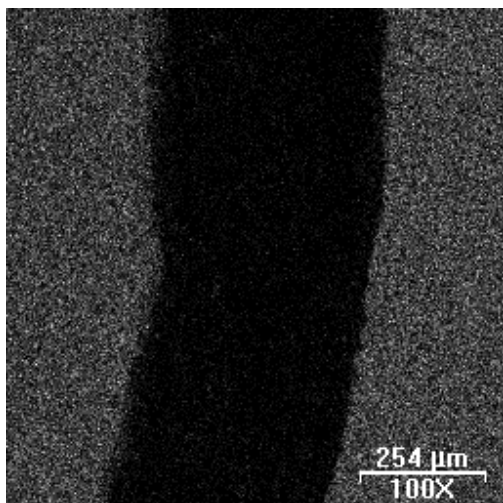
Figura 5.89- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 temperado após o desgaste contra Si_3N_4 (100X)- Elemento Si. a) BA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme bifásico) e b) AA $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ (filme hexagonal).

5.7.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) após o desgaste contra WC-Co

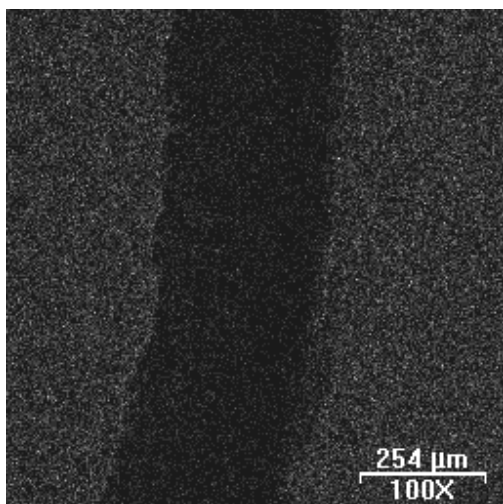
As imagens de composição obtidas no interior e ao redor dos traços de desgaste contra WC-Co (Figuras 5.90, 5.91 e 5.92) corroboram o menor desgaste do conjugado AA (com filme bifásico, mais duro e com maior razão H/E) do aço não temperado em comparação ao conjugado BA (com filme monofásico CFC). O traço do primeiro conjugado apresentou-se menos largo, com menor área de substrato exposto (elemento Fe) e menor quantidade de alumínio (elemento do filme) retirado.

Ressalta-se que, ambos os conjugados apresentam quantidade bem inferior de W (elemento da esfera) aderido no traço de desgaste, em comparação com a quantidade de Si (elemento da outra esfera) aderido, após os testes de desgaste contra nitreto de silício. Estes resultados evidenciam que o uso da esfera de WC-Co como torna-se mais adequado para avaliar o desgaste dos conjugados estudados do que o uso do Si_3N_4 , o que pode ser explicado pela possível dureza superior da esfera de WC-Co que foi utilizada (ver item 4.6), em comparação à outra esfera, o que pode ter resultado em melhor desempenho desta esfera de WC-Co como contracorpo (JIA, 1998; COSTA, 2007).

As imagens de composição obtidas após o desgaste contra as duas esferas, ao confirmar os resultados obtidos pela perfilometria tridimensional, contribuem para corroborar a validação da metodologia usada por perfilometria para estimar o volume e a conseqüente taxa de desgaste dos conjugados.

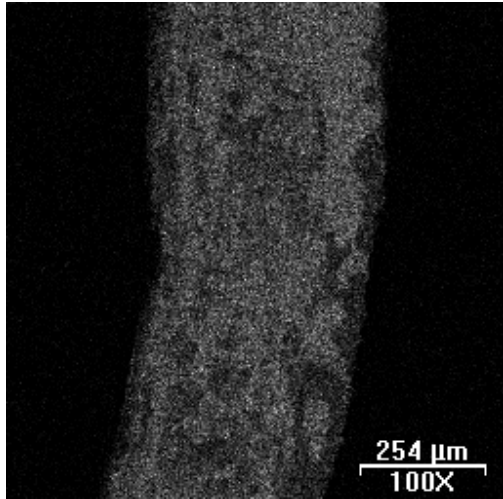


a)

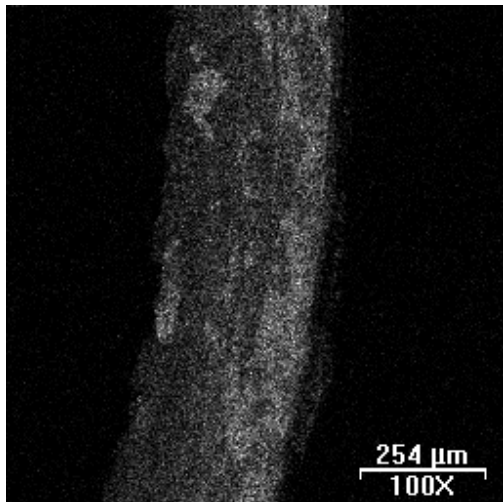


b)

Figura 5.90- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 não temperado após o desgaste contra WC-Co (100X)- Elemento Al. a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme CFC) e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme bifásico).

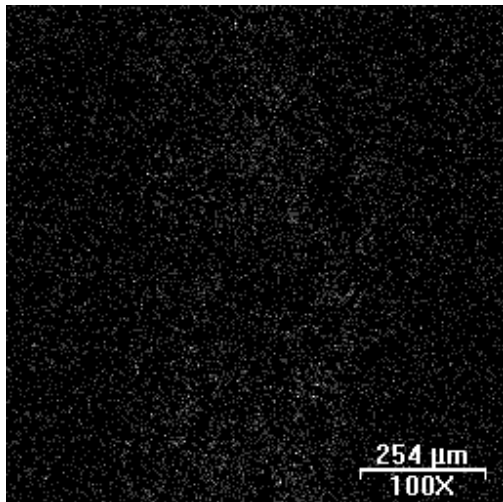


a)

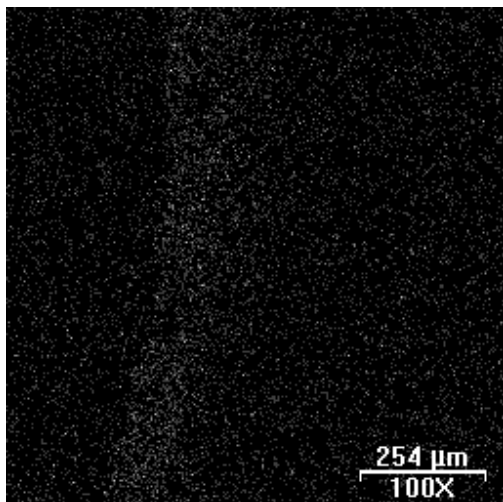


b)

Figura 5.91- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 não temperado após o desgaste contra WC-Co (100X)- Elemento Fe. a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme CFC) e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme bifásico).



a)



b)

Figura 5.92- Imagens de raios-x nos traços de desgaste dos conjugados BA e AA/ H13 não temperado após o desgaste contra WC-Co (100X)- Elemento W. a) BA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme CFC) e b) AA $Ti_{1-x}Al_xN$ (filme bifásico).

CAPÍTULO 6 : CONCLUSÕES

1) A determinação do volume de desgaste de sistemas recobertos através da metodologia elaborada com o uso da perfilometria mostrou-se válida, mais precisa e completa do que a metodologia descrita pela Norma ASTM G 99-05, devido ao fato da metodologia proposta estimar o volume correspondente à região do traço de desgaste delimitada, excluindo a região sem desgaste, além de considerar possíveis variações da largura do traço (heterogeneidades) e o desgaste de um ou dos dois membros do par.

2) Filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ podem ser monofásicos (estrutura CFC), bifásicos (estruturas CFC e hexagonal) e monofásicos (estrutura hexagonal), o que afeta as suas propriedades e, conseqüentemente, o seu desempenho em desgaste. Este fato deve ser considerado na análise do uso e do desempenho destes filmes em engenharia.

3) O uso de filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ com ambas as estruturas (estrutura CFC, bifásicos ou estrutura hexagonal) tornou-se viável para melhorar o desempenho do aço H13 com ou sem têmpera e revenimento, em desgaste por deslizamento, nas condições testadas.

4) Os tratamentos de têmpera e o revenimento do aço H13 aumentaram a sua resistência ao desgaste por deslizamento, devido ao aumento da dureza. A elevação de dureza resultante destes tratamentos térmicos aumentou a profundidade de endurecimento dos conjugados compostos pelo aço temperado, o que influenciou o desempenho em desgaste, nas condições testadas. Assim, a dureza do substrato foi um fator fundamental no desgaste dos conjugados testados.

5) O teor de alumínio dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$ influenciou a sua estrutura cristalina e, conseqüentemente, a dureza do conjugado e o seu desempenho em desgaste. Para o mesmo substrato estudado, os conjugados que apresentaram maior dureza, associada a um alto

índice H/E, o que implica maior deformação elástica até a falha, obtiveram o melhor desempenho em desgaste, nas condições testadas.

6) Os parâmetros dureza do conjugado e o índice H/E influenciaram mais o desempenho em desgaste dos conjugados estudados, do que a adesão e a espessura dos filmes $Ti_{1-x}Al_xN$, nas condições testadas.

7) O coeficiente de desgaste dimensional (k), por não depender da dureza do material conjugado, mostrou-se um parâmetro mais abrangente e preciso do que o coeficiente adimensional (K) para a avaliação do desgaste dos materiais recobertos (como o aço H13 revestido com $Ti_{1-x}Al_xN$), que possuem variação de dureza ao longo da profundidade.

CAPÍTULO 7 : SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1) A incorporação de átomos de alumínio a filmes de Cr-N, processados por PAPVD, produzindo o filme $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$, resulta em recobrimentos que podem apresentar alta resistência à oxidação e aumentos significativos da dureza a quente. Atualmente, este tipo de recobrimento, em decorrência destas propriedades, tem sido indicado fortemente para aplicações em usinagem que envolve alta velocidade (e assim altas temperaturas) e para uso em matrizes de forjamento a quente. Sugere-se que a metodologia proposta por este trabalho para a determinação do volume de desgaste, seja aplicada no estudo do desgaste de conjugados revestidos pelo filme $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$.
- 2) Como o teor de alumínio presente nos filmes $\text{Cr}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ também influencia a sua estrutura cristalina, além de propriedades como a dureza e o módulo de elasticidade, sugere-se que seja avaliada a influência do teor de alumínio deste filme no desgaste por deslizamento.
- 3) Sugere-se a realização de testes de desgaste dos conjugados do filme $\text{Ti}_{1-x}\text{Al}_x\text{N}$ estudados em condições mais severas (maior carga aplicada, por exemplo), com a posterior comparação dos resultados obtidos com os resultados deste trabalho. Esta análise possibilitará verificar a influência da severidade do desgaste no desempenho do conjugado.

CAPÍTULO 8: REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM. Standard G99 - Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus. American Society for Testing Materials, 1995.

ÁVILA ,R.F., GODOY ,C., ABRÃO , A.M., LIMA, M.M., *Topographic analysis of the crater wear on TiN, Ti(C,N) and (Ti,Al)N coated carbide tools*, *Wear*, 2007.

BAHRAMI, A., ANIJAN, S.H. M. , GOLOZAR, M.A., SHAMANIAN, M., VARAHRAM, N., *Effects of conventional heat treatment on wear resistance of AISI H13 tool steel*, *Wear* v. 258, p. 846–851, 2005.

BEAKE, B.D., RANGANATHAN, N., *An investigation of the nanoindentation and nano/micro-tribological behaviour of monolayer, bilayer and trilayer coatings on cemented carbide*, *Materials Science and Engineering A* v. 423, p. 46–51, 2006.

BOBZIN, K., LUGSCHEIDER, E., NICKEL, R., BAGCIVAN, N., KRAMER, A., *Wear behavior of Cr1–xAlxN PVD-coatings in dry running conditions*, *Wear* v. 263, p. 1274–1280, 2007.

CALLISTER, W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. LTC, 2002. 589p.

CHIU, L.H., YANG, C.F., HSIEH, W.C., CHENG, A.S., *Effect of contact pressure on wear resistance of AISI H13 tool steels with chromium nitride and hard chromium coatings*, *Surface and Coatings Technology*, v. 154, p. 282–288, 2002.

CHRISTOFIDES, C. , MCHUGH, P.E. , FORN ,A., PICAS, J.A., *Wear of a thin surface coating: modelling and experimental investigations*, *Computational Materials Science* v. 25, p. 61–72, 2002.

COLDWELL, H., WOODS, R., PAUL, M., KOSHY, P., DEWES, R., ASPINWALL, D., *Rapid machining of hardened AISI H13 and D2 moulds, dies and press tools*, Journal of Materials Processing Technology v.135, p. 301–311, 2003.

COSTA, R.F, *Efeitos dos parâmetros de usinagem na formação da camada branca em torneamento duro nos aços-rolamento (DIN 100 Cr6)*, São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2007. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais).

CULLITY, B.D. *Elements os X-ray Diffraction*, 2.ed. Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1978.554p.

DIAO, D.F.; SAWAKI, Y.; *Fracture mechanisms of ceramic coating during wear*, Thin Solid Feilms, v. 270, p.362-366, 1995.

DING, X., ZENG, X.T., *Structural, mechanical and tribological properties of CrAlN coatings deposited by reactive unbalanced magnetron sputtering*, Surface and Coatings Technology v. 200, p. 1372 – 1376, 2005.

DUCROS, C., BENEVENT, V., SANCHETTE, F., *Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools*, Surface and Coatings Technology v. 163 –164, p. 681–688, 2003.

GAHLIN ,R., JACOBSON, S., *A novel method to map and quantify wear on a micro-scale*, Wear v. 222, p. 93–102, 1998.

GODOY, C., MANCOSU, R.D., LIMA, M.M., BRANDÃO, D., HOUSDEN, J., AVELAR-BATISTA, J.C., *Influence of plasma nitriding and PAPVD Cr_{1-x}N_x coating on the cavitation erosion resistance of na AISI 1045 steel*, Surface and Coatings Technology v.200, p. 5370-5378, 2006.

HAN, J., WANG, B., *Crack spacing effect for a piezoelectric cylinder under electro-mechanical loading or transient heating*, International Journal of Solids and Structures, v. 43, p. 2126–2145, 2006.

HARLIN, P., CARLSSON, P., BEXELL, U., OLSSON, M., *Influence of surface roughness of PVD coatings on tribological performance in sliding contacts*, Surface and Coatings Technology, 2006.

HASEGAWA, H.; KAWATE, M.; TETSUYA, S. *Effects of Al Contents on Microstructures of $Cr_{1-x}Al_xN$ and $Zr_{1-x}Al_xN$ Films Synthesized by Cathodic Arc Method*, Surface and Coatings Technology, 2004.

HOMMELMAP 4.0. Help do software *Mountains*.

HORLING, A., HULTMAN, L., ODE N, M., SJOLE N, J., KARLSSON, L., *Mechanical properties and machining performance of $Ti_{1-x}Al_xN$ -coated cutting tools*, Surface and Coatings Technology, v. 191, p. 384–392, 2005.

HUTCHINGS, I. M. *Tribology: Friction and wear of engineering materials*. London: Edward Arnold, 1992. 273p.

IKEDA, T.; SATOH, H., *Phase formation and characterization of hard coatings in the Ti-Al-N system prepared by the cathodic arc ion plating method*, Thin Solid Films, v. 195, p. 99–110, 1991.

JIA, K., FISCHER, T.E., GALLOIS, B., *Microstructure, Hardness and Toughness of*

Nanostructured and Conventional WC-Co Composites, Nanostructured Materials v. 10. No. 5, p. 875-891, 1998.

JIANG , J. , STACK, M.M., *Modelling sliding wear: From dry to wet environments*, Wear, v. 261, p. 954–965, 2006.

JINDAL , P.C.; SANTHANAM, A.T.; SCHLEINKOFER, U.; SHUSTER, A.F. *Performance of PVD TiN, TiCN and TiAlN coated cemented carbide tools in turning*, International Journal of Refractory Metals& Hard Materials, v. 17, p. 163-170, 1999.

KAO, W.H. *Microstructure, adhesion and tribological properties of W–C:H % coatings deposited on M2 and WC substrates*, Materials Science and Engineering A 432, p. 253–260. 2006.

KIM , Y., TATAMI , J., KOMEYA , K., KIM, D. K., *Effect of the microstructure of Si₃N₄ on the adhesion strength of TiN film on Si₃N₄* , Thin Solid Films v. 510, p. 222-228, 2006.

KIMURA, A. , KAWATE, M., HASEGAWA, H., SUZUKI, T., *Anisotropic lattice expansion and shrinkage of hexagonal TiAlN and CrAlN films*, Surface and Coatings Technology v. 169 –170, p. 367 –370, 2003.

KRAUSS, G. Surface modification. In: KRAUSS, G. *Steels: heat treatment and processing principles*. 2.ed. Ohio: ASM International, 1993. Chapter 11, 319-350.

KUTSCHEJ, K.; MAYRHOFER, P. H.; KATHREIN, , M.; POLCIK, P.; TESSADRI, R.; MITTERER, C.; *Structure, mechanical and tribological properties of sputtered Ti_{1-x}Al_xN coatings with 0.5 ≤ x ≤ 0.75*, Surface and Coatings Technology xx (2005) xxx– xxx.

LEE, J.W., DUH, J.G., *Nanomechanical properties evaluation of chromium nitride films by nanoindentation and nanowear techniques*, Surface and Coatings Technology v. 188–189, p. 655– 661, 2004.

LEYLAND, A., MATTHEWS, A., *On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behaviour*, Wear v. 246, p. 1– 11, 2000.

MUMMERY, L. *Surface Texture Analysis; The Hand Book*. 1ed. West Germany: Hommelwerke GmbH, 105p., 1992.

OHNUMA, H., NIHIRA, N., MITSUO, A ., TOYODA, K., KUBOTA, K., AIZAWA, T., *Effect of aluminum concentration on friction and wear properties of titanium aluminum nitride films*, Surface and Coatings Technology, v.177-178, p.623-626, 2004.

OLIVER, W.C., PHARR, G.M., *Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation : Advances in understanding and refinements to methodology*, Journal of Materials Research, v.19, p.3-20, 2004.

PALDEY, S.; DEEVI, S. C. *Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti, Al)N: a review*, Materials Science and Engineering A, v.342, p. 58-79, 2003.

PHARR, G.M., *Measurement of mechanical properties by ultra-low load indentation*, Materials Science and Engineering A, v.253, p. 151, 1998.

PIANA, L.A.; PÉREZ, E.A., SOUZA, R.M., KUNRATH, A.O., STROHAECKER, T.R., *Numerical and experimental analyses on the indentation of coated systems with substrates with different mechanical properties*, Thin Solid Films v. 491, p. 197 – 203, 2005.

REITER, A. E., DERFLINGER, V.H., HANSELMANN, B., BACHMANN, T., SARTORY, B., *Investigation of properties of $Al_{1-x}Cr_xN$ coatings prepared by cathodic arc evaporation*, Surface and Coatings Technology v. 200, p. 2114-2122, (2005).

RICKERBY, D.S., MATTHEWS, A. *Advanced surface coatings*; A handbook of surface engineering; New York: Blackie & Son Ltd, 1991. 368p.

SINHA, S. K., CHONG, W.L.M., LIM, SEH-CHUN, *Scratching of polymers—Modeling abrasive wear*, Wear xxx (2006) xxx–xxx.

SPAIN, E., BATISTA, J.C. A., LETCH, M., HOUSDEN, J., LERGA, B., *Characterisation and applications of Cr-Al-N coatings*, Surface and Coatings Technology, 2005.

TAKADOUM, J., HOUMID-BENNANI, H., MAIREY, D., ZSIGA, Z., *Adhesion Coatings and Wear Resistance of Thin Hard*, Journal of the European Ceramic Society, v. 17, p. 1929-1932, 1997.

TONSHOFF, K., MOHLFELD, A., LEYENDECKER, T., FU, H.G., ERKENS, G., WENKE, R., CSELLE, T., SCHWENCK, M., *Wear mechanisms of $(Ti_{1-x}Al_x)N$ coatings in dry drilling*, Surface and Coatings Technology, v.94-95, p.603-609, 1997.

WILLIAMS, J.A., *Wear and wear particles- some Fundamentals*, Tribology International, v. 38, p. 863-870, 2005.

YAN, H.; HUA, J.; SHIVPURI, R., *Numerical simulation of finish hard turning for AISI H13 die steel*, Science and Technology of Advanced Materials, v. 6, p. 540–547, 2005.

ZHANG, S.; SUN, D.; FU, Y.; DU, H.; *Toughness measurement of thin films: a critical review*, Surface and Coatings Technology, v.198, p.74-84, 2005.

ZHOU. M.; MAKINO. Y.; NOSE. M.; NOGI. K. *Phase transition and properties of Ti-Al-N thin films prepared by rf-assisted magnetron sputtering*, Thin Solid Films, v. 339, p. 203 – 208, 1999.