

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANTONIO CARLIM NETO
FELIPE MARTINHUK

Análise da influência de tratamentos térmicos prévios na nitretação
a plasma do aço ferramenta AISI D2

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2015

ANTONIO CARLIM NETO

FELIPE MARTINHUK

Análise da influência de tratamentos térmicos prévios na nitretação
a plasma do aço ferramenta AISI D2

Proposta de Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Rodrigo Lupinacci Villanova

CURITIBA

2015

TERMO DE ENCAMINHAMENTO

Venho, por meio deste termo, encaminhar para apresentação a Proposta do Projeto de Pesquisa “ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE TRATAMENTOS TÉRMICOS PRÉVIOS NA NITRETAÇÃO A PLASMA DO AÇO FERRAMENTA AISI D2”, realizada pelo aluno(s), ANTONIO CARLIM NETO e FELIPE MARTINHUK, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Rodrigo Lupinacci Villanova
UTFPR - Damec

Curitiba, 18 de novembro de 2015.

TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a Proposta de Projeto de Pesquisa “ANÁLISE DE TRATAMENTOS TÉRMICOS PRÉVIOS NA NITRETAÇÃO À PLASMA DO AÇO FERRAMENTA AISI D2”, realizada pelo aluno(s) ANTONIO CARLIM NETO e FELIPE MARTINHUK, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Rodrigo Lupinacci Villanova
DAMEC, UTFPR
Orientador

Prof. Dr. Euclides Alexandre Bernadelli
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Prof. Dr(a) Ane Cheila Rovani
DAMEC, UTFPR
Avaliador

Curitiba, 18 de novembro de 2015.

RESUMO

Aços AISI D2 são aços de elevado teor de carbono e elementos de liga, esses aços possuem também elevada resistência ao desgaste e são amplamente utilizados na fabricação de ferramentas para conformação a frio, tal como, matrizes para estampagem, cunhagem, rolos laminadores de roscas, repuxos, centros para tornos, punções e calibres. Estes aços passam por operações de tratamento térmico e podem ou não ter tratamentos superficiais posteriores. O processo conhecido como nitretação à plasma consiste em um tratamento de endurecimento superficial sob a ação de um ambiente nitrogenoso a uma temperatura determinada. A mesma resulta em melhorias nas propriedades mecânicas e tribológicas dos materiais. A nitretação a plasma fornece ao material um aumento em relação à resistência ao desgaste e eleva a microdureza superficial dos mesmos. Tendo em vista que o aço AISI D2 é um dos aços mais utilizados para trabalho a frio, o aumento nessas propriedades torna-se de suma importância. O estudo proposto como trabalho de conclusão de curso tem como objetivo compreender a interação entre os tratamentos térmicos prévios e tratamento superficial à plasma para melhorias no desempenho destas ferramentas de forma geral, conferindo a estes aços características especiais que não seriam obtidas somente com o metal de base. Para tanto, serão analisadas algumas características do material, tal como, microdureza, microestrutura e resistência ao desgaste antes e após a nitretação, com o material submetido a diferentes tratamentos térmicos. Após a análise dos resultados constatamos que, a microdureza obtida pelas amostras estão condizentes com a literatura, os tratamentos térmicos prévios não influenciaram na espessura da camada nitretada e nem na dureza superficial. Para as condições de nitretação não houve formação da camada branca. A profundidade dos riscos aumenta com o aumento da temperatura de revenimento. O coeficiente de atrito tende a aumentar com a diminuição da dureza do núcleo e muito embora as camadas nitretadas sejam semelhantes para as diversas condições de TT prévios, o ensaio de riscamento mostrou que houve influência da dureza do núcleo nos resultados.

Palavras-chave: Aço Ferramenta D2. Tratamento térmico. Nitretação à plasma. Ensaio de Riscamento. Microdureza.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Composição química dos principais aços ferramentas (% em massa).	13
Figura 2 – Classificação dos aços ferramentas e suas propriedades Fonte: (GOBBI, 2007).....	13
Figura 3 – Composição química dos aços para trabalho a frio.....	14
Figura 4 – Dissolução de carbonetos com a elevação da temperatura de austenitização.	17
Figura 5 - Curvas de revenimento do aço AISI D2 passado por diferentes temperaturas de austenitização.	19
Figura 6 – Influência de alguns processos nitretação sobre a espessura da camada nitretada.	22
Figura 7 – Esquema do ensaio de riscamento.	23
Figura 8 - Esquema da seção transversal do sulco formado.....	23
Figura 9 - Fluxograma dos procedimentos antes e após a nitretação.....	25
Figura 10 - Esquema do processo nos tratamentos térmicos.	27
Figura 11 - Tribômetro CERT® UMT.....	29
Figura 12 - Micrografia das amostras temperadas à 970°C e revenidas à 500°C (A), 550°C (B) e 600°C (c). Fonte: A autoria própria.....	30
Figura 13 - Micrografias das amostras temperadas à 1020°C e revenidas à 500°C (A), 550°C (B) e 600°C (C).....	31
Figura 14 – Micrografias das amostras austenitizadas à 1070°C e revenidas à 500°C (A), 550°C (B) e 600°C (C).....	32
Figura 15- Micrografia da camada nitretada da amostra T970 R500.	33
Figura 16 – Perfil de dureza para a amostra T1020 R500.	34
Figura 17 – Gráfico da dureza do núcleo pela temperatura de revenimento.....	35
Figura 18 - Gráfico dos perfis de dureza.	36

Figura 19 – Espessura da camada nitretada quanto à temperatura de revenimento.	37
Figura 20 – Amostra T970 R600 submetida a análise por interferometria	38
Figura 21 – Profundidade do risco na amostra T970 R600 obtida por interferometria	39
Figura 22 – Profundidade do risco quanto à dureza do núcleo.	40
Figura 23 – Profundidade dos riscos quanto à temperatura de revenimento.	41
Figura 24 - Largura do risco mostrado através da interferometria (Horizontal distance).....	41
Figura 25 – Largura dos riscos quanto à dureza do núcleo.	43
Figura 26 – Largura dos riscos quanto à temperatura de revenimento.	44
Figura 27 – Dureza ao risco quanto à temperatura de revenimento.	46
Figura 28 – Micrografia mostrando a trica no ensaio de riscamento para a amostra T970 R550	47
Figura 29 - Gráfico do coeficiente de atrito médio obtido no ensaio de riscamento para a amostra T970 R550	48
Figura 30 – COF para todas as amostras.	48
Figura 31 – Micrografias das amostras (A)T970R500, (B)T970R550, (C)T970R600, (D)1020R550, (E)T1020R600, (F)T1070R500	53
Figura 32 – Micrografia das amostras (G)T1070R500, (H)1070R550, (I)T1070R600	54
Figura 33 – Interferometria obtida para os três riscos na amostra T970 R500	55
Figura 34 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T970 R550	56
Figura 35 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T970 R600	57
Figura 36 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T1020 R500	58
Figura 37 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T1020 R550	59
Figura 38 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T1020 R600	60

Figura 39 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T1070 R500	61
Figura 40 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T1070 R550	61
Figura 41 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T1070 R600.	63
Figura 42 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T1070 R600	63
Figura 43 - Dureza em relação a profundidade de camada nitretada para as amostras (G)T1070R500, (H)T1070R550, (I)T1070R600	65
Figura 44 - - Gráfico dos COF para as amostras (A)T970R500, (B)T970R550, (C)T970R600, (D)T1020R500, (E)T1020R550, (F)T1020R600	66
Figura 45 - - Gráfico dos COF para as amostras (G)QO70R500, (H)1070R550, (I)T1070R600,	67
Figura 46 - Micrografias dos riscos (A)T970R500, (B)T970R550, (C)T970R600, (D)1020R550, (E)T1020R600, (F)T1070R500	68
Figura 47 - Micrografias dos riscos (G)T1070R500, (H)1070R550, (I)T1070R600 ...	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Composição química do aço AISI D2.....	15
Tabela 2 - Variação da proporção de carbono e temperatura de transformação martensítica (Ms), com a temperatura de austenitização.....	18
Tabela 3 - Parâmetros e sequência dos experimentos.....	24
Tabela 4 - Composição química do aço AISI D2 em estado de fornecimento.....	25
Tabela 5 – Valores de microdureza das amostras após a nitretação.....	35
Tabela 6 – Profundidade média adquirida pelo edentador nos ensaios de riscamento	39
Tabela 7- Largura média adquirida pelo edentador no ensaio de riscamento.....	42
Tabela 8 – dureza superficial em relação a profundidade e largura média.....	44
Tabela 9 - Dureza ao risco obtidas no ensaios de riscamento para todas as amostras	45
Tabela 10 – Coeficiente de atrito dos ensaios de riscamento	47

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração.

AISI – American Iron and Steel Institute

CIMM – Centro de Informação Metal Mecânica

HRC – Hardness Rockwell C

ASTM – American Society for Testing and Materials

T970R500 – amostras temperadas a 970° e revenidas à 500°C

T970R550 – amostras temperadas a 970° e revenidas à 550°C

T970R600 – amostras temperadas a 970° e revenidas à 600°C

T1020R500 – amostras temperadas a 1020° e revenidas à 500°C

T1020R550 – amostras temperadas a 1020° e revenidas à 550°C

T1020R600 – amostras temperadas a 1020° e revenidas à 600°C

T1070R500 – amostras temperadas a 1070° e revenidas à 500°C

T1070R550 – amostras temperadas a 1070° e revenidas à 550°C

T1070R600 – amostras temperadas a 1070° e revenidas à 600°C

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	Fundamentação Teórica	12
2.1	Considerações Iniciais – Aços Ferramenta	12
2.2	Aços-Ferramenta para trabalho a frio	14
2.3	Aço Ferramenta AISI D2	15
2.4	Tratamentos térmicos em aços D2	15
2.4.1	Comportamento do aço D2 em relação à têmpera e revenimento	16
2.5	Tratamentos termo-químicos	20
2.5.1	Definições	20
2.5.2	Nitretação	20
2.5.3	Nitretação assistida por plasma	21
2.6	Ensaio de riscamento (<i>scratch test</i>)	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1	Material e Preparação das Amostras	25
3.2	Têmpera	26
3.3	Revenimento	27
3.4	Ensaio de dureza e microdureza	27
3.5	Ensaio de riscamento	28
3.6	Nitretação iônica	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1	Microestrutura e curva de revenido	30
4.2	Microestrutura da camada nitretada	33
4.3	Perfil de microdureza da camada nitretada	34
4.4	Influência na camada nitretada	36
4.5	Ensaio de riscamento	37
4.5.1	Profundidade dos Riscos	38
4.5.2	Largura dos Riscos	41
4.5.3	Dureza ao risco	45
4.5.4	Coefficiente de Atrito	46
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
	REFERÊNCIAS	50
	APÊNDICE A – MICROGRAFIAS DAS CAMADAS NITRETADAS	53
	APÊNDICE B – DADOS COLETADOS DO INTERFERÔMETRO	55
	APÊNDICE C – Perfis de dureza	64
	APÊNDICE D – GRÁFICOS D	66
	APÊNDICE D - COEFICIENTES DE ATRITO	67
	APÊNDICE E – MICROGRAFIA DOS RISCOS	68

1 INTRODUÇÃO

Aços ferramenta são ligas de ferro-carbono compostos por outros elementos de liga que os direcionam a uma vasta gama de produtos. Com o propósito de que estes materiais melhor atendam as aplicações a que são destinados, diversas técnicas de tratamentos térmicos e de superfície vem sendo desenvolvidas e utilizadas.

Usado especialmente em ferramentas que requerem alta resistência à abrasão, a aço AISI D2 é um aço-ferramenta para trabalho a frio e entre suas aplicações típicas estão a injeção em moldes, matrizes para estampar, repuxamento, centros para tornos, punções, calibres (VILARES, 2013). Esses aços são fornecidos no estado recozido e então são beneficiados com tratamentos térmicos, resultando em aumento de sua dureza de acordo com a aplicação a que são destinados. Proteções superficiais, como a nitretação, podem melhorar a resistência a corrosão e ao desgaste (SCHEID et all, 2009).

Tomita e Okawa (1993) afirmam que diferentes tratamentos térmicos permitem obter microestruturas com diferentes frações de fases, que combinando microconstituintes dúcteis e duros, permitem ajustar uma gama de propriedades mecânicas interessantes para aplicações industriais. Da mesma forma, a nitretação a plasma permite o ajuste das propriedades mecânicas através do controle das camadas nitretadas. Esta última depende da composição da mistura gasosa, temperatura e tempo de nitretação (BELL 1996, p.40).

Apesar dos estudos realizados, não se encontrou muitas informações sobre o efeito em que a microestrutura do metal de base pode ter nos processos de adsorção e difusão do nitrogênio, que acontece na nitretação a plasma, para a formação da camada de nitretos.

O objetivo deste trabalho é verificar a influência de tratamentos térmicos prévios na nitretação a plasma, e por sua vez no desempenho do aço D2, visando eventuais melhorias em aplicações de trabalho a frio. Para isso parâmetros nos tratamentos térmicos serão variados atribuindo ao aço D2 diferentes microestruturas, e em seguida uma nitretação a plasma será feita sob uma única condição. Uma análise comparativa será possível após a avaliação das propriedades microdureza, perfil microestrutural e resistência ao desgaste após a nitretação.

As características das camadas nitretadas como profundidade, presença ou não de camada branca também serão observadas utilizando microscopia ótica e o comportamento ao desgaste será caracterizado com ensaios de riscamento (scratch test).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações Iniciais – Aços Ferramenta

As ferramentas utilizadas nas indústrias em geral, principalmente a metal-mecânica são acessórios indispensáveis para os processos de fabricação, tal como, a usinagem, conformação, fundição, etc. Essas ferramentas devem apresentar características que as façam resistir às severas condições de operação dentro das indústrias, ao passo que, devem possuir um custo relativamente baixo.

A partir do século XX, os aços tiveram importância fundamental para a confecção de ferramentas para a indústria mecânica, a partir de então surgiram estudos e pesquisas visando obter o melhor aproveitamento e a melhorar as propriedades mecânicas desses aços.

As principais características para os aços ferramentas são:

- *Dureza*: propriedade que depende essencialmente do teor de carbono na composição química do aço. É fundamental que a dureza da ferramenta seja maior do que a da peça a ser usinada, conformada, etc.
- *Resistência ao desgaste*: propriedade de fundamental importância para os aços ferramentas, visto que, o desgaste é um fator que pode ocasionar a falha do material. Essa propriedade depende tanto de fatores internos (teor de elementos de liga e de carbono) quanto a de fatores externos (meio de lubrificação ao qual o material está operando).
- *Temperabilidade*: característica essa que garante maior uniformidade as peças, devido a uma homogênea distribuição da dureza da superfície para, o centro do material.
- *Tenacidade*: pode ser definida como “capacidade de um material deformar-se antes de romper-se” ou “ a capacidade do material em absorver considerável quantidade de energia sem romper”. A tenacidade de um material depende basicamente dos seguintes fatores: tensões internas, produzidas por têmpera, encruamento, granulação grosseira, dureza excessivamente alta, teor em ligas, etc.

- **Resistência mecânica:** aços ferramentas, necessitam suportar grandes esforços sem a ocorrência de falhas, desse modo, altos valores para os limites de escoamento e elástico se fazem presente nesses materiais.

Na Figura 1, é apresentado a composição química dos principais aços ferramentas e na Figura 2 a classificação dos aços ferramentas e suas propriedades.

	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Ni
O1	0,90	0,30	1,00	0,50	-----	0,50	-----	-----
D2	1,50	0,40	-----	11,50	1,00	-----	0,40	-----
D6	2,20	-----	-----	11,50	-----	0,70	0,20	-----
H13	0,40	1,00	-----	5,00	1,50	-----	1,00	-----
P20	0,36	-----	0,60	1,80	0,20	-----	-----	1,00
1.2714	0,57	-----	0,70	1,10	0,50	-----	1,10	1,65
420	0,40	-----	0,50	13,5	-----	0,25	-----	-----
M2	0,80	0,80	-----	5,00	6,00	5,00	2,00	-----

Figura 1– Composição química dos principais aços ferramentas (% em massa).

Fonte: (Boletim Técnico, 2010)

Decrescem: Resistência ao choque e usinabilidade.

Crescem: Profundidade de têmpera, custo, indeformabilidade na têmpera, resistência ao amolecimento pelo calor.

	TRABALHO A FRIO	TRABALHO A FRIO	TRABALHO A QUENTE
	DEFORMAÇÃO NORMAL DE TÊMPERA	BAIXA DEFORMAÇÃO DE TÊMPERA	BAIXA DEFORMAÇÃO DE TÊMPERA
ALTA RESISTÊNCIA À ABRASÃO	W1, W21 (1,1 a 1,3%C)	D2 D3 D6	M3 T5 T8
MEDIA RESISTÊNCIA À ABRASÃO	W1, W2 (1,0 a 1,1%C)	A2, O7	M1 M2 T1
BAIXA RESISTÊNCIA À ABRASÃO	W1, W2 (0,8 a 1,0%C)	O1, O2, L6	H21
RESISTÊNCIA AO IMPACTO	S1	S5	H11 H12, H13

Figura 2 – Classificação dos aços ferramentas e suas propriedades Fonte: (GOBBI, 2007)

2.2 Aços-Ferramenta para trabalho a frio

Aços ferramenta para trabalho a frio são aços que podem sofrer tratamentos térmicos e que também possuem uma boa estabilidade dimensional durante esses tratamentos. Por apresentar boa estabilidade, esses aços são indicados em ferramentas para trabalho a frio, tal como, matrizes para conformação, estampagem, etc. (CHIAVERINI, 2005). Durante sua vida, estes aços tem de passar por grandes esforços de tração-compressão e sujeitados a grandes atritos, sendo as propriedades dureza e alta resistência ao desgaste de grande necessidade (Tang, L; Gao,X; Huang J, 2013).

Aços para trabalho a frio são utilizados em trabalhos que não envolvam altas temperaturas de operação. É aconselhado o uso em condições que não ultrapassem uma faixa de temperatura entre 205 a 260°C. Na Figura 3 é apresentado a composição química para os principais aços para trabalho a frio, onde, a classe A são os aços temperáveis ao ar, a classe D, são os aços de alto teor de carbono e cromo e a classe O os temperáveis em óleo.

Composição dos Aços para trabalho a frio - Classes A,D e O										
Designação		Composição % (*)								
AISI	UNS	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
Aço de média liga resfriado a ar										
A2	T 30102	0,95-1,05	1,00 máx	0,50 máx	4,75-5,50	0,30 máx	0,90-1,40	...	0,15-0,50	...
A6	T 30106	0,85-0,75	1,80-2,50	0,50 máx	0,90-1,20	0,30 máx	0,90-1,40
A10	T 30110	1,25-1,50(**)	1,60-2,10	1,00-1,50	...	1,55-2,05	1,25-1,75
Aços alto carbono e alto cromo										
D2	T 30402	1,40-1,60	0,60 máx	0,60 máx	11,00-13,00	0,30 máx	0,70-1,20	...	1,10 máx	...
D3	T 30403	2,00-2,35	0,60 máx	0,60 máx	11,00-13,50	0,30 máx	...	1,00 máx	1,00 máx	...
Aços resfriados em óleo										
O1	T 31501	0,85-1,00	1,00-1,40	0,50 máx	0,40-0,60	0,30 máx	...	0,40-0,60	0,30 máx	...
O2	T 31502	0,85-0,95	1,40-1,80	0,50 máx	0,50 máx	0,30 máx	0,30 máx	...	0,30 máx	...
O6	T 31506	1,25-1,55(**)	0,30-1,10	0,55-1,50	0,30 máx	0,30 máx	0,20-0,30

(*) todos os aços contêm 0,25 máx Cu, 0,03 máx P, e 0,03 máx S. O enxofre pode ser aumentado para 0,06 a 0,15% para melhorar a usabilidade dos grupos A e D.
(**) contém grafite livre na microestrutura

Figura 3 – Composição química dos aços para trabalho a frio

Fonte: (Portal CIMM)

2.3 Aço Ferramenta AISI D2

O aço AISI D2 é um dos mais utilizados em ferramentais para conformação e corte de metais por possuir uma excelente combinação entre resistência mecânica e resistência ao desgaste, como matrizes para estampagem, rolos laminadores de roscas, centros para tornos e punções (GOBBI, 2007).

O aço classificado como AISI D2 faz parte de um grupo designado por aços de alto carbono e alto cromo. Tal grupo caracteriza-se em termos de propriedades pela grande profundidade de endurecimento, extrema indeformabilidade e alta resistência ao desgaste abrasivo (HEINRICH, 1975; MESQUITA E BARBOSA, 2005). A resistência ao desgaste é cerca de oito vezes maior se comparado a aços carbono sem vanádio ou outros tipos de carbonetos (CHIAVERINI, 2005).

A composição química do aço AISI D2 é apresentada na Tabela 1 abaixo. A alta quantidade de elementos de liga presente visa essencialmente o aumento na temperabilidade deste aço de alto carbono. Como consequência, os elementos Cr, Mo e V induzem a formação de carbonetos, que finamente dispersos na matriz, são os grandes responsáveis pela grande resistência ao desgaste abrasivo. Somente uma pequena quantidade destes elementos é aceita pelos cristais de Fe_3C , formando-se então carbonetos relativamente complexos, tais como $(Fe,Cr)_3C$, $(Fe,Cr)_7C_3$, $(Fe,Mo)_6C$, $(V, Fe)_4C_3$. (HEINRICH, 1975; CHIAVERINI, 2005).

Tabela 1– Composição química do aço AISI D2.

Fonte: (VILLARES METALS, 2013)

Composição Química (% em peso)					
AISI	C	Si	Cr	Mo	V
D2	1,5	0,3	12	0,95	0,9

2.4 Tratamentos térmicos em aços D2

Os tratamentos térmicos têm como objetivo causar uma alteração microestrutural de maneira controlada e com isso obter uma melhor combinação entre as diferentes propriedades dos aços com vista em sua aplicação. Nos aços ferramenta é de maior interesse obter uma estrutura de alta resistência mecânica e

de resistência ao desgaste, parâmetros que estão relacionados com a dureza que por sua vez são controlados através de tratamentos térmicos.

Segundo Murray (1979) a resistência ao desgaste aumenta linearmente com a dureza nos metais puros. Já nos metais ferrosos, como é o caso deste estudo, esta relaciona-se com a porcentagem de carbono e com a microestrutura. Um aumento no teor de carbono faz a resistência ao desgaste aumentar. O mesmo ocorre conforme a microestrutura é mudada de ferrita para perlita, desta para bainita e finalmente para martensita, desde que acompanhada de um aumento de dureza. Já a presença de elementos de liga irá atuar na formação de carbonetos, que parecem ter uma particular importância na resistência ao desgaste por abrasão.

Murray (1979) também afirma que a presença de austenita retida tem melhorado a resistência ao desgaste da martensita revenida. A austenita fornece uma melhor ancoragem aos carbonetos, ocasionando um baixo arrancamento do carboneto da matriz austenítica. Além disto a formação de carbonetos duros, e finamente dispersos, aumentam a resistência ao desgaste, enquanto que os grosseiros, diminuiriam.

2.4.1 Comportamento do aço D2 em relação à têmpera e revenimento

As principais variáveis que estão relacionadas à têmpera e ao revenimento e afetam as propriedades metalúrgicas finais do aço AISI D2, são a temperatura de austenitização e temperatura de revenimento. As propriedades afetadas se referem principalmente ao endurecimento, teor de austenita retida e resistência à fratura.

Austenitização

Como mencionado, na têmpera se obtém a máxima dureza do aço através da transformação martensítica. Essa dureza depende fundamentalmente de dois fenômenos: teor de carbono e formação de austenita retida.

Observa-se no trabalho de Mendanha et al (2008, p.10) que um aumento do teor de carbono traz um aumento na dureza, mas ao mesmo tempo diminui a temperatura de início da formação martensítica. Isso faz com que a transformação martensita não ocorra por completo resultando em austenita retida, que faz com que a dureza diminua.

As recomendações encontradas por fabricantes indicam que o aquecimento para têmpera deve ser entre 1010 e 1040  C, com duração de uma hora para cada 25 mm de espessura, além de um pré-aquecimento das ferramentas (GGD-METALS, 2011). De outro modo, no trabalho de Mendanha et al (2008, p.10-12)   realizado uma simulação matemática com o software *“ThermoCalc”*, para determinação da temperatura de austenitização. A temperatura é escolhida quando a dissolução de carbonetos   melhor combinada com o início de transformação martensítica.

A Figura 4 mostra como ocorre a dissolução de carbonetos com o aumento da temperatura de austenitização.

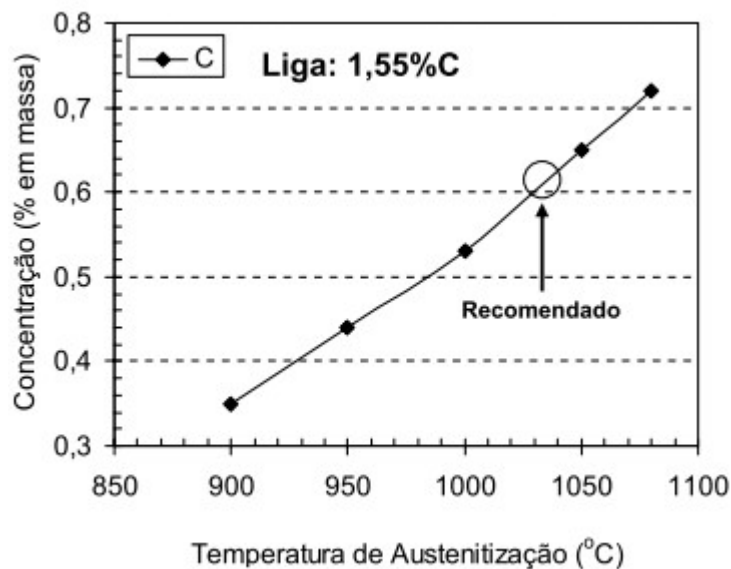


Figura 4 – Dissolução de carbonetos com a elevação da temperatura de austenitização.

Fonte: (Mendanha, 2004, adaptado).

Já a temperatura de transformação martensítica foi calculada através da equação de Andrews e apresentada na Tabela 2 (Andrews, 1965, p. 721-727):

Tabela 2 - Variação da proporção de carbono e temperatura de transformação martensítica (Ms), com a temperatura de austenitização.

Fonte: (Medanha, 2004)

Item/ Variável	Temperatura de Austenitização, °C				
	900	950	1000	1050	1080
Proporção de carbono, %	0,35	0,44	0,53	0,65	0,72
Ms, °C	331	284	237	177	142

Com isso a temperatura ou a faixa de temperatura de austenitização ótimas, é aquela onde se melhor combina esses dois fenômenos, e no caso do aço AISI D2 varia nas proximidades de 1040°C.

Em relação aos elementos de liga, afirma-se que o aumento no teor de Mo e V dissolvidos na matriz é fundamental para se obter um endurecimento secundário eficiente no revenimento. A elevação do teor de Cr na matriz tem como efeito mais importante aumentar a temperabilidade, mas também participa do endurecimento secundário (HONEYCOMBE, 1981).

Resfriamento

Outro fenômeno que deve ser considerado é a temperabilidade do aço, ou seja, a facilidade em ocorrer a transformação martensítica em função da velocidade de resfriamento. O alto teor de carbono e elementos de liga confere a estes aços a característica de boa temperabilidade. Mesmo assim os processos de têmpera comumente utilizados: água, óleo, ar calmo, banho de sal e alta pressão de nitrogênio em forno a vácuo possuem diferentes características de resfriamento e combinam as propriedades de dureza, tensões internas e deformação de maneira diferente.

Villares Metals (2013) recomenda que o aquecimento para têmpera deve ser entre 1010 e 1030 °C. Também um pré-aquecimento das ferramentas é necessário. Além disto os tipos de resfriamento devem ser:

- Óleo apropriado, com agitação e aquecido entre 40 e 70 °C.
- Banho de sal fundido, mantido entre 500 e 550 °C.
- Ar calmo.

Revenimento

O revenimento após a têmpera é fundamental para ajustar as propriedades de dureza e resistência a fratura desejadas. Nos aços ferramenta, ao contrário dos aços carbono acontece um aumento na resistência mecânica após o revenimento. Normalmente estes aços atingem a sua máxima dureza no primeiro revenimento (endurecimento secundário), com a transformação da austenita retida em martensita. No segundo revenimento a dureza é reduzida para o nível desejado (ITARAÍ, 2012, p.12-13).

As ferramentas feitas do aço AISI D2, devem ser revenidas imediatamente após a têmpera, tão logo atinjam 60 °C. Faz-se, no mínimo 2 revenimentos e com resfriamento lento até a temperatura ambiente. A temperaturas de revenimento devem ser escolhidas, conforme a dureza desejada. A Figura 5 apresenta a curva típica de dureza em função da temperatura de revenimento para o aço D2. O tempo de cada revenimento deve ser de no mínimo 2 horas. Para peças maiores que 70 mm, recomenda-se calcular o tempo em função de sua dimensão, considerando 1 hora para cada polegada de espessura (VILARES, 2013).

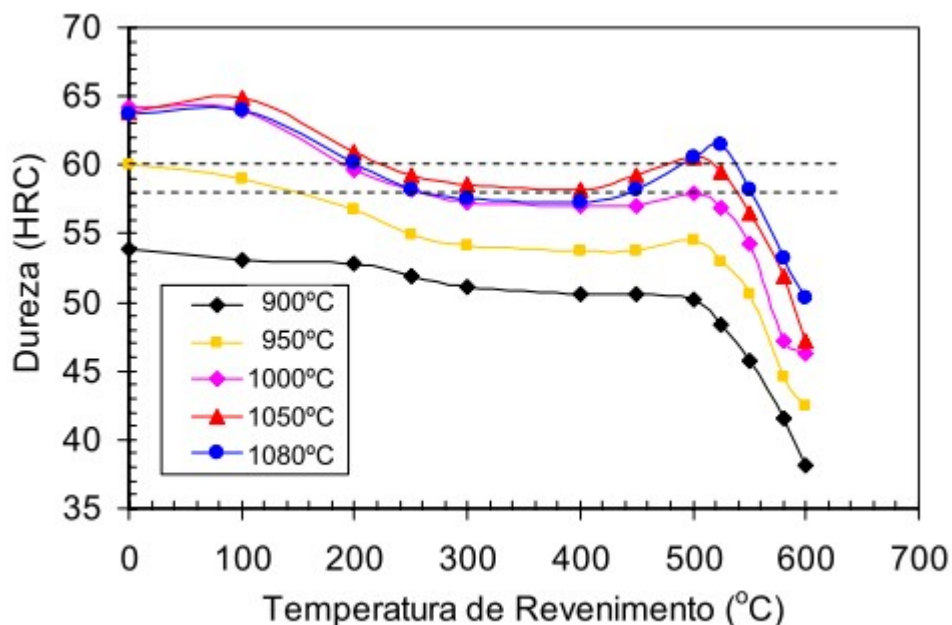


Figura 5 - Curvas de revenimento do aço AISI D2 passado por diferentes temperaturas de austenitização.

Fonte: (Mendanha, 2008)

2.5 Tratamentos termo-químicos

2.5.1 Definições

Os tratamentos termo-químicos promovem, através da mudança no perfil microestrutural, melhoras significativas na dureza superficial dos aços. As mudanças nas composições químicas dos materiais geram diferentes microestruturas, as quais, alteram significativamente as propriedades mecânicas desses aços, além do que, aumentam a vida útil dos mesmos, promovendo maiores resistência ao desgaste. Os principais processos de endurecimento superficial é a cementação, nitretação, carbonitretação e boretação (CHIAVERINI, 2002).

Os processos de mudanças que ocorrem na superfície dos materiais, podem ser definidos como tratamentos nos quais, a superfície e a matriz dos materiais são projetados em conjunto, proporcionando assim, propriedades que não seriam fornecidos por cada um dos materiais sozinho. (Enver Atık, 2002).

2.5.2 Nitretação

A nitretação é um dentre os tratamentos térmicos de superfície, cujo objetivo é o endurecimento superficial do aço. Consiste na adição de nitrogênio, sob determinadas condições, à camada superficial, tornando-a esta com uma dureza e resistência ao desgaste mais elevada (CHIAVERINI, 2002).

A nitretação proporciona vantagens operacionais, como a temperatura do processo não ser tão alta, diminuindo problemas com empenamento ou distorção, além de não haver necessidade de tratamento térmico posterior, e muitas vezes o revenimento é feito simultaneamente (CHIAVERINI, 2002).

Duas camadas distintas podem ser formadas no processo de nitretação dependendo dos parâmetros de nitretação utilizados. Uma camada branca, rica em compostos, localizada na superfície e uma camada de difusão localizada logo abaixo. A camada branca nem sempre é formada durante a nitretação (Franco, Jr 2013).

O desempenho da nitretação é favorecido entretanto, com grãos mais refinados, maiores concentrações de nitrogênio e maiores quantidade de nitretos de

cromo presentes na composição do material, representando fatores significativos no endurecimento da superfície do aço AISI D2 (P.David, 2005).

2.5.3 Nitretação assistida por plasma

O processo de nitretação por plasma, teve um grande salto tecnológico de desenvolvimento nas últimas décadas. Ao proporcionar maior vida útil aos componentes, redução no tempo de processamento e um bom acabamento superficial a nitretação por plasma, se torna de fundamental importância no contexto industrial atual.(Ranalli, G, 2009).

O plasma pode ser criado através de uma atmosfera à vácuo onde, é inserido um gás, geralmente o N₂, o qual é energizado através de uma descarga elétrica entre 500 a 1000v. Essa energia elétrica tende a ionizar o gás. Os íons de nitrogênio assim que formados, são acelerados em direção à superfície da peça ocorrendo a absorção desses íons e a difusão em direção ao núcleo do material. (CHIAVERINI, 2002).

A camada nitretada é composta por duas regiões, a camada branca e a camada de difusão. A camada de difusão é composta por nitrogênio nos interstícios e nitretos e os quais, são formados com os elementos de maior afinidade com o nitrogênio, tais como: cromo, alumínio, vanádio, molibdênio, além do ferro. Para ligas ferrosas, a camada branca formada, vai depender da concentração %N (em peso) na atmosfera gasosa. Para concentrações excedentes a 5,5%(N), a camada branca é formada por nitretos de ferro γ' -(Fe₄N), já em concentrações acima de 7,5%(N), é constituída por nitretos (Fe₂₋₃N)₃₀ (CHIAVERINI, 2002).

Os resultados obtidos no processo de nitretação à plasma depende de vários parâmetros do processo, tal como: composição química do material a ser tratado, tempo e temperatura de operação, mistura gasosa no reator. Sendo assim, alterações nesses parâmetros podem resultar em materiais com características diversas.

Uma nitretação por plasma a 470°C, com diferentes tempos e composição da atmosfera pode melhorar significativamente a resistência ao desgaste abrasivo do aço AISI D2 e as camadas nitretadas pode chegar a uma dureza superficial de 1350 HV (Conci, M., Bozzi, A., Franco Jr.,2014)

A Figura 6 apresenta a influência de alguns processos de nitretação sobre a espessura da camada nitretada formada.

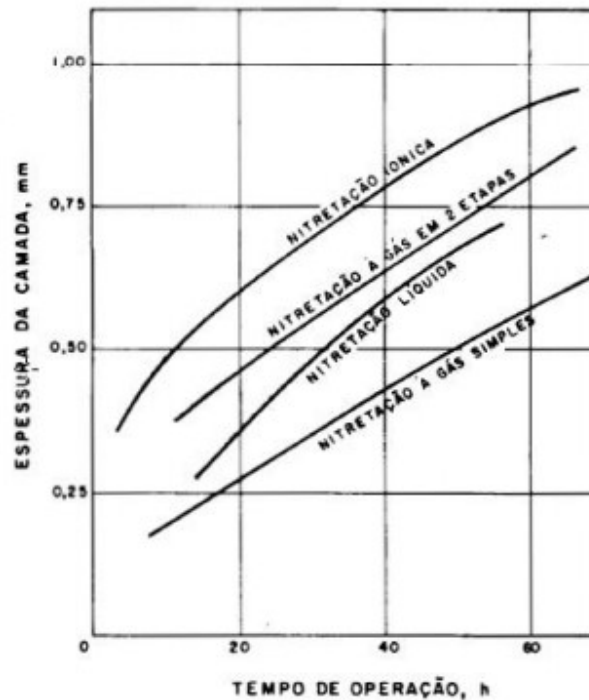


Figura 6 – Influência de alguns processos nitretação sobre a espessura da camada nitretada.

Fonte: (CHIAVERINI, 2002)

2.6 Ensaio de riscamento (*scratch test*)

O ensaio de riscamento é utilizado para avaliar mecanicamente a superfície de um material através da simulação de um evento abrasivo. Este ensaio consiste em deslizar um penetrador rígido sob carga e velocidade controlada, gerando um sulco sobre a superfície do material a ser analisado. Os resultados do ensaio de riscamento podem variar desde um sulcamento com deformação plástica em materiais dúcteis à geração de trincas em materiais frágeis. Os ensaios podem ser realizados com os seguintes propósitos (JACOBSSON et al, 1992):

- Caracterizar os mecanismos de deformação e remoção de material
- Medir Dureza ao Risco
- Avaliar ou classificar materiais relacionando a resistência a abrasão
- Avaliar a adesão entre o revestimento e o substrato

Além das várias condições de ensaio, a resistência ao desgaste pode ser correlacionada com as diferentes estruturas obtidas pelo material após os tratamentos térmicos e termoquímicos. Para uma aproximação dos resultados, a dureza é um fator predominante para se avaliar a resistência ao desgaste dos aços. (E.Rabinowicz,1965).

A Figura 7 esquematiza o ensaio de riscamento, com os parâmetros que podem ser definidos antes de sua execução, tais como: a velocidade (V), e força normal (F_N). Outro parâmetro que pode ser obtido é a força tangencial (F_T). Após o ensaio, a seção transversal do sulco é obtida conforme o esquema da Figura 8.

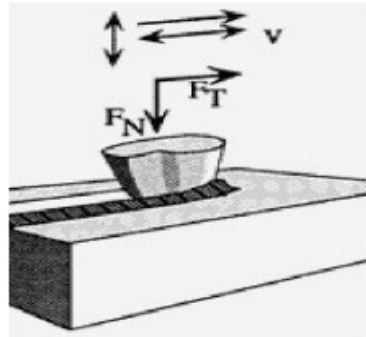


Figura 7 – Esquema do ensaio de riscamento.

Fonte: (JACOBSSON et al, 1992)



Figura 8 - Esquema da seção transversal do sulco formado

Fonte: (JACOBSSON et al, 1992)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais realizados nas amostras do material, que puderam ser divididos em duas etapas: uma de tratamentos térmicos e revenimento buscando causar às amostras diferentes microestruturas e outra de nitretação, comum a todas as amostras. Entre os experimentos foram realizadas medições e levantamento de propriedades.

Foram preparadas ao todo 9 amostras, que passaram inicialmente por tratamentos térmicos de têmpera e revenimento. Em seguida foram avaliadas a microestrutura e medida a dureza de cada amostra. Na sequência as amostras foram nitretadas e então foram avaliadas as micrografias e levantado o perfil de microdureza das camadas nitretadas. A resistência ao risco foi avaliada com ensaios de riscamento (scratch test) sendo os perfis dos riscos avaliados por interferometria.

Os parâmetros dos tratamentos térmicos nitretação e para os ensaios estão detalhados na Tabela 3. Os procedimentos de preparação das amostras, bem como a sequência de cada processo estão representados pelo fluxograma na Figura 9.

Tabela 3 - Parâmetros e sequência dos experimentos.

Têmpera		Revenimento	Ensaio A	Nitretação	Ensaio B
Temperatura de Austenitização	Meio de Resfriamento				
970 °C		500 °C 550 °C 600 °C			Metalografia
1020 °C	Óleo	500 °C 550 °C 600 °C	Metalografia Dureza	75% N ₂ 480 °C	Dureza Scratch Test
1070 °C		500 °C 550 °C 600 °C		8 horas	Interferometria

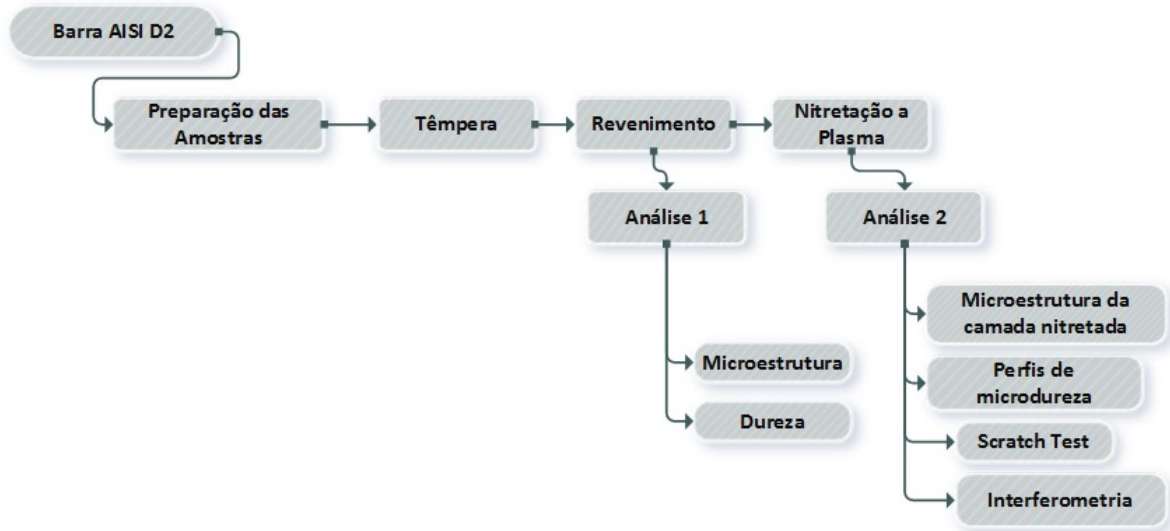


Figura 9 - Fluxograma dos procedimentos antes e após a nitretação.

Fonte: autoria própria

3.1 Material e Preparação das Amostras

O material em estudo, aço AISI D2, foi adquirido em formato de barra com perfil quadrado de 32x32 mm e comprimento de 700mm. Utilizou-se como referência os dados fornecidos pelo fabricante, obtendo-se o aço no estado recozido com dureza variando entre 224-234 HB e com a composição química da Tabela 4:

Tabela 4 - Composição química do aço AISI D2 em estado de fornecimento.

Fonte: (VILLARES METALS, 2013)

Composição	C	SI	MN	P	S	CR	MO	V
Química, %	1,5600	0,3000	0,2300	0,0230	0,0050	11,3000	0,7400	0,9400

A composição química do aço fornecido possui algumas diferenças em relação à composição de outros aços considerados nas referências para este trabalho.

Alguns cuidados foram tomados para que a realização dos experimentos fosse feita da maneira mais adequada, diminuindo o efeito de erros e produzindo

resultados coerentes com o planejamento. A seguir são expostos os procedimentos adotados para confecção das amostras até o término dos ensaios:

1. Procedimento de preparação das amostras

A barra adquirida foi cortada apenas em seu comprimento, obtendo-se amostras com tamanho de 32x32 mm de perfil e 10 mm de espessura. Após o lixamento para retirada de rebarbas as amostras foram enviadas ao tratamento térmico.

2. Procedimentos para os tratamentos térmicos

Para atenuar o efeito de variáveis indesejadas, a têmpera e o revenimento foram feitos sob condições de ambiente parecidas, além disso as amostras cuja temperatura a ser submetidas foi a mesma, foram colocadas juntas no forno. Do mesmo modo, procurou-se realizar os ensaios sob condições aproximadas.

3. Procedimento pós tratamentos térmicos para nitretação e análise metalográfica.

Após o revenimento as amostras passaram por um processo de retificação para retirada da camada descarbonetada e ajustes dimensionais. Para a realização da análise microestrutural, as superfícies foram lixadas, polidas e realizado o ataque com reagente Nital 2%. Após isto, as amostras, com acabamento superficial polido, puderam ter suas superfícies melhoradas com a nitretação. Concluída a nitretação as amostras foram cortadas transversalmente e a superfície exposta foi novamente preparada para análise da camada nitretada.

3.2 Têmpera

Foram escolhidas três temperaturas de austenitização de maneira a causar maior ou menor solubilização e carbonetos precipitados durante a têmpera. Com isso é possível obter faixas distintas de dureza além de uma maior ou menor quantidade de austenita retida, e por sua vez, diferentes pios de endurecimento secundário no revenimento. As temperaturas escolhidas foram de 970°C, 1020°C, e 1070°C, sendo a de 1020°C recomendada pela maior parte dos fabricantes. Já o meio de resfriamento será em óleo, para todas as amostras. As amostras

permaneceram por cerca de meia hora na temperatura de austenitização, e em seguida resfriadas. Após este processo, as amostras foram encaminhadas ao revenimento.

3.3 Revenimento

As temperaturas de revenimento foram escolhidas, de modo que uma delas estivesse englobada na faixa de endurecimento secundário. Tomando como referência a curva de dureza x temperatura de revenimento apresentada na Figura 5, observa-se que um pico de dureza ocorre com um revenimento próximo de 550°C. Outras duas temperaturas foram escolhidas, uma acima e outra abaixo desta faixa. As três temperaturas de revenimento escolhidas foram 500°C, de 550°C e 600°C.

Um duplo revenimento foi realizado nas amostras por um tempo de 2 horas na temperatura indicada. De maneira a aproximar as condições de revenimento as amostras de diferentes têmperas serão revenidas juntas em um mesmo processo quando as temperaturas de revenimento forem iguais. A Figura 10 esquematiza os processos de tratamentos térmicos realizados junto com os parâmetros escolhidos.

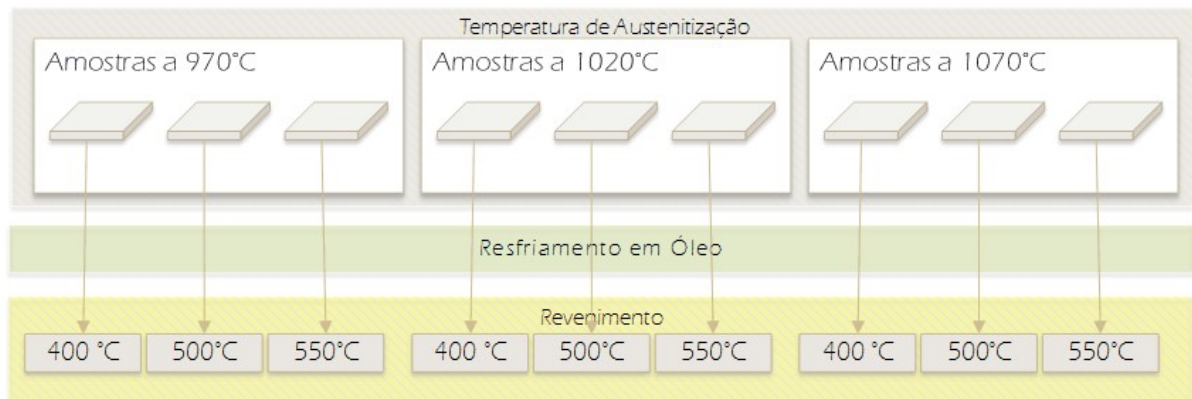


Figura 10 - Esquema do processo nos tratamentos térmicos.

Fonte: autoria própria

3.4 Ensaios de dureza e microdureza

A dureza Rockwell foi medida com o uso do durômetro M4C-025-G3M, Emco-Test da UTFPR, com carga de 30 N e tempo de aplicação de carga de 3s. As medições foram realizadas nas superfícies polidas das amostras. O teste de macro

dureza foi realizado em pontos aleatórios das amostras, com distâncias maiores do que três vezes a medida da diagonal das endentações.

As amostras preparadas conforme descritas na secção 3.1, item 3, foram também submetidas, após terem sido nitretadas, a medidas de microdureza Vickers a cada 5 μm , a partir de 25 μm da superfície, e foi utilizado uma carga de 0,03 Kgf para a obtenção dos perfis de dureza. Os ensaios foram realizados após à nitretação com o objetivo de comparar os perfis de microdureza para cada tipo de tratamento térmico prévio.

3.5 Ensaio de riscamento

As amostras preparadas conforme descritas na secção 3.1, item 3, foram também submetidas a ensaios de riscamento, após ao tratamento de nitretação.

O equipamento de riscamento utilizado foi um tribômetro da marca CETR, mostrado na Figura 11, com penetrador Rockwell C, de diamante cônico e ângulo de abertura de 120°. Todos os ensaios foram realizados com carga e velocidades constantes, conforme previsto na norma ASTM G171-03. A carga utilizada será de 100N. Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente.

Feito estes ensaios, as amostras serão submetidas a quantificação do tamanho e a profundidade do risco será avaliada por interferometria. Por fim serão traçadas as curvas que relacionam o coeficiente de atrito com a força normal aplicada.



Figura 11 - Tribômetro CERT® UMT

3.6 Nitretação iônica

As amostras preparadas conforme descritas na secção 3.1, item 3, foram nitretadas na empresa SDS em Curitiba/PR. O ciclo de nitretação utilizado foi de 8 h, com uma atmosfera de 75% de nitrogênio e 25% de hidrogênio à temperatura de 480°C. Esses parâmetros são os rotineiramente utilizados na indústria para aços carbono.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos na realização do projeto, conforme as etapas definidas e ilustradas na Figura 9.

4.1 Microestrutura e curva de revenido

Nas Figuras 12 a 14 são apresentadas as micrografias das amostras temperadas e revenidas a diferentes temperaturas. Pode-se visualizar a presença de carbonetos primários e secundários dispersos na microestrutura martensítica em todas as amostras. Os carbonetos maiores, como indicado na Figura 12-a, são os carbonetos primários do aço. Já os carbonetos finos dispersos pela matriz, sugerem a precipitação de carbonetos secundários durante os tratamentos térmicos.

A alteração de tamanho dos carbonetos não ficou suficientemente evidente nas micrografias, porém o aumento de dureza gerado pelo aumento do teor de carbono é evidenciado na curva de revenimento.

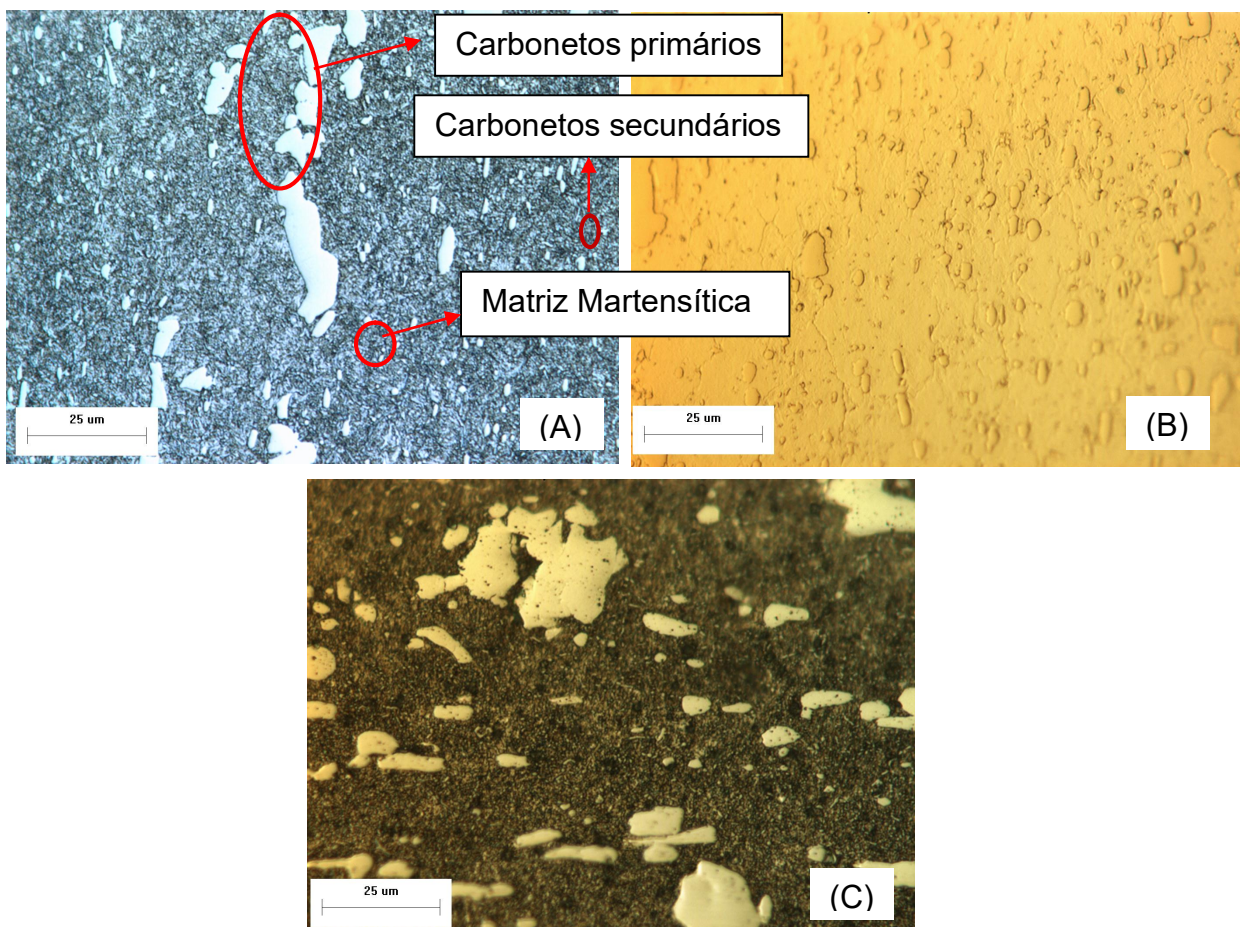


Figura 12 - Micrografia das amostras temperadas à 970°C e revenidas à 500°C (A), 550°C (B) e 600°C (c).

Fonte: Autoria própria.

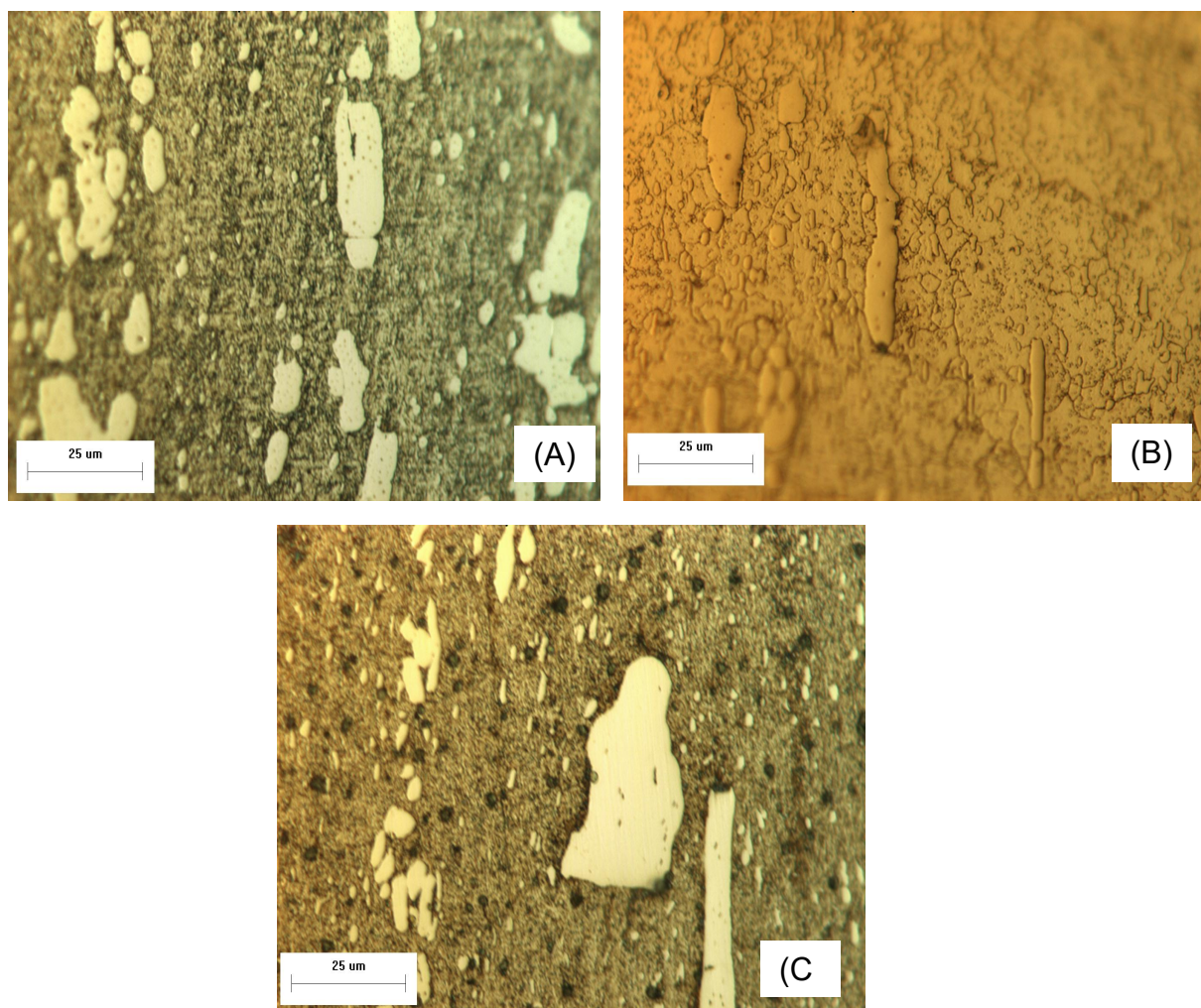


Figura 13 - Micrografias das amostras temperadas à 1020°C e revenidas à 500°C (A), 550°C (B) e 600°C (C).

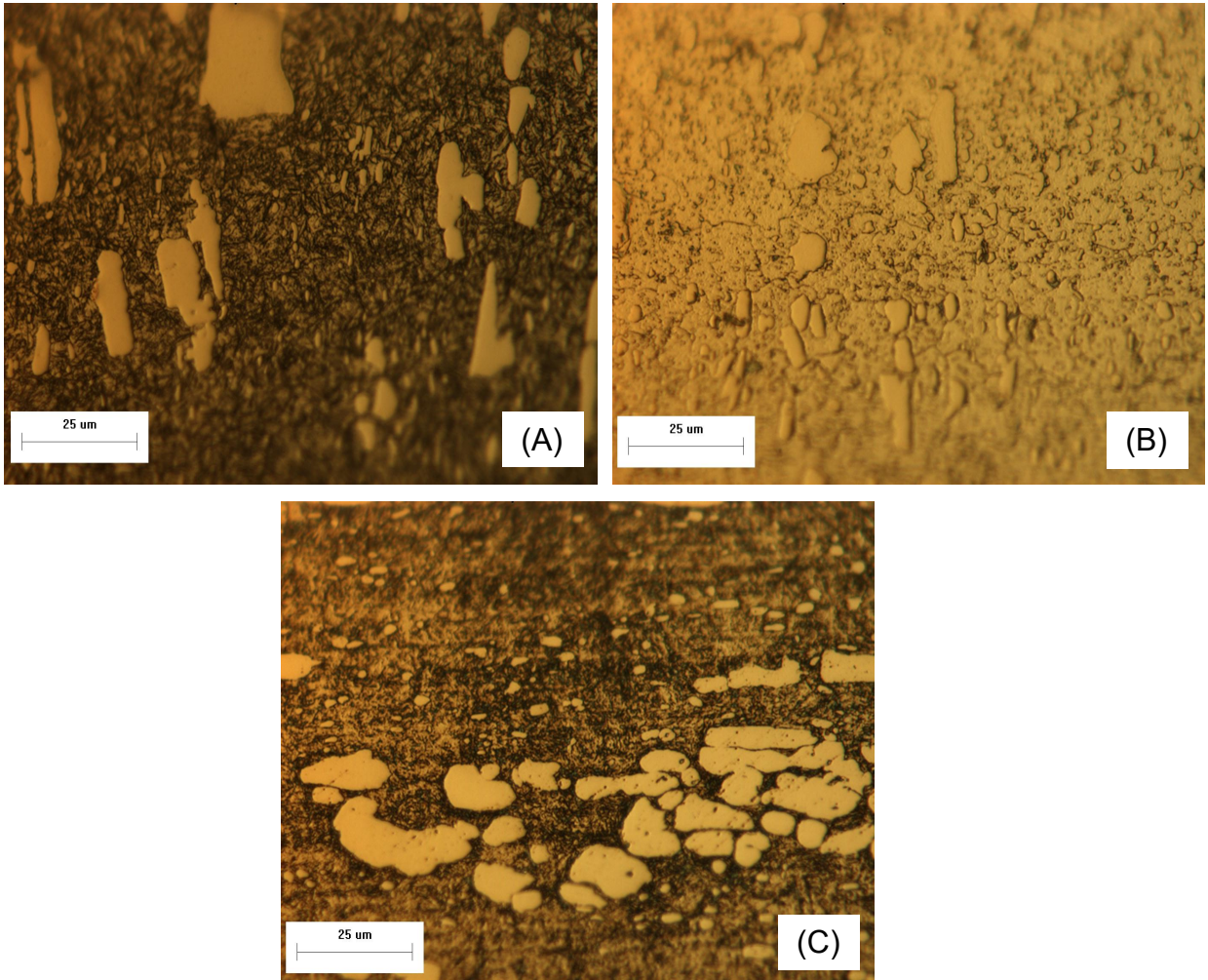


Figura 14 – Micrografias das amostras austenitizadas à 1070°C e revenidas à 500°C (A), 550°C (B) e 600°C (C)

Durante a têmpera, o fato de não ocorrer o fenômeno de difusão, faz com o aço tenha sua dureza elevada, pois o carbono encontra-se retido na martensita. (Callister Jr, 2006).

O Revenimento proporciona ao aço fenômenos difusivos, ou seja, o carbono é difundido para o material e não fica apenas retido na martensita, o que faz com que a dureza diminua (Callister Jr, 2006).

4.2 Microestrutura da camada nitretada

Após a nitretação da amostra T970 R500, por 8 horas, com a mistura gasosa descrita na secção 3.6, à 480°C, obteve-se a microestrutura indicada na Figura 15. Para esta amostra não se observa a presença de camada branca. A zona de difusão corresponde a região indicada na figura e sua espessura encontra-se calculada na Tabela 5.

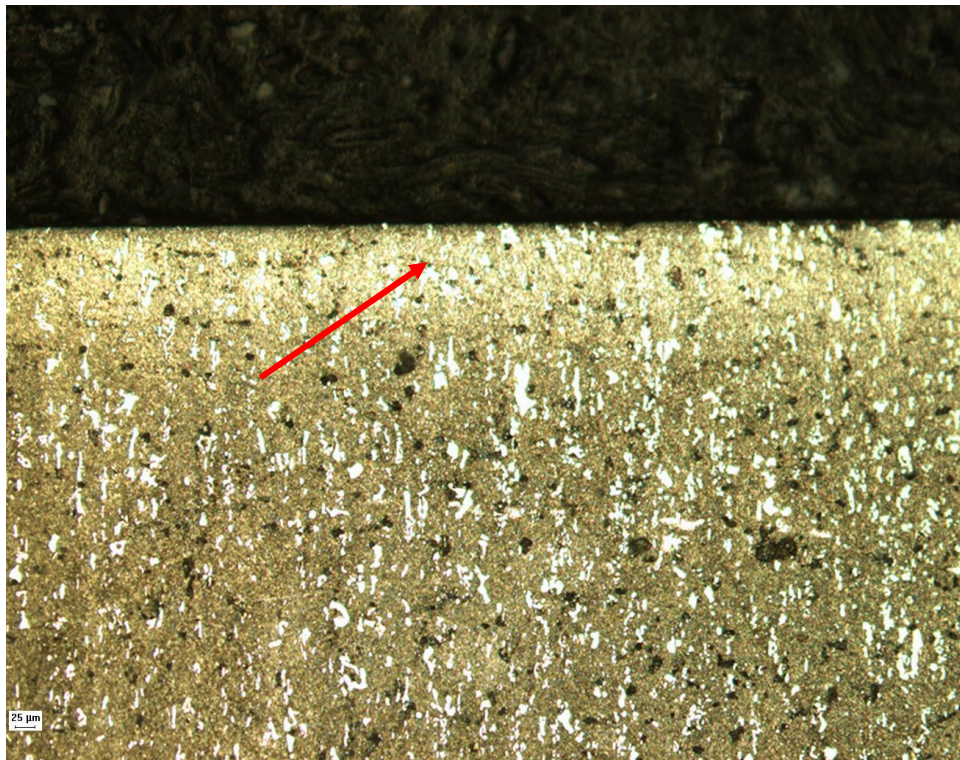


Figura 15- Micrografia da camada nitretada da amostra T970 R500.

4.3 Perfil de microdureza da camada nitretada

Os perfis de microdureza da camada nitretadas foram obtidos através de ensaio e a profundidade da camada obtida com base na norma DIN 50190. Foram realizadas três medições para cada ponto e a média com o desvio padrão amostral são representados em gráfico. A Figura 16 apresenta o perfil de dureza da amostra T1020 R500. O cruzamento da curva de microdureza com a linha tracejada igual a 50 HV excedente a do núcleo, representa a profundidade da camada nitretada.

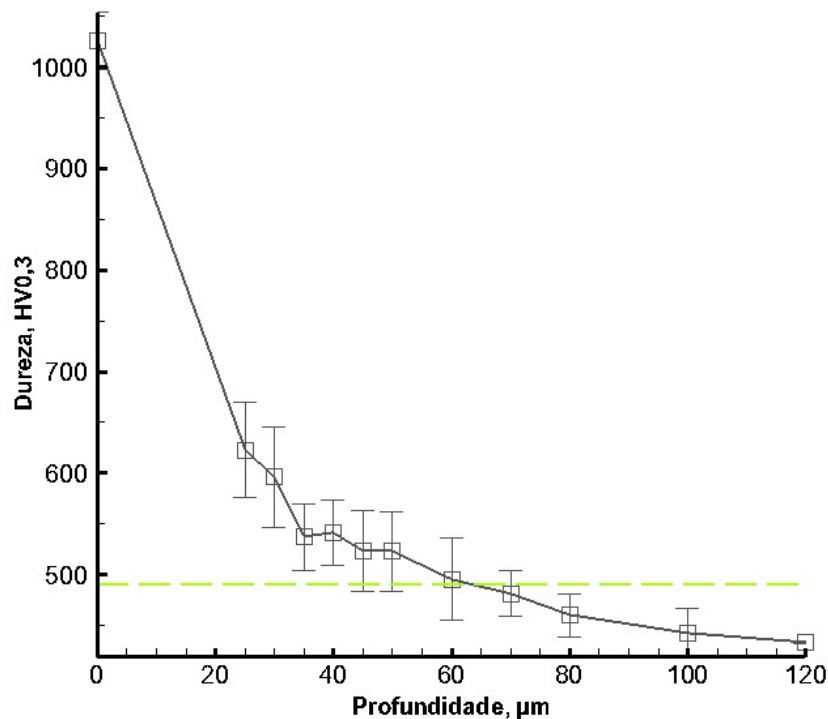


Figura 16 – Perfil de dureza para a amostra T1020 R500.

Os gráficos com o perfil de dureza das demais amostras encontram-se no apêndice C.

Os valores de microdureza médio da camada de difusão de todas as amostras estão apresentados na Tabela 5, incluindo-se a dureza medida em topo à face nitretada, e a dureza do núcleo. Na última linha são apresentadas as profundidades das camadas nitretadas segundo o método descrito pela norma.

Tabela 5 – Valores de microdureza das amostras após a nitretação

Profundidade (μm)	T970	T970	T970	T1020	T1020	T1020	T1070	T1070	T1070
	R500	R550	R600	R500	R550	R600	R500	R550	R600
TOPO	887	1014	1116	1026	1102	843	1111	1106	1065
25	693	731	739	623	649	726	854	794	818
30	688	729	710	596	637	692	820	763	802
35	639	707	693	537	644	625	810	763	756
40	646	704	622	541	627	615	805	745	745
45	617	676	588	523	621	574	789	749	752
50	606	682	571	523	603	553	792	726	764
60	585	666	554	495	591	520	754	678	714
70	586	649	513	481	580	509	763	691	690
80	597	623	519	460	587	492	749	677	689
100	572	628	493	443	576	487	739	683	686
120	583	616	490	434	594	484	745	653	666
NÚCLEO	576	629	485	440	571	477	741	657	664
Espeçura da camada nitretada (μm)	45,0	50,0	65,0	65,0	45,0	60,0	50,0	55,0	60,0

Observa-se que a dureza superficial se encontra contida entre aproximadamente 1000 e 1100 HV, com exceção das amostras T970 R500 e T1020 R600. Também pode-se perceber que a dureza do núcleo tende a aumentar, entre as temperaturas de 500 e 550°C, o que se faz condizente com a literatura. Na Figura 17, é mostrado o gráfico de dureza do núcleo por temperatura de revenimento, após a nitretação, medidos pelo método microdureza Vickers.

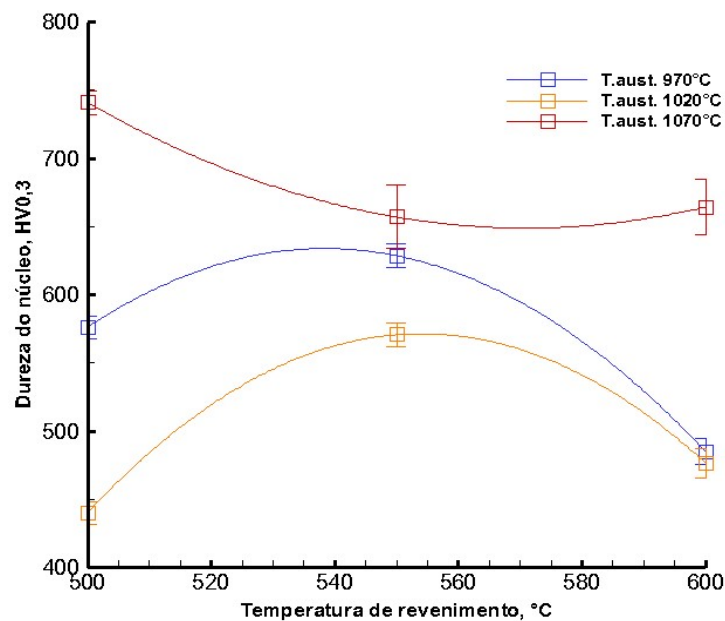


Figura 17 – Gráfico da dureza do núcleo pela temperatura de revenimento.

Nota-se que houve uma divergência em relação dureza média do núcleo com a literatura para as amostras temperadas à 1020°C. Na Figura 18, é mostrado o graficamente os perfis de dureza para as demais amostras.

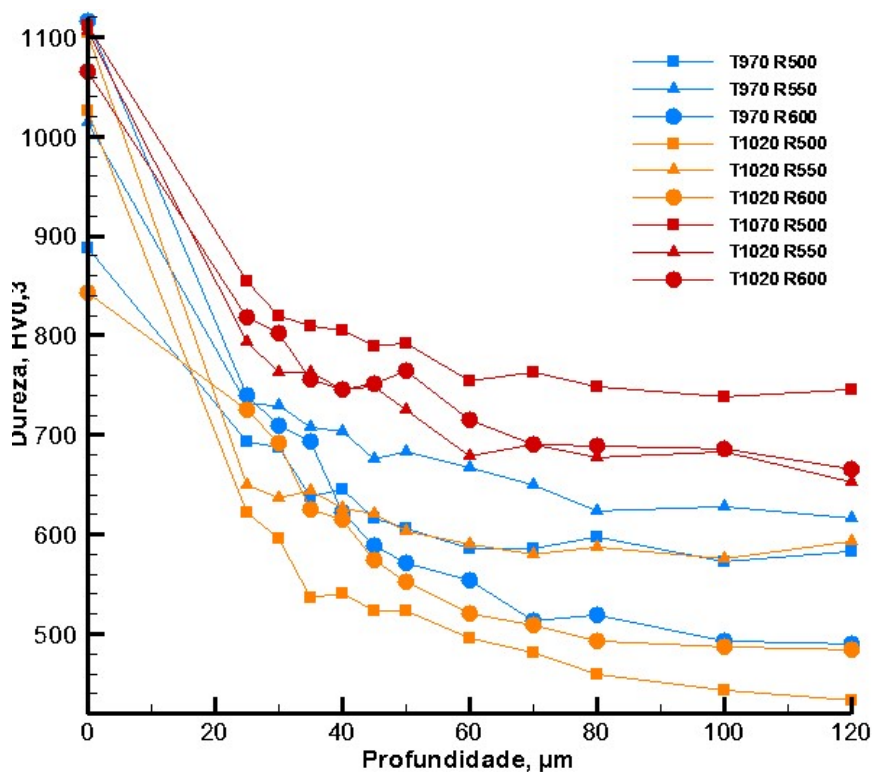


Figura 18 - Gráfico dos perfis de dureza.

4.4 Influência na camada nitretada

Na Figura 19, é mostrado o gráfico relacionando a espessura da camada nitretada com temperatura de revenimento. Nota-se que a espessura de camada varia na ordem de 45 a 65 µm. Porém, aliada a incerteza de medição, essa variação torna-se pequena, não atribuindo influência significativa dos tratamentos térmicos prévios na espessura de camada.

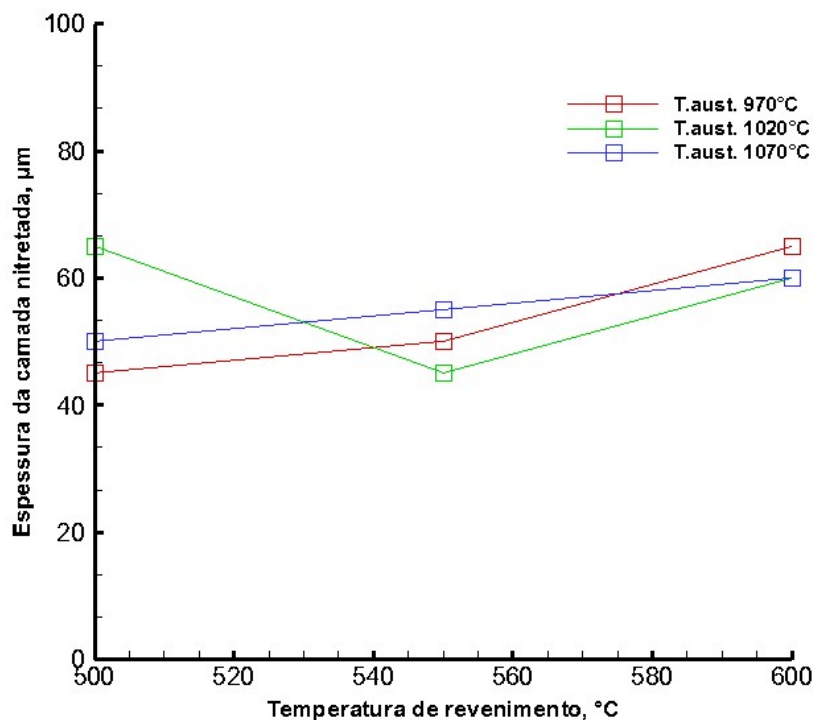


Figura 19 – Espessura da camada nitretada quanto à temperatura de revenimento.

4.5 Ensaio de riscamento

A partir dos ensaios de riscamento é possível obter, através da interferometria, o perfil geométrico de cada risco nas amostras. Assim, conforme é mostrado na Figura 20, o perfil do risco para a amostra T970 R600, possui uma certa homogeneidade em sua composição, enquanto que em outras amostras esse perfil não foi tão homogêneo. Os dados obtidos a partir da interferometria para todas as amostras podem ser visualizados no apêndice B.

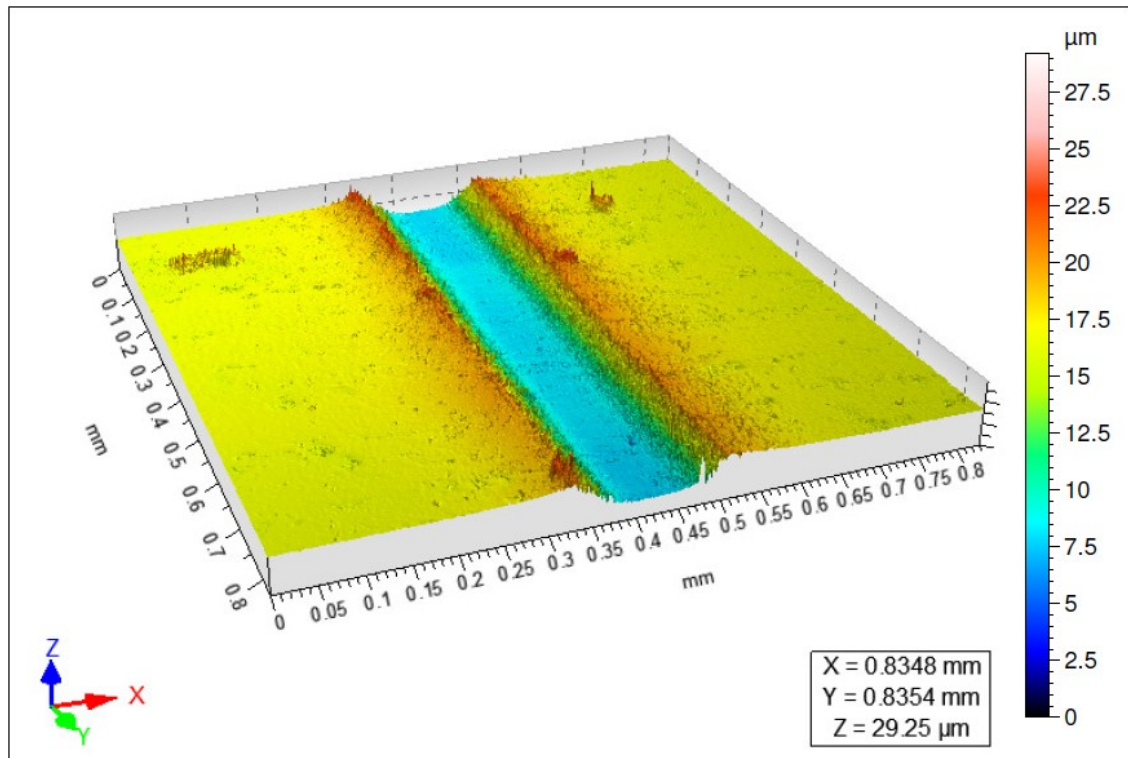


Figura 20 – Amostra T970 R600 submetida a análise por interferometria

4.5.1 Profundidade dos Riscos

Na Figura 21, é mostrado o gráfico obtido através da interferometria, que mostra o perfil frontal do risco realizado na amostra T970 R600, a partir do qual, extraiu-se o valor da profundidade que o penetrador atingiu em relação à superfície. Nesse caso essa profundidade foi de 9,266 μm.

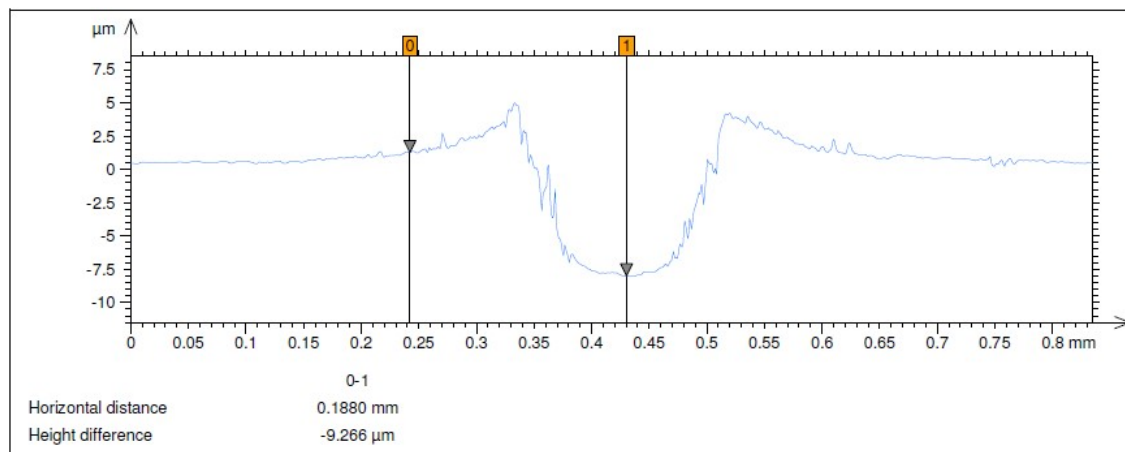


Figura 21 – Profundidade do risco na amostra T970 R600 obtida por interferometria

Na Tabela 6, é mostrado os dados de profundidade média obtidos para todas as amostras e todos os riscos. Nota-se que, para as amostras revenidas à 600°C, a profundidade média desses riscos foi maior, isso se deve ao fato de que essas amostras possuem uma dureza do núcleo menor, possibilitando assim, a maior penetração do edentador em relação às outras amostras.

Tabela 6 – Profundidade média adquirida pelo edentador nos ensaios de riscamento

Temperatura austenitização (°C)	Temperatura Revenimento (°C)	Prof. Média (µm)	Desv. Pad. (µm)
970	500	9,437	0,188
970	550	9,490	0,113
970	600	14,173	0,360
1020	500	17,563	0,505
1020	550	9,706	0,414
1020	600	23,250	0,523
1070	500	6,856	0,180
1070	550	8,683	0,356
1070	600	9,270	0,421

Na Figura 22, é possível fazer uma comparação, através de um método gráfico, da profundidade do risco em relação à dureza do núcleo das amostras. Nota-se que, quanto maior a dureza do núcleo, menor será a profundidade do risco. Isto é esperado pois, quanto mais duro o material, mais difícil será perfurá-lo

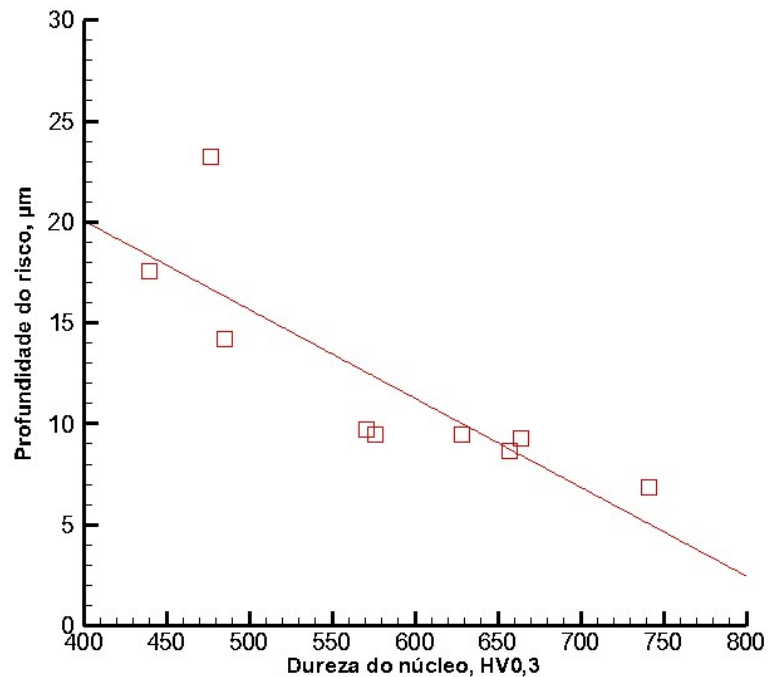


Figura 22 – Profundidade do risco quanto à dureza do núcleo.

Os valores médios de profundidade foram plotados em um gráfico ilustrado na Figura 23 para as amostras austenitizadas à 970, 1020 e 1070°C, que mostra a relação entre a profundidade e a temperatura de revenimento para todas as amostras.

Pode-se notar que para uma temperatura de revenimento de 550°C, a profundidade média das amostras convergem para um valor parecido, que para esse caso foi entre 8,683 e 9,7 μm.

Podemos fazer uma certa analogia desses resultados tomando por base a dureza do núcleo, encontrado na tabela 6, a qual, para a temperatura de revenimento de 550°C os são mais similares em relação às outras temperaturas.

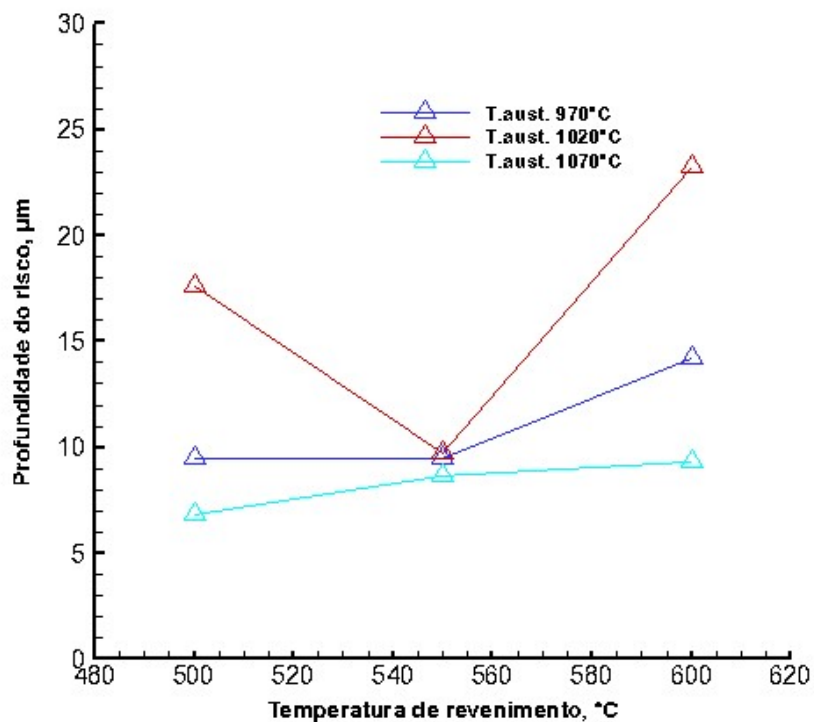


Figura 23 – Profundidade dos riscos quanto à temperatura de revenimento.

4.5.2 Largura dos Riscos

Para a mesma amostra é possível obter, também através da interferometria, a largura dos riscos. Na Figura 24, é mostrado a largura do risco obtida na amostra T970 R600, cujo valor corresponde à 0,1790 mm.

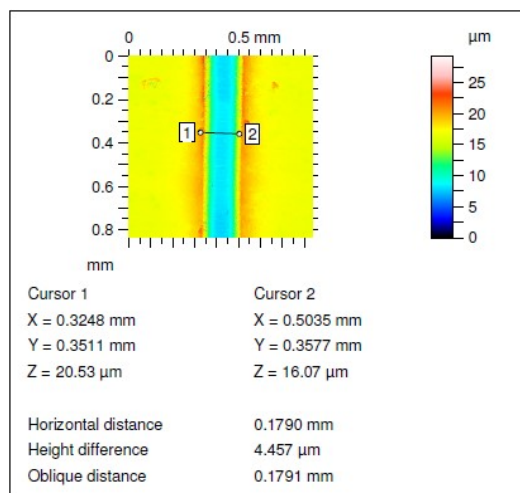


Figura 24 - Largura do risco mostrado através da interferometria (Horizontal distance)

Na Tabela 7, é mostrado os dados de largura média obtidos para todas as amostras e todos os riscos. Da mesma forma que a profundidade, as amostras revenidas à 600°C, tiveram uma largura média dos riscos maior. Isso se deve ao fato de que, o material é menos duro (núcleo) a essa temperatura de revenimento, e possibilitar maior penetração do edentador.

Tabela 7- Largura média adquirida pelo edentador no ensaio de riscamento

Temperatura austenitização (°C)	Temperatura Revenimento (°C)	Larg. Média (µm)	Desv. Pad. (µm)
970	500	0,183	0,188
970	550	0,197	0,113
970	600	0,210	0,360
1020	500	0,270	0,505
1020	550	0,159	0,414
1020	600	0,214	0,523
1070	500	0,192	0,180
1070	550	0,177	0,356
1070	600	0,208	0,421

Na Figura 25, é possível fazer uma comparação, através de um método gráfico, da largura do risco em relação à dureza do núcleo das amostras. Nota-se que, quanto maior a dureza do núcleo, menor será a largura do risco, evidenciando-se também uma relação da dureza do núcleo com a largura dos riscos, porém em menor intensidade do que a profundidade.

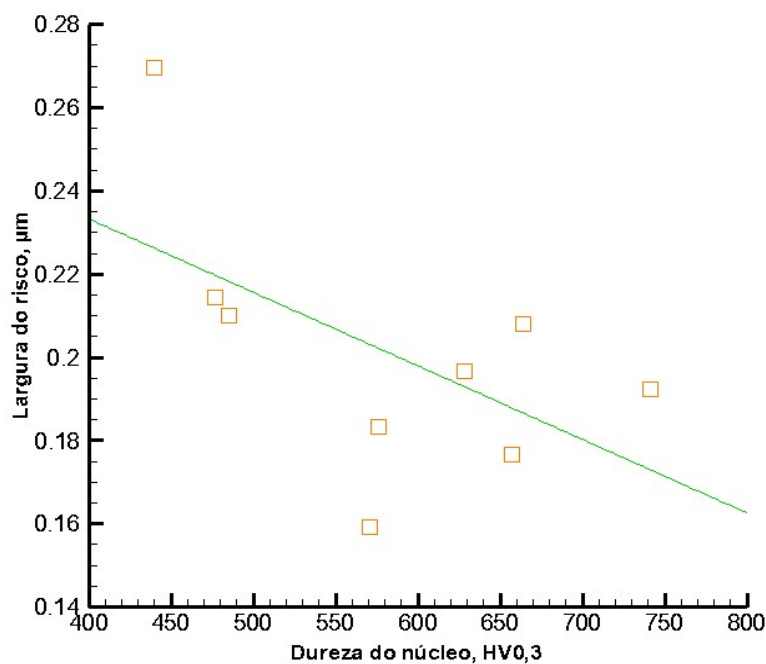


Figura 25 – Largura dos riscos quanto à dureza do núcleo.

Os valores médios de largura foram plotados em função da temperatura de revenimento representados na Figura 26 para as amostras austenitizadas à 970, 1020 e 1070°C, que mostra a relação entre a largura e a temperatura de revenimento para todas as amostras.

Pode-se notar que para uma temperatura de revenimento de 600°C, a largura média das amostras convergem para um valor parecido, que para esse caso foi entre 0,208 e 0,214 mm. A largura dos riscos, para estes casos, mostra-se mais relacionada com a geometria do edentador rockwell usado nos ensaios de riscamento, do que com a dureza do núcleo em si.

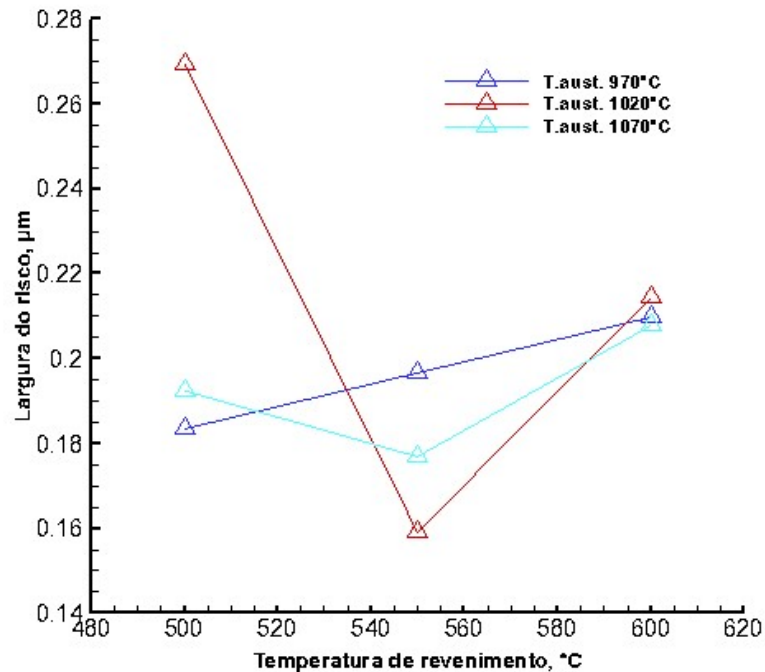


Figura 26 – Largura dos riscos quanto à temperatura de revenimento.

A Tabela 8 mostra a relação entre a dureza do núcleo com a profundidade e largura média obtida nos ensaios de riscamento. Nota-se que, mesmo com valores aproximadamente constantes para a dureza de superfície na maioria das amostras, ainda sim houve variação em relação a profundidade e largura dos riscos, comprovando assim que os tratamentos prévios exercem certa influência no material após serem nitretados.

Tabela 8 – dureza superficial em relação a profundidade e largura média.

	Dureza superficial (HV0,3)	Prof. Média (μm)	Larg. Média (μm)
T970 R500	887	9,4	0,183
T970 R550	1014	9,5	0,197
T970 R600	1116	14,2	0,210
T1020 R500	1026	17,6	0,270
T1020 R550	1102	9,7	0,159
T1020 R600	843	23,3	0,214
T1070 R500	1111	6,9	0,192
T1070 R550	1106	8,7	0,177
T1070 R600	1065	9,3	0,208

4.5.3 Dureza ao risco

A dureza ao risco foi determinada pela norma ASTM G171-03 como citado no item 3.4 da secção materiais e métodos, tomando-se por base a largura média dos riscos obtidas nas amostras. A Tabela 9, mostra os valores da dureza ao risco obtidas para todas as amostras, medidas em Pa.

Tabela 9 - Dureza ao risco obtidas no ensaios de riscamento para todas as amostras

Temperatura austenitização (°C)	Temperatura Revenimento (°C)	Dureza ao Risco HS (Pa)
970	500	7,57E+09
970	550	6,59E+09
970	600	5,78E+09
1020	500	3,51E+09
1020	550	1,01E+10
1020	600	5,54E+09
1070	500	6,89E+09
1070	550	8,15E+09
1070	600	5,89E+09

Com exceção da T970 R500, as amostras aumentaram seu desempenho em relação à dureza ao risco quando revenidas à 550°C. Estes valores estão plotados em um gráfico, ilustrado na Figura 27 em relação à temperatura de revenimento para as amostras austenitizadas nas três temperaturas de 970, 1020 e 1070°C, evidenciando melhor a relação entre a dureza ao risco e a temperatura de revenimento para todas as amostras.

Pode-se notar que para à temperatura de revenimento de 600°C, a dureza ao risco converge para um valor próximo, entre 5,5 e 5,8 GPa. Isso se deve ao fato de que a dureza ao risco é inversamente proporcional à largura.

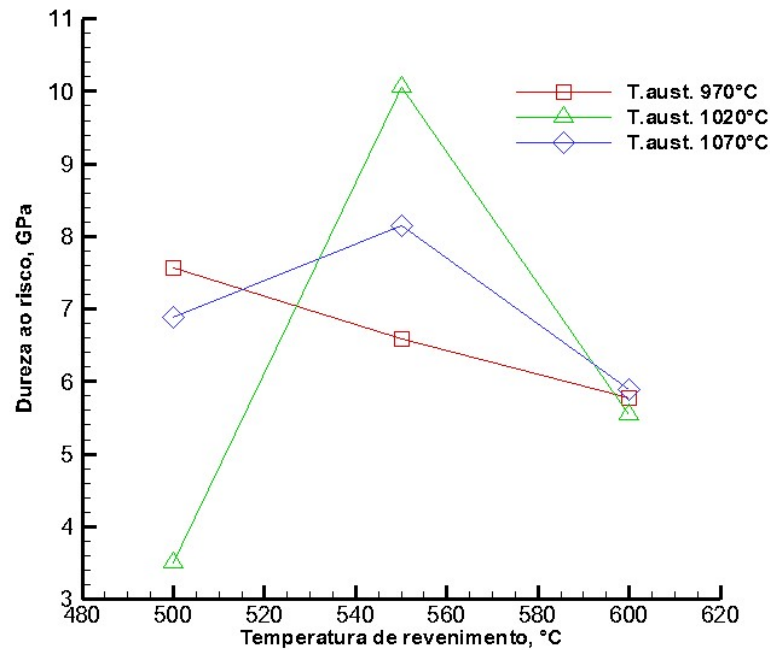


Figura 27 – Dureza ao risco quanto à temperatura de revenimento.

4.5.4 Coeficiente de Atrito

A Tabela 10 mostra o coeficiente de atrito médio dos ensaios de riscamento realizados, assim como o Apêndice D, que mostra a mesma informação em forma de gráfico, mais detalhada para cada risco em todas as amostras.

Pode-se notar que, para as amostras revenidas à 600°C houve um maior valor de coeficiente médio de atrito. Também nota-se que para a amostra T1020 R600, ocorreu o maior valor para o coeficiente de atrito médio, na ordem de 0,769. Este é um valor discrepante com os resultados das demais amostras como é mostrado na Figura 30, porém coerente com o fato desta amostra apresentar a maior profundidade ao risco. Porém os valores baixos de dureza superficial e de núcleo indicam deficiência na nitretação ou nos tratamentos térmicos, o que a tornou uma amostra atípica neste trabalho, não sendo utilizada para conclusões.

Em relação as demais amostras, as que tiveram menor dureza de núcleo, como as revenidas à 600°C, obteve-se um maior coeficiente de atrito. Isto significa que no ensaio de riscamento, o edentador ao perfurar e riscar a superfície do aço, acaba removendo maior quantidade de material, o que faz o COF ser maior para essas amostras.

Tabela 10 – Coeficiente de atrito dos ensaios de riscamento

Temperatura austenitização (°C)	Temperatura Revenimento (°C)	Força aplicada (N)	Coef. Médio	Desv. Pad.Médio
970	500	100	0,232	0,007
970	550		0,221	0,01
970	600		0,262	0,005
1020	500		0,325	0,01
1020	550		0,202	0,01
1020	600		0,769	0,03
1070	500		0,178	0,004
1070	550		0,200	0,007
1070	600		0,211	0,004

A Figura 28, mostra uma trinca no local onde ocorreu o ensaio de riscamento para a amostra T970 R550, que corresponde aos picos obtidos no gráfico do coeficiente de atrito (COF) mostrado na Figura 29.

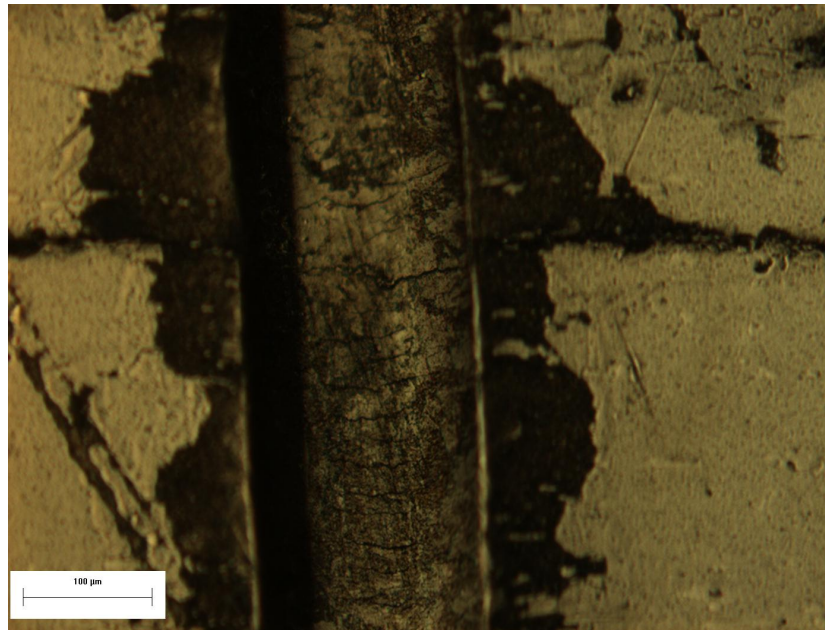


Figura 28 – Micrografia mostrando a trinca no ensaio de riscamento para a amostra T970 R550

Esses picos estão relacionados com a força tangencial aplicada ao edentador durante o ensaio de riscamento, a qual, acaba-se alterando durante a passagem pela trinca.

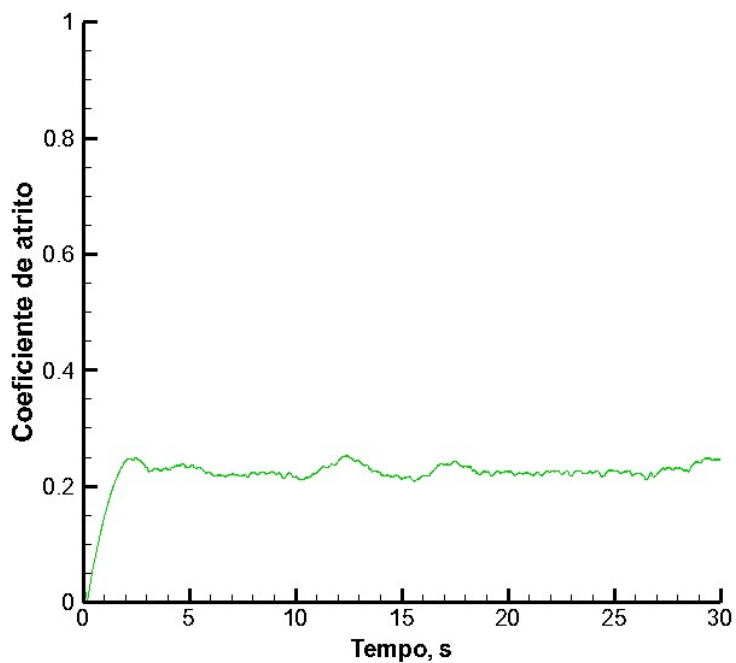


Figura 29 - Gráfico do coeficiente de atrito médio obtido no ensaio de riscamento para a amostra T970 R550

Na Figura 30, é feita a comparação entre COF para todas as amostras.

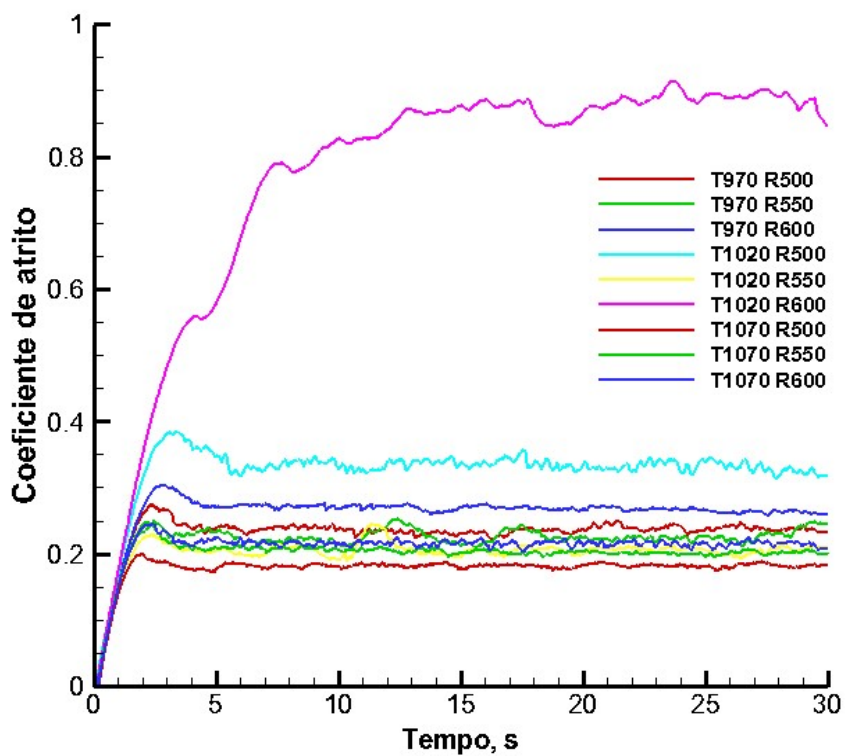


Figura 30 – COF para todas as amostras.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos parâmetros experimentais e resultados obtidos neste trabalho, pôde-se obter conclusões de interesse para a utilização do aço D2 em processos industriais.

A microdureza obtida nas amostras após o duplo revenimento de 2 horas cada, foi condizente com a literatura, havendo o pico de endurecimento secundário.

Os tratamentos térmicos prévios não influenciam na espessura da camada nitretada e nem na dureza superficial.

Para as condições de nitretação, não houve a formação da camada branca.

A largura dos riscos está mais relacionada à geometria do edentador do que as próprias condições de tratamentos térmicos anterior à nitretação

A profundidade média dos riscos aumenta quando de aumenta a temperatura de revenimento, evidenciando certa relação com à dureza do substrato, ou seja, quanto maior for a dureza do núcleo, menor será a profundidade do risco.

A dureza ao risco, por ser inversamente proporcional à largura tende a também convergirem para o mesmo valor quando a temperatura de revenimento for de 600°C.

O coeficiente de atrito tende a aumentar conforme diminui a dureza do núcleo.

Os tratamentos térmicos prévios produziram núcleos com diferentes durezas em amostras, que mesmo sem variações significativas nas camadas nitretadas, fez com que o material respondesse de formas diferentes ao risco.

REFERÊNCIAS

- ANDREWS, K.W. Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperature, *Journal of the Iron and Steel Institute*, v. 203, n.7, p. 721-727, 1965.
- ASTM Standard G171 (03) – Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus.
- ATIK, E. Mechanical properties and wear strength in aluminium–alumina composites. *Materials and Structures* 1998;31:418–22.
- BELL, T. et al. – “Modelling Plasma Nitriding”, *Advanced Metals & Materials*, vol. 152, n. 8, PP.: 40y-40bb, 1996.
- BOLETIM TÉCNICO. Tratamentos térmicos de aços ferramenta. ABM. Osasco/SP, 2012.
- BOLETIM TÉCNICO. Tratamentos térmicos de aço ferramenta: um ensaio. Heatch Tech (tecnologia em tratamentos térmico e engenharia de superfícies). Suzano/SP, 09 de outubro de 2010.
- CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos: ABM (associação Brasileira de metalurgia e materiais) 7ªed 2005.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, DIN 50190: Hardness depth of heat-treated parts; determination of the effective depth of hardening after flame or induction hardening, 1979.
- FRANCO, Jr., Obtenção de revestimentos dúplex por nitretação a plasma e PVD-TiN em aços ferramenta AISI D2 e AISI H13. São Paulo: Tese Apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a Obtenção do Título de Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2003.
- GOBBI, V.J.; Influencia da nitretação a plasma na resistência ao desgaste microabrasivo do aço ferramenta AISI D2. Dissertação de mestrado ciências mecânicas, Brasília/DF 07 de agosto de 2009. P23-34
- HENRICH, E. Os aços ferramentas: aços-ferramentas ligados e não ligados, composição, propriedades, produção e tratamento. 1975. São Paulo-SP
- HONEYCOMBE, R.W.K., *Steels: Microstructure and Properties*, Ed. Edward Arnold, London, 1981.
- JACOBSSON, S. et al.: *ASM Handbook Volume 18; Friction, Lubrication and Wear Technology: Scratch Testing*. Ohio: ASM International, 1992. 2235 p. (Vol.18), pp. 820-837.

CONCI, M., BOZZI, A.;Franco,A., Jr.Effect of plasma nitriding potential on tribological behaviour of AISI D2 cold-worked tool steel Wear. V317, pg188-193, 2014

MENDANHA, A., Estudo da Resistência à Fratura do Aço Ferramenta para Trabalho a Frio AISI D2, Dissertação de Mestrado, EPUSP, 151p., 2004.

MENDANHA, A. et al. principais parâmetros metalúrgicos e suas influências na qualidade e desempenho do aço para trabalho a frio AISI D2. In: 6º SEMINÁRIO DA CADEIA DE FERRAMENTAS, MOLDES E MATRIZES. ABM, 2008, São Paulo/SP.

MESQUITA, R.A., LEIVA, D.R., BARBOSA, C.A. Efeito das condições de tratamento térmico na microestrutura propriedades mecânicas de aços ferramentas. 2006. In: Catálogo de Tecnologia da Villares metals.

MURRAY, M.J., MUTTON, P.J. and WATSON, J.D. Abrasive wear mechanisms in steels, in Wear of Materials 1979, K.C. Ludema et al., eds., ASME, New York 1979, pp. 257-265

PEDRALI, P.C.; Nitretação à baixa temperatura assistida por plasma do aço inoxidável duplex UNS S23101: Influência da deformação plástica. Dissertação de mestrado em engenharia mecânica. Curitiba/PR 12 de dezembro de 2012.

PORTAL CIMM. Disponível em:

<http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6367-acos-para-trabalho-a-frio-identificados-pelas-letras-a-d-e-o#.VYIc-PIViko> Acesso em 28/05/2015.

PYE, DAVID. Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing, ASMInternational, 2005.

RABINOWICZ, E. Friction and Wear of Materials, Wiley-Interscience, New York, 1965.

RANALLI, G. A.; PALLONE, A. S. N.; PERREIRA, V. F.; OLIVEIRA, R. G.; MARIANO, N. A.. Efeitos da nitretação por plasma com pós-oxidação e por banho de sal na resistência à corrosão de um aço ferramenta, Revista Matéria, v. 14, n.2, PP.814-823, 2009

REIS, R.F.; Elevação do teor superficial de nitrogenio no aço inoxidável austenitico ISSO 5832-1. Dissertação de Doutorado Curitiba, 2007.

SCHEID, Vladimir H. B.; ABDALLA, Antonio J.; VASCONCELOS, Getúlio. Plasma Nitrocarburizing and Laser Hardening Duplex Treatment of AISI 4340 Steel, In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON METALLURGICAL COATING AND THIN FILMS, Anais do CMCOTF-2009, San Diego, EUA, 2009.

TANG, L., GAO, C., HUANG, J. Dry sliding friction and wear behaviour of hardened AISI D2 tool steel with different hardness levels. Tribology International, v66, p.165-173, 2013.

TOMITA, Y., OKAWA, T. Effect of microstructure on mechanical properties of isothermally bainite-transformed 300M steel. *Materials Science and Engineering A*, v.172, p.145-151, 1993.

VILARES METALS. Aços para Trabalho a Frio, Ficha Técnica VD2, São Paulo, 201

APÊNDICE A – MICROGRAFIAS DAS CAMADAS NITRETADAS

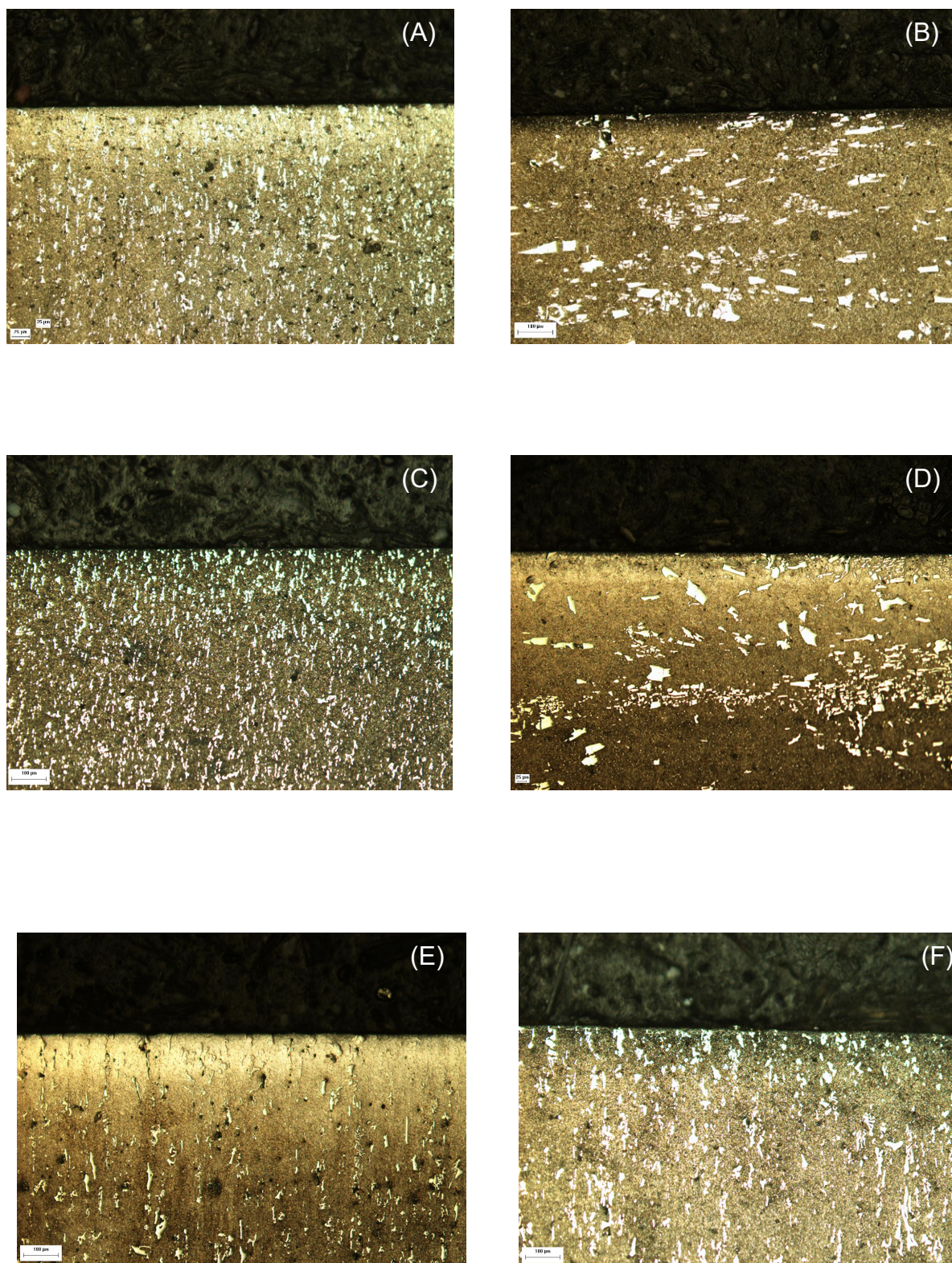


Figura 31 – Micrografias das amostras (A)T970R500, (B)T970R550, (C)T970R600, (D)1020R550, (E)T1020R600, (F)T1070R500

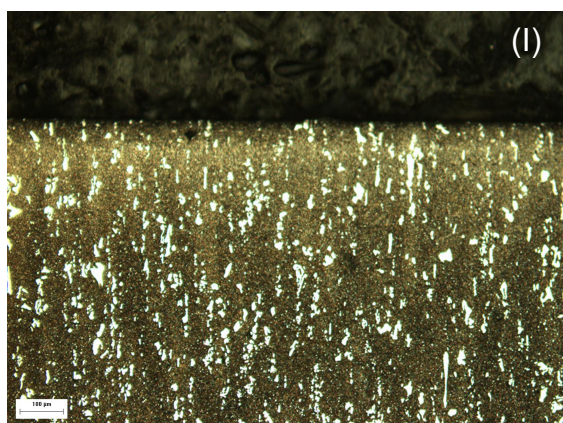
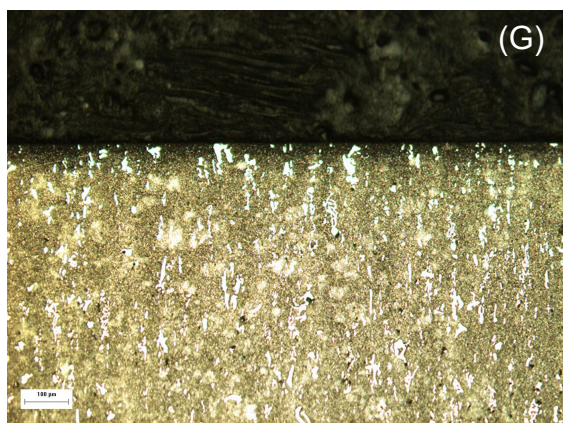


Figura 32 – Micrografia das amostras (G)T1070R500, (H)1070R550, (I)T1070R600

APÊNDICE B – DADOS COLETADOS DO INTERFERÔMETRO

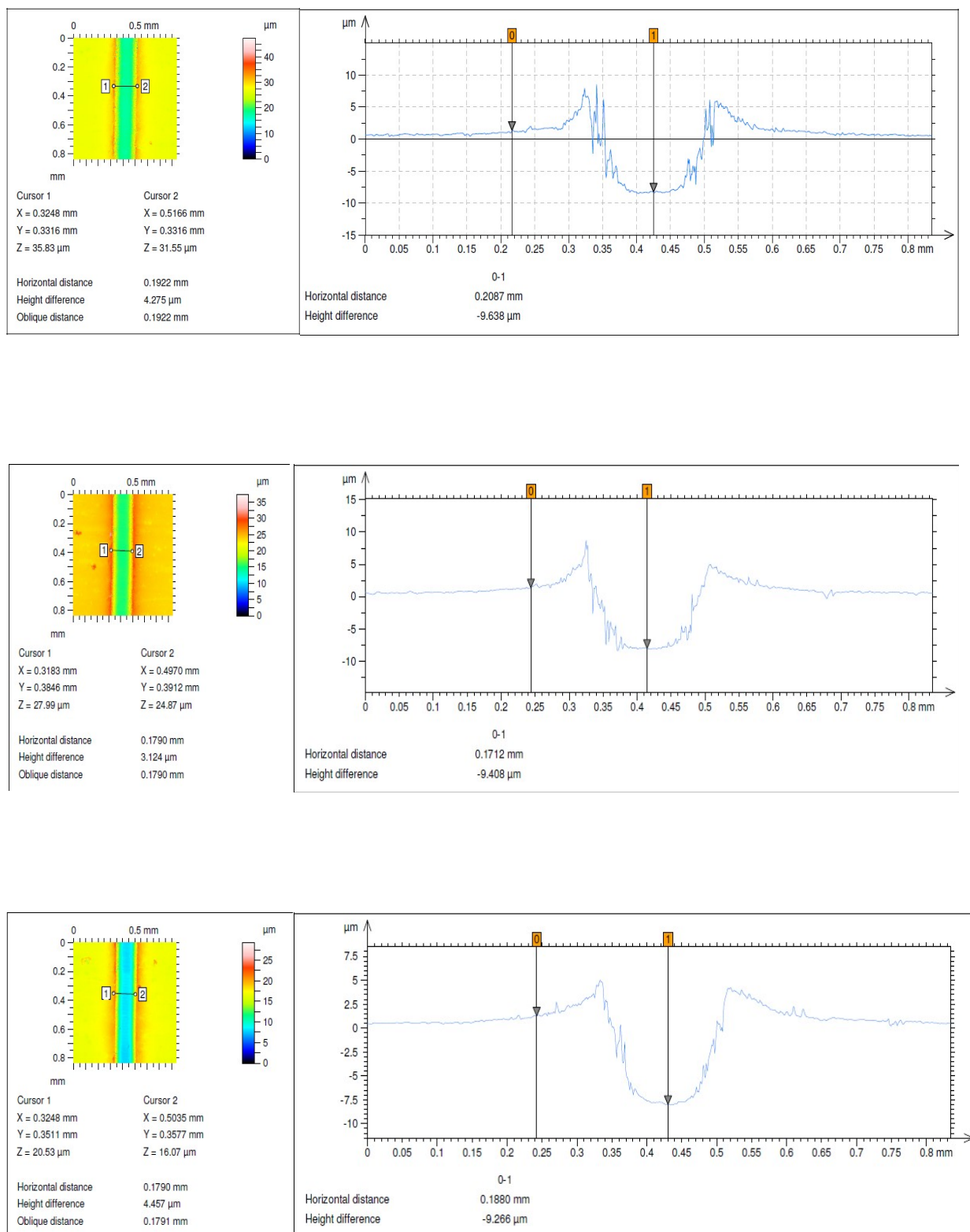


Figura 33 – Interferometria obtida para os três riscos na amostra T970 R500

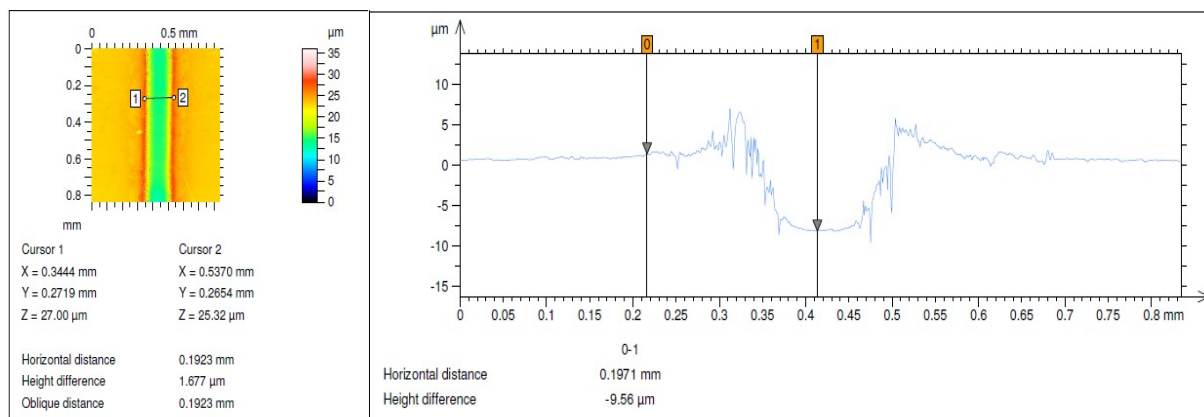
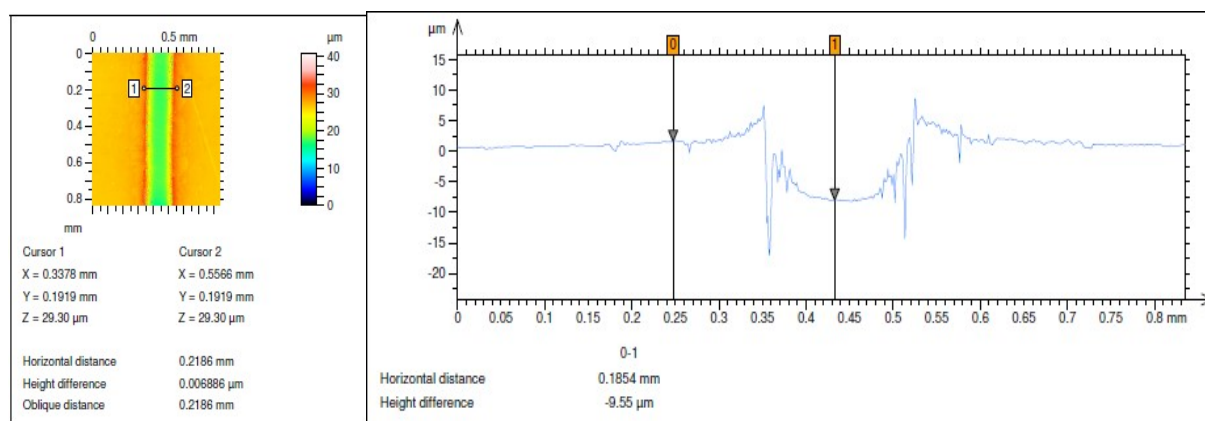
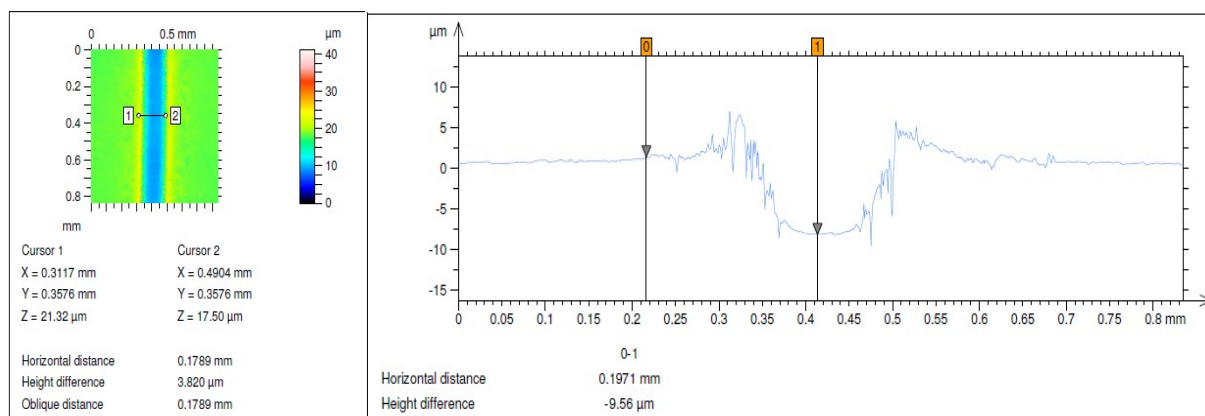


Figura 34 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T970 R550

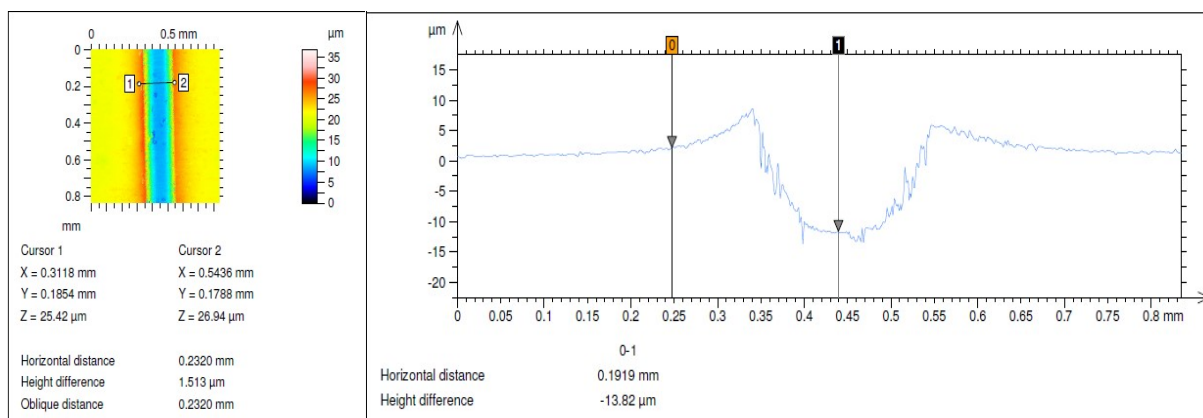
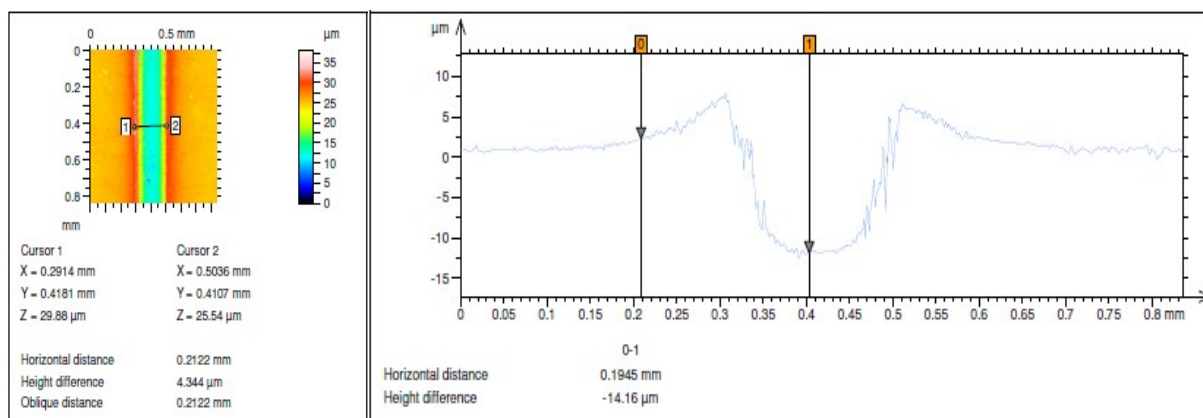
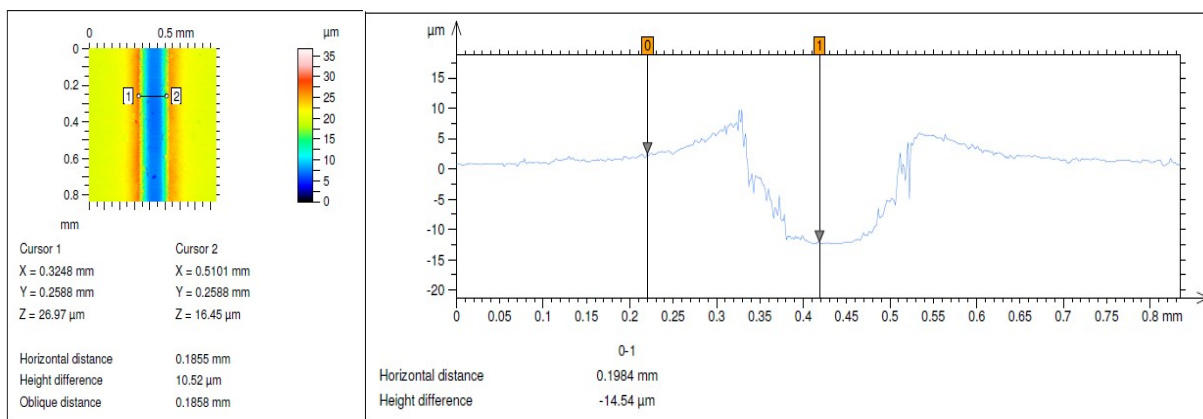


Figura 35 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T970 R600

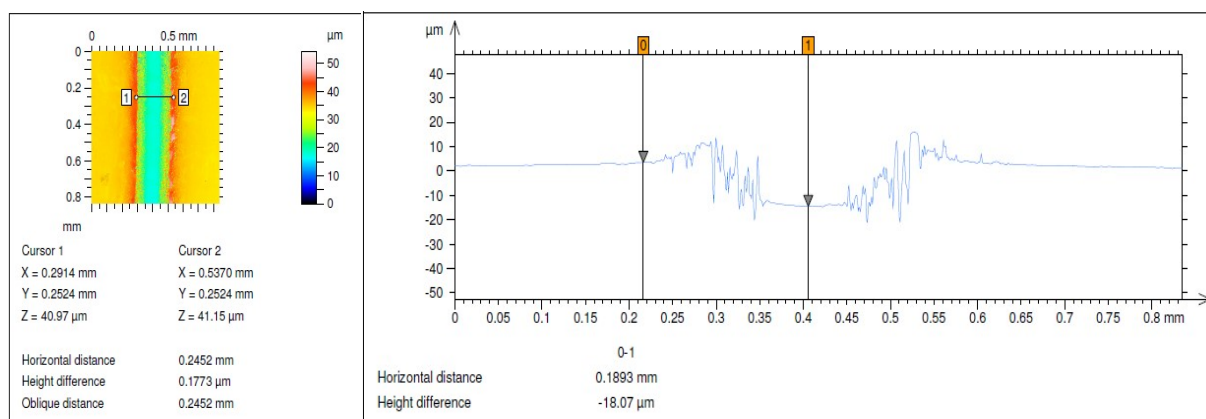
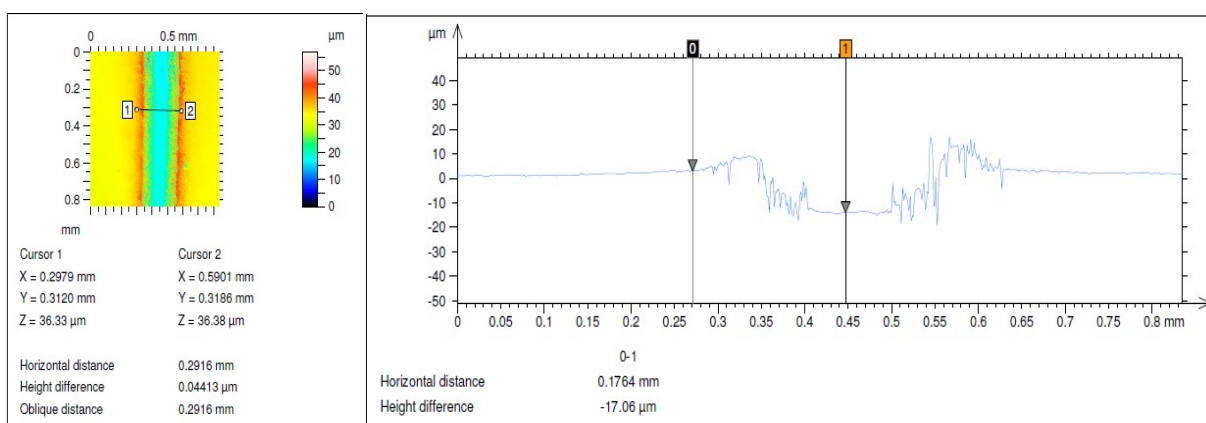
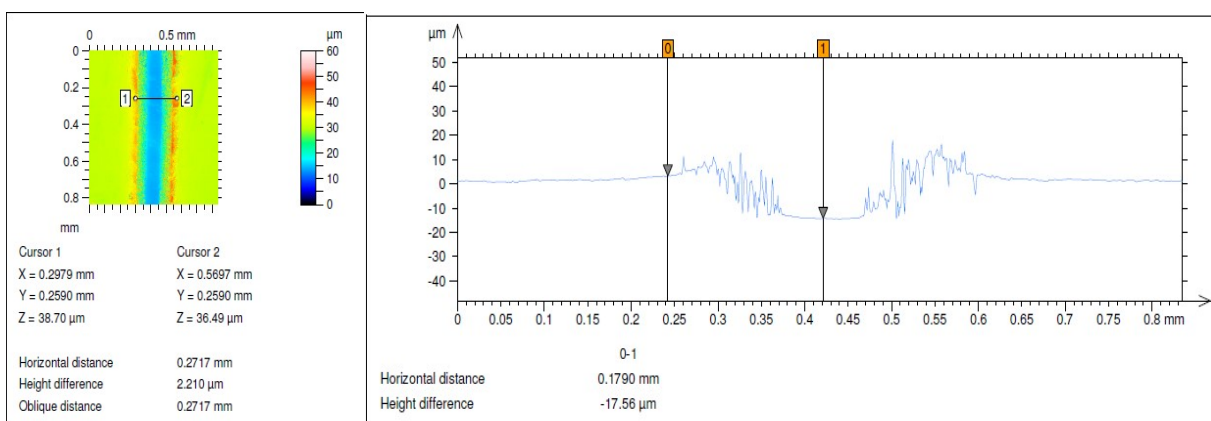


Figura 36 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T1020 R500

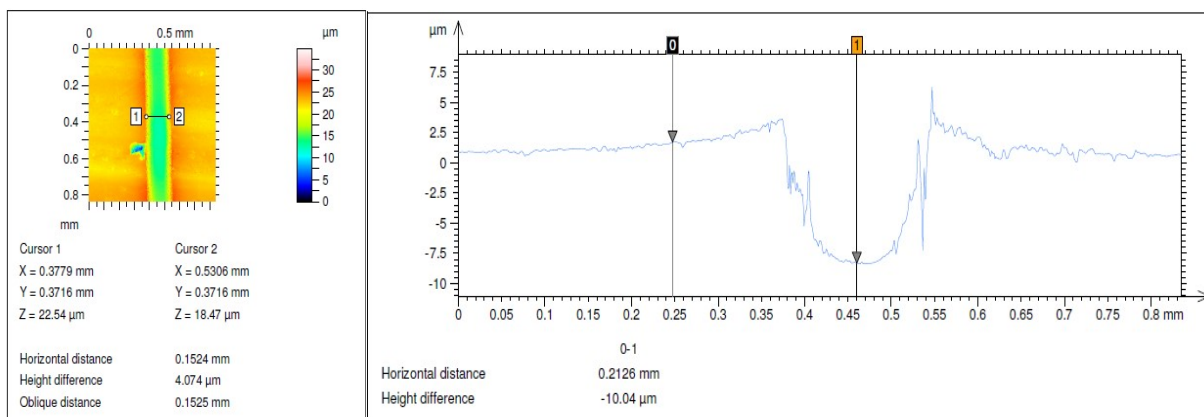
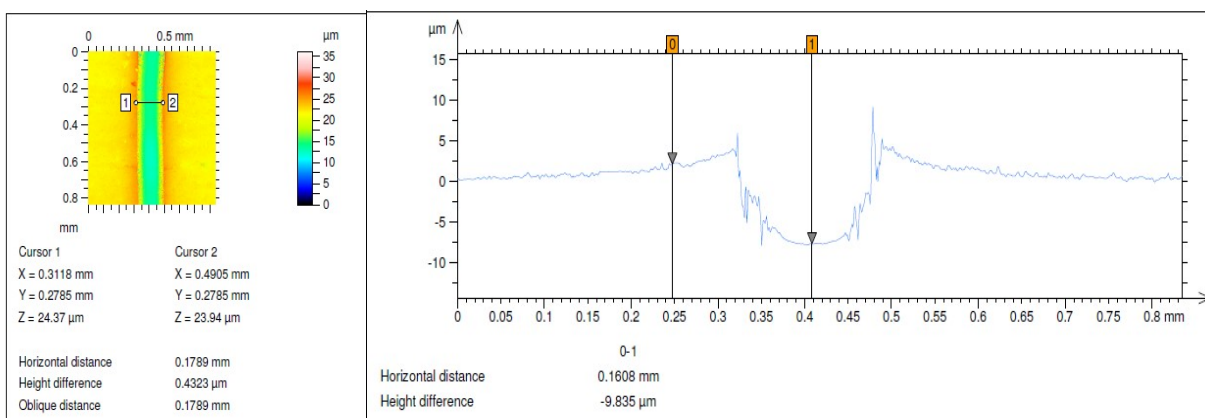
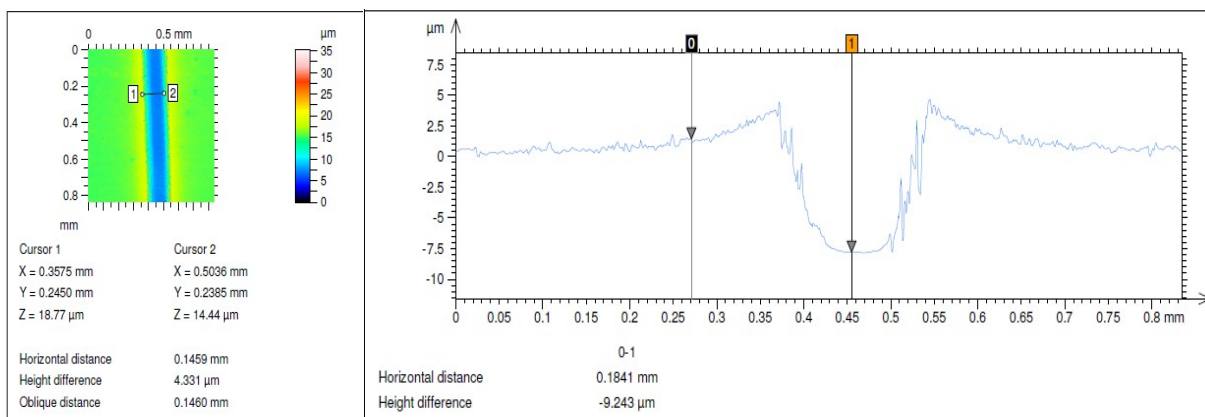


Figura 37 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T1020 R550

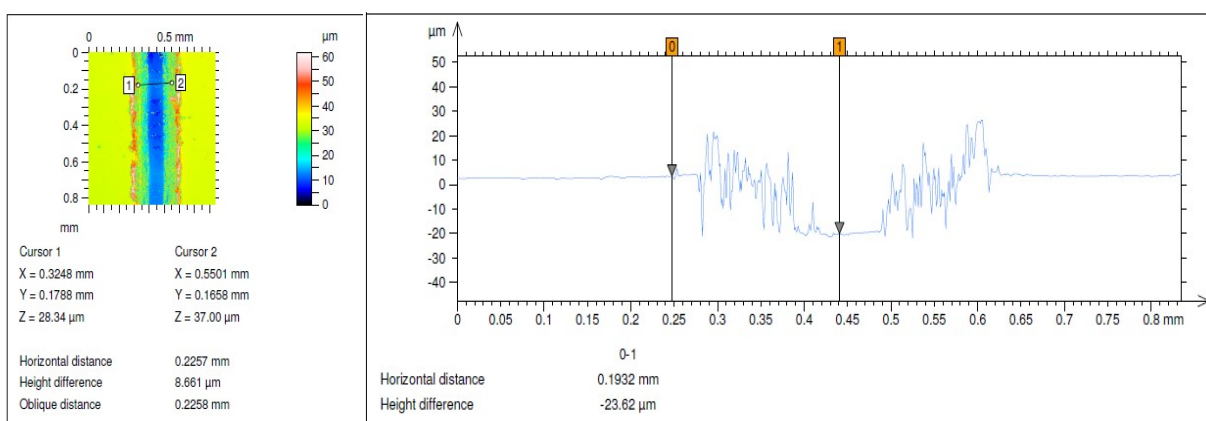
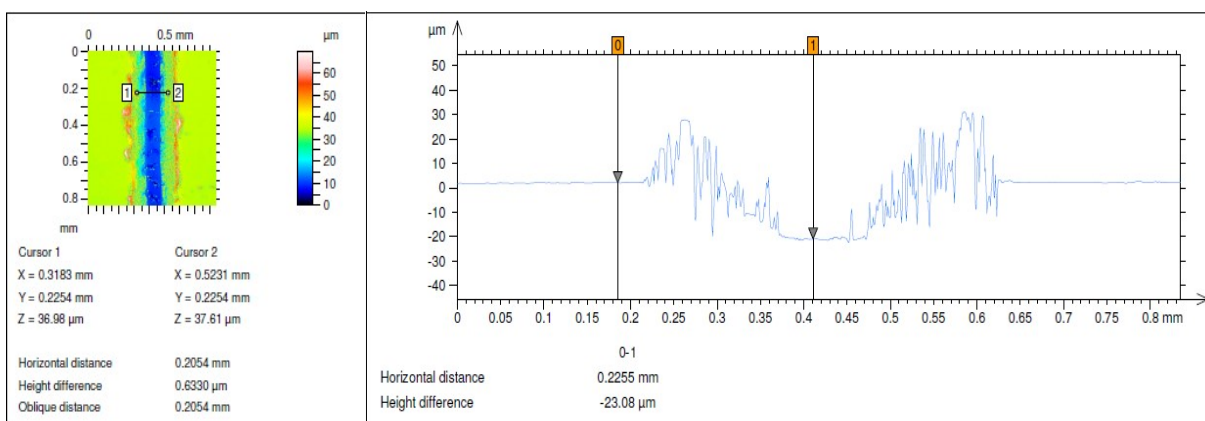
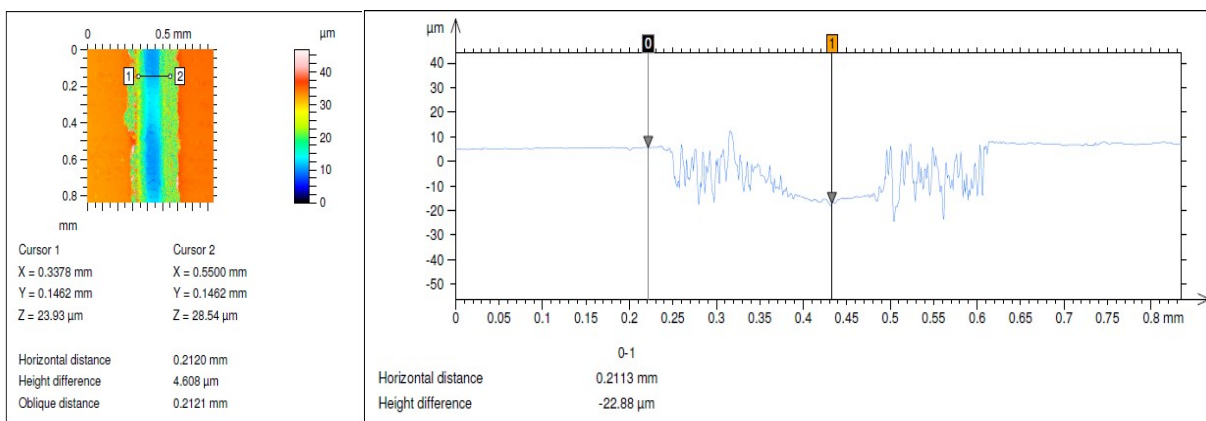


Figura 38 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T1020 R600

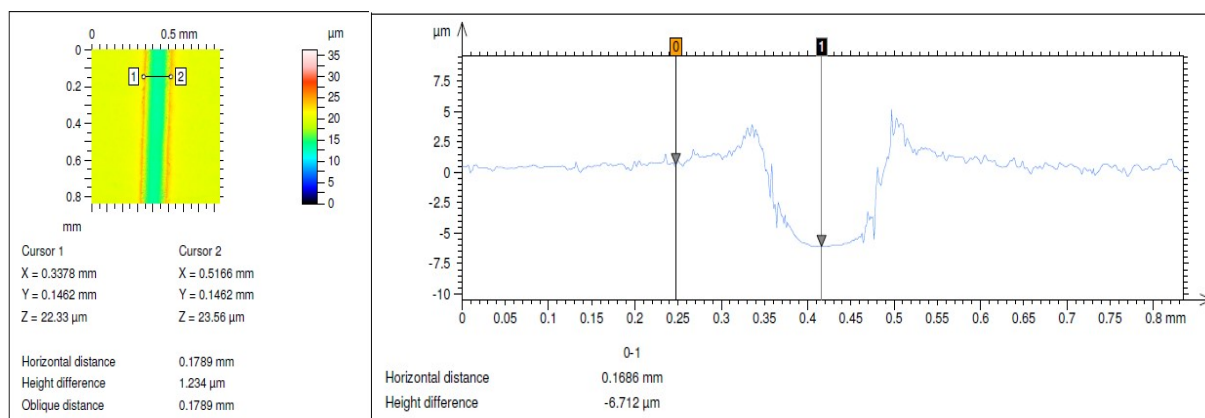
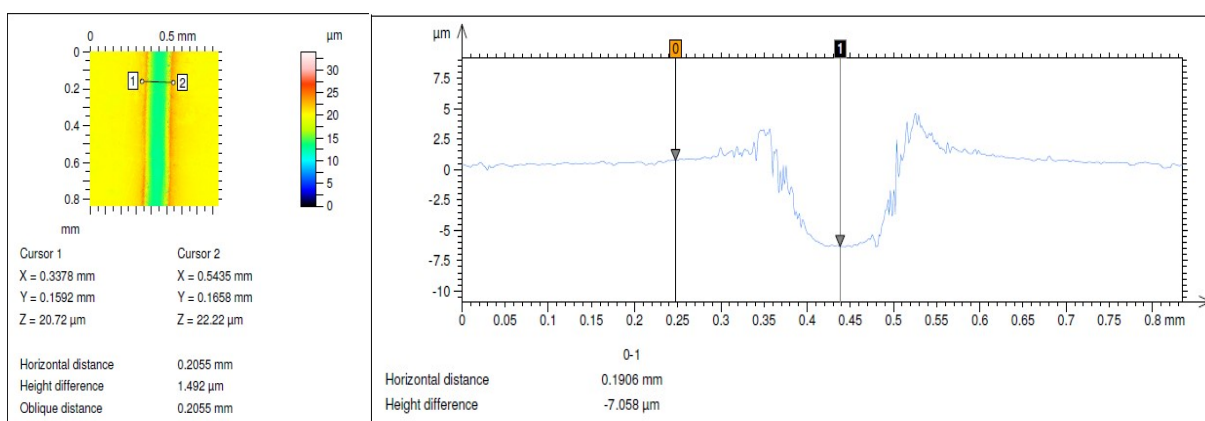
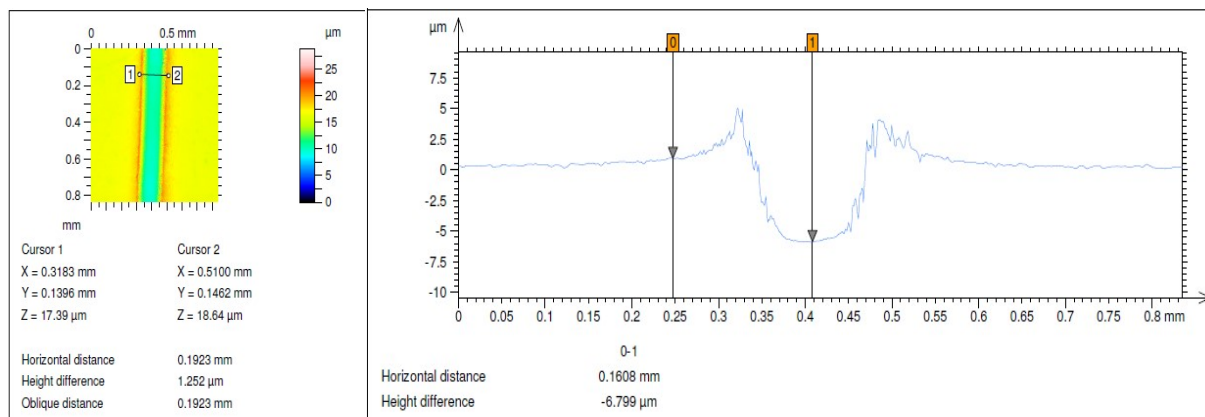


Figura 39 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T1070 R500

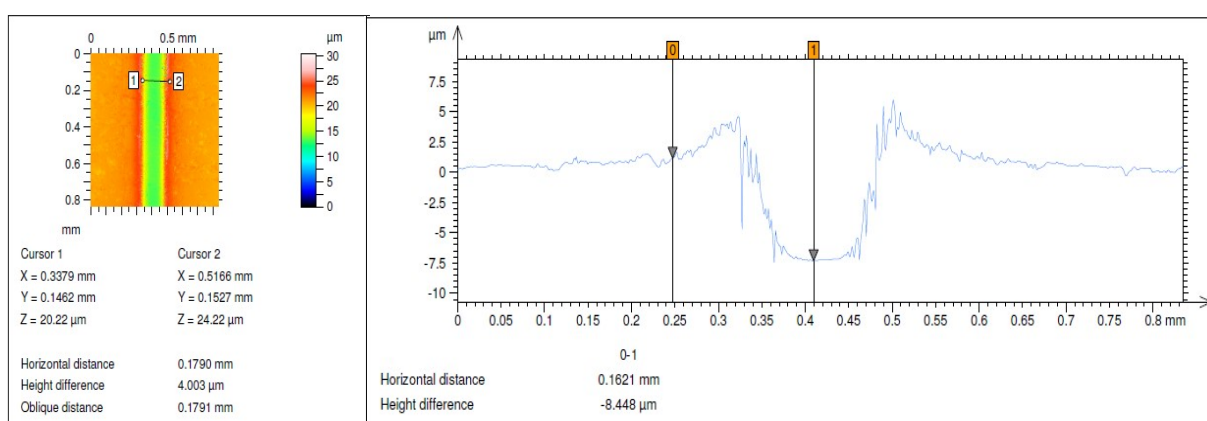
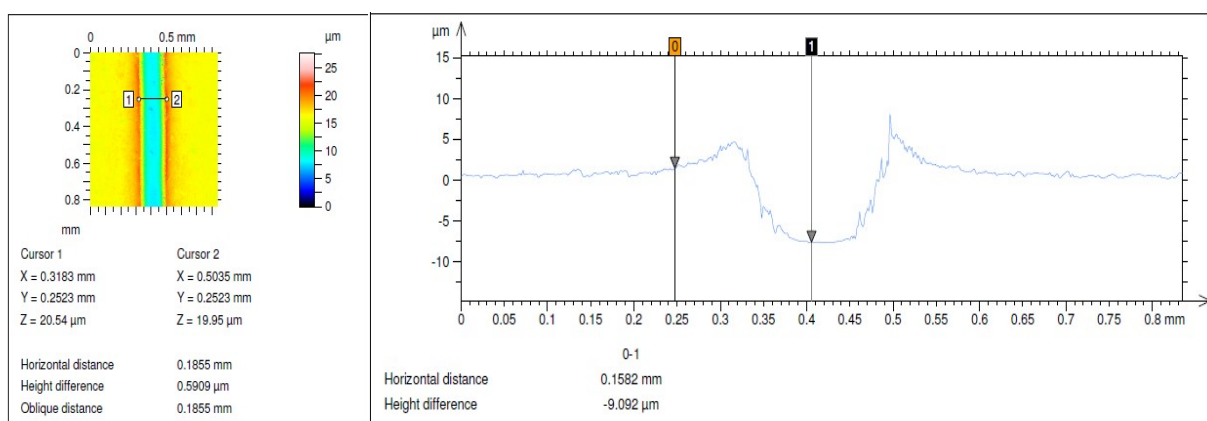
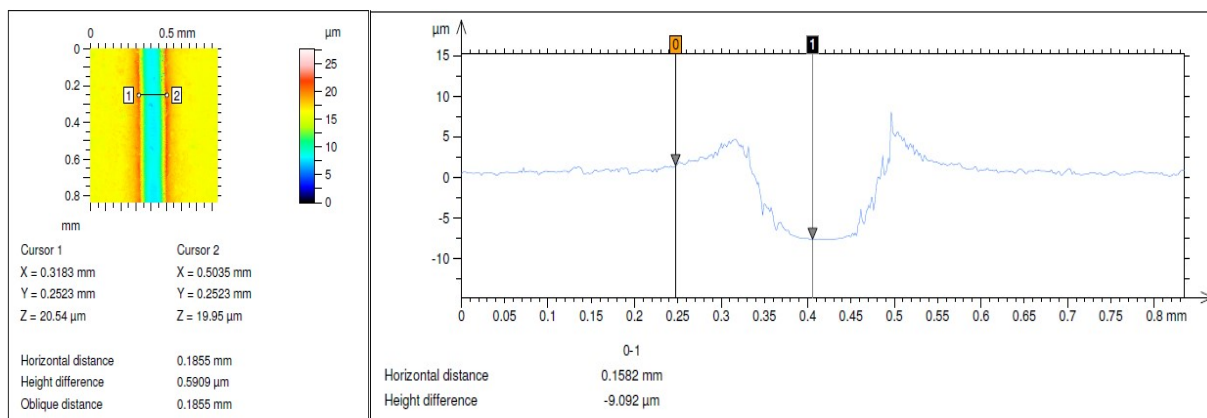


Figura 40 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T1070 R550

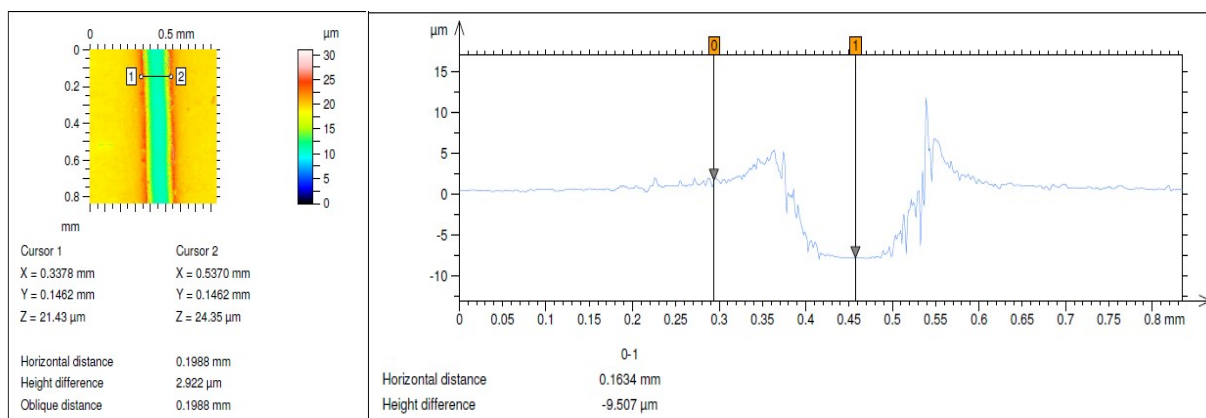
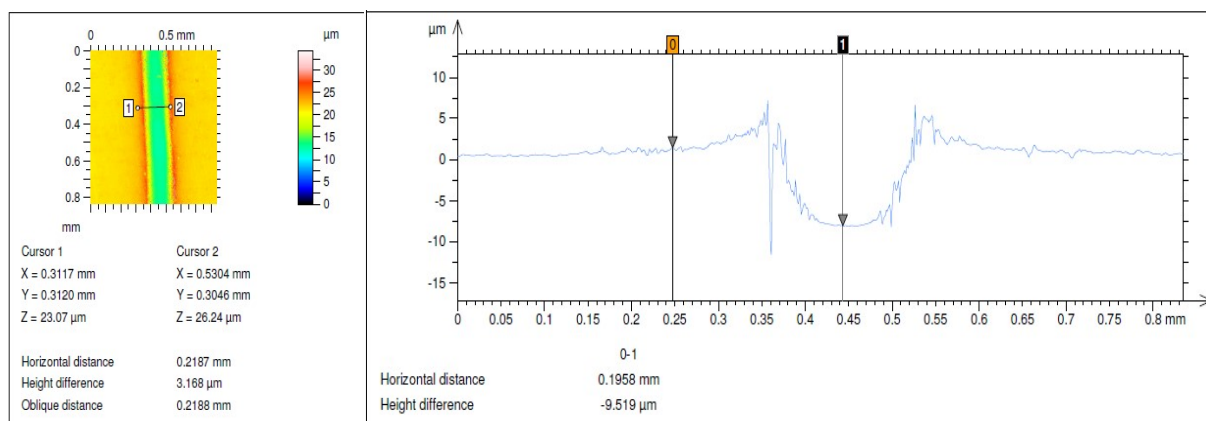
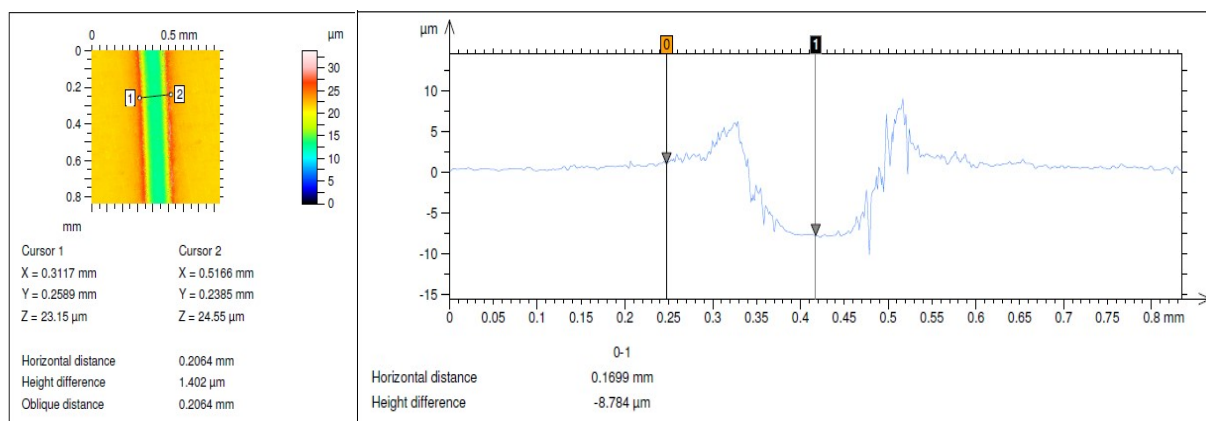


Figura 41 - Interferometria obtida para os três riscos na amostra T1070 R600.

APÊNDICE C – PERFIS DE DUREZA

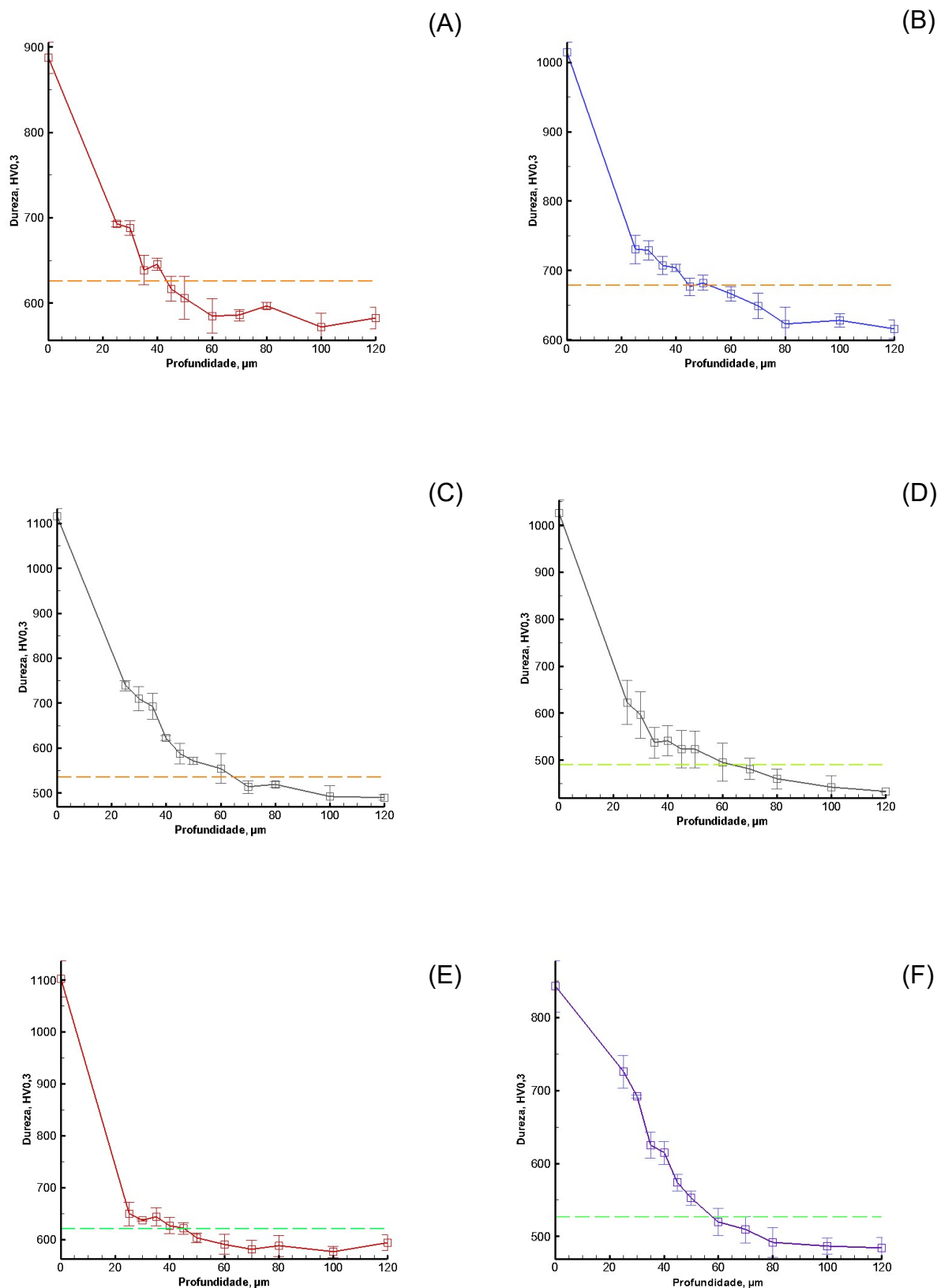
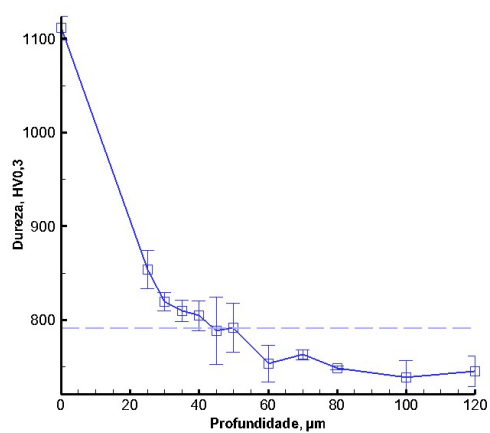
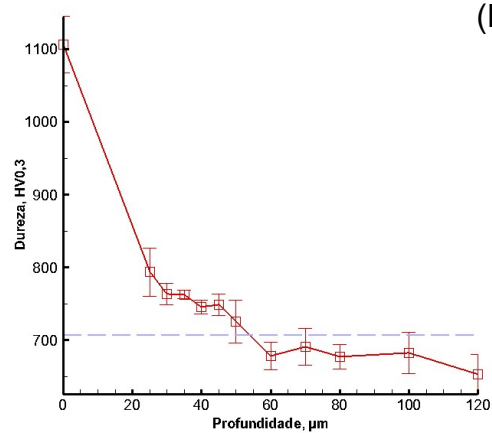


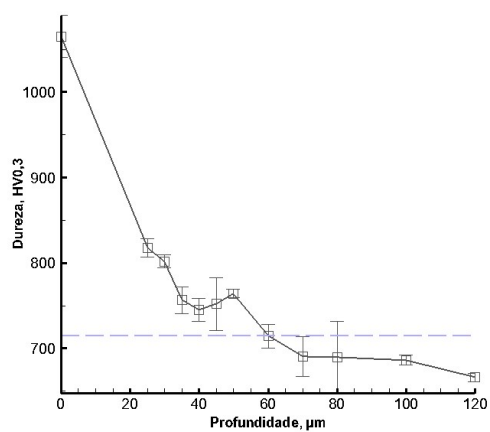
Figura 42 – Dureza em relação a profundidade de camada nitretada para as amostras (A)T970R500, (B)T970R550, (C)T970R600, (D)T1020R500, (E)T1020R550, (F)T1020R600



(G)



(H)



(I)

Figura 43 - Dureza em relação a profundidade de camada nitretada para as amostras (G)T1070R500, (H)T1070R550, (I)T1070R600

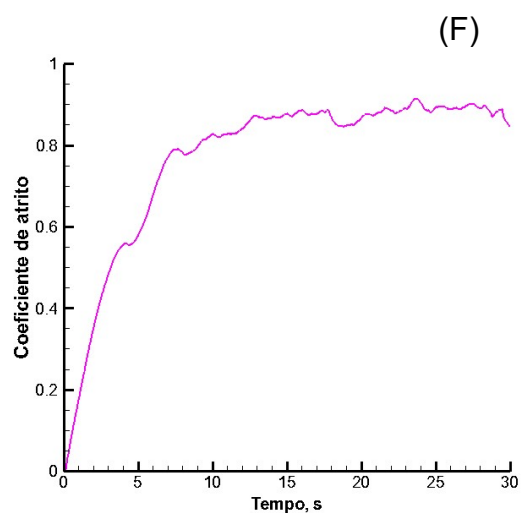
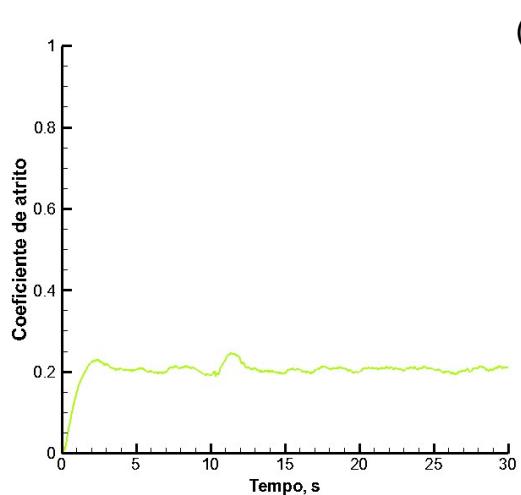
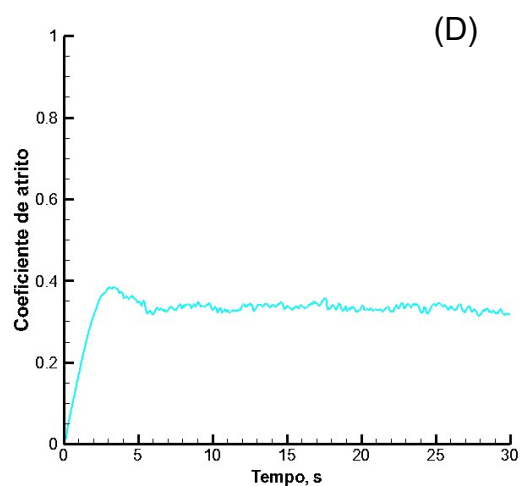
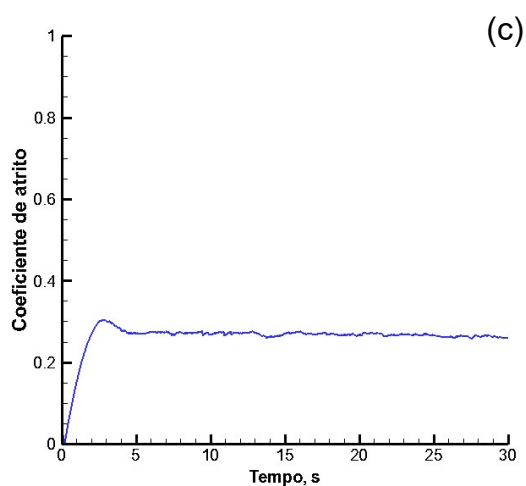
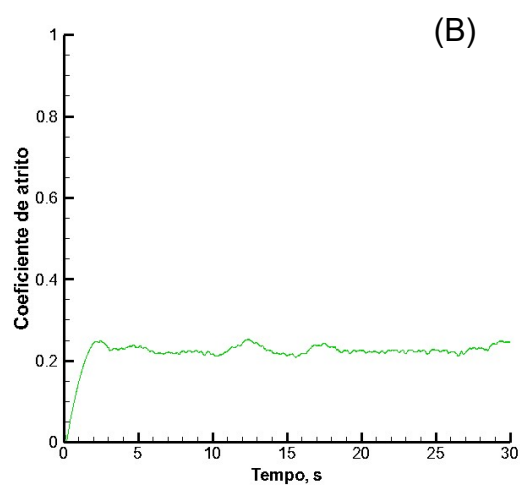
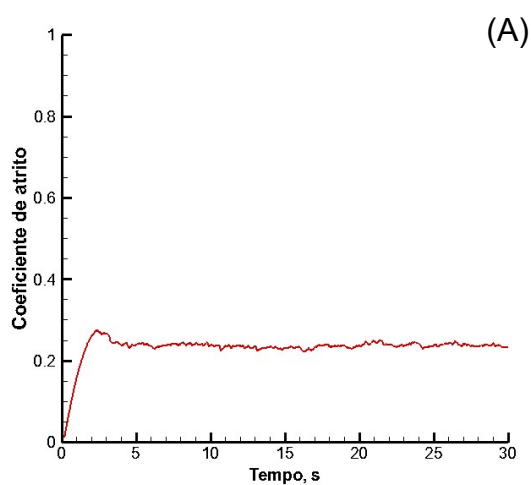


Figura 44 -- Gráfico dos COF para as amostras (A)T970R500, (B)T970R550, (C)T970R600, (D)T1020R500, (E)T1020R550, (F)T1020R600

APENDICE D - COEFICIENTES DE ATRITO

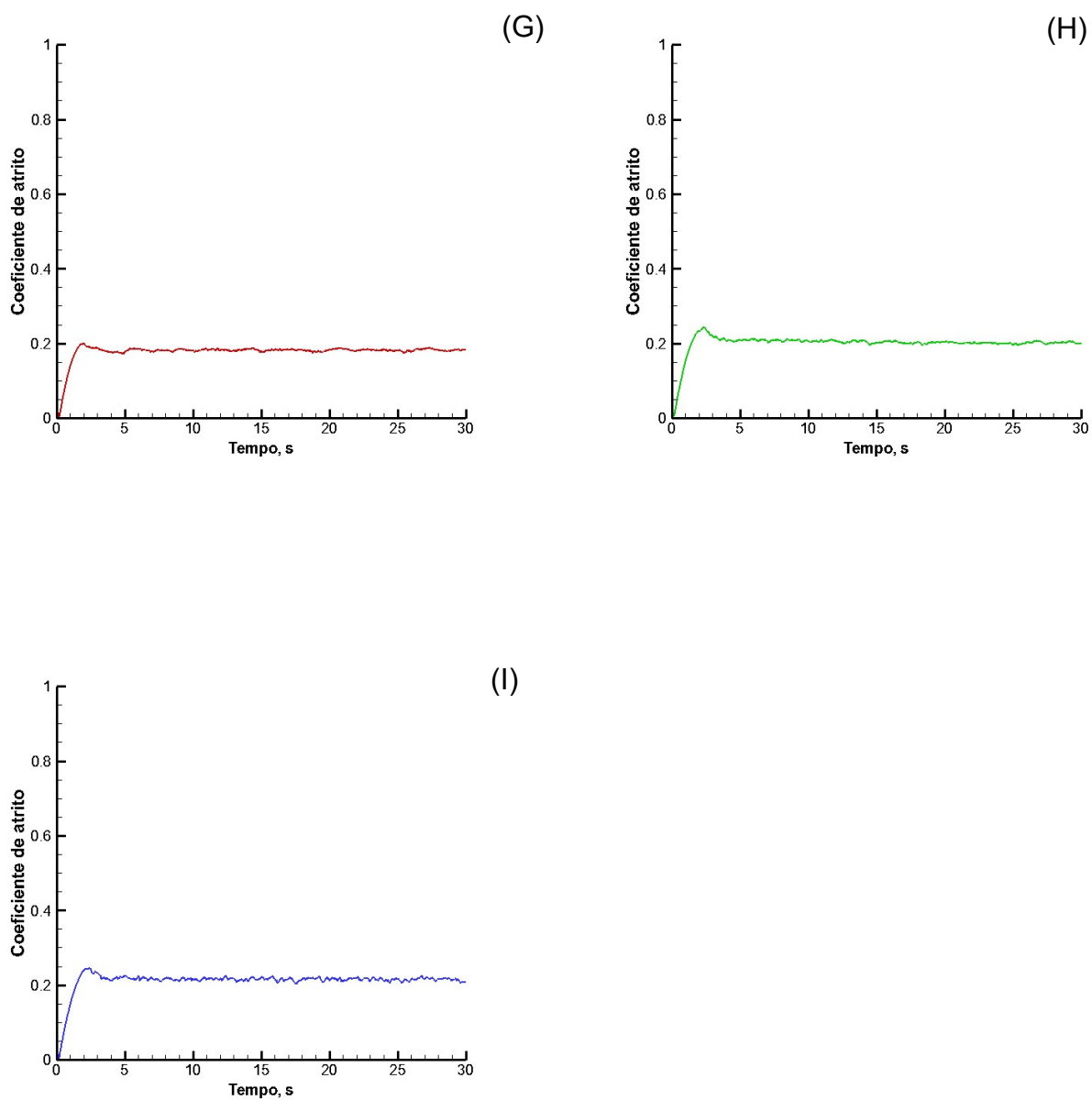


Figura 45 - - Gráfico dos COF para as amostras (G)QO70R500, (H)1070R550, (I)T1070R600,

APÊNDICE E – MICROGRAFIA DOS RISCOS

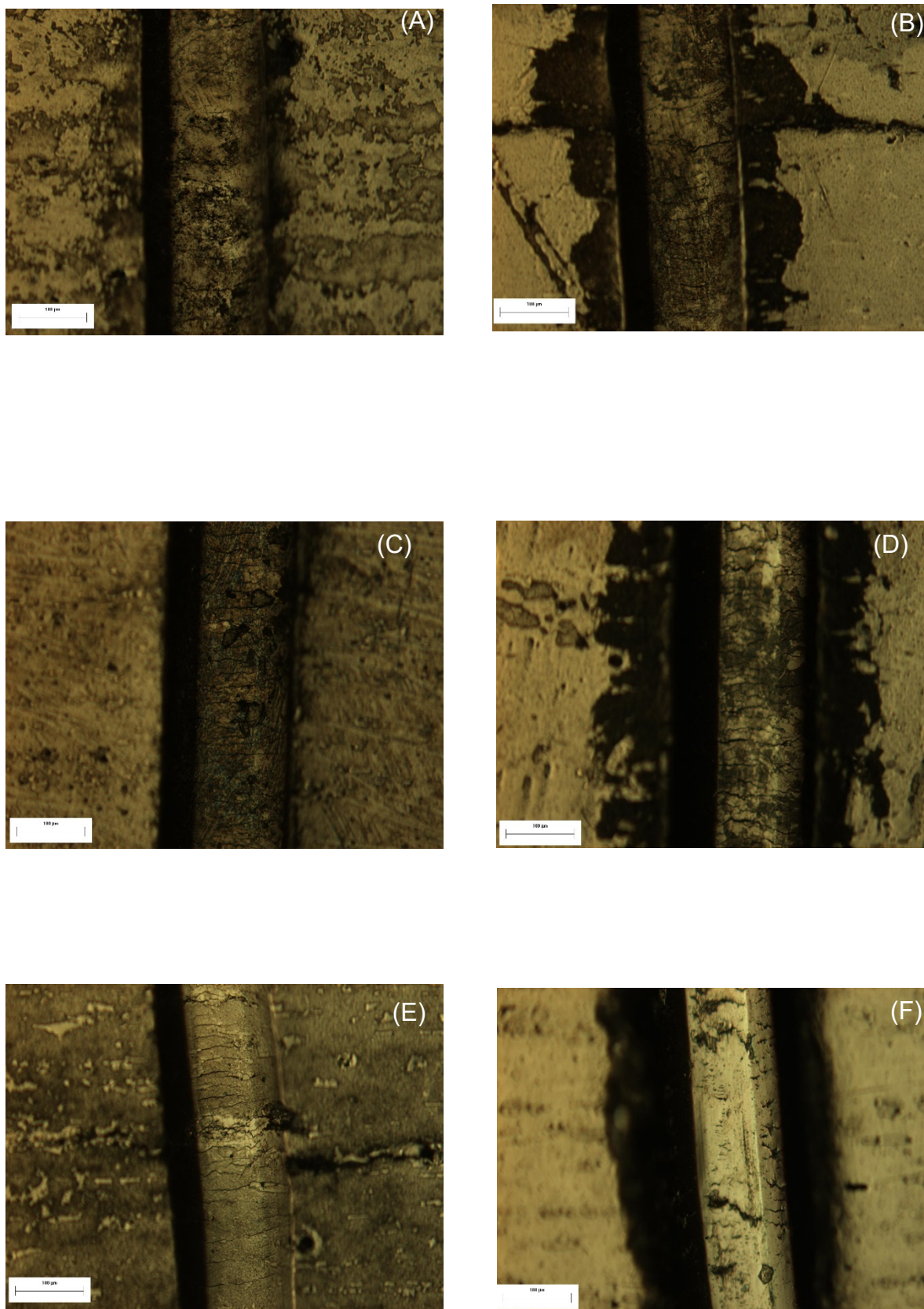


Figura 46 - Micrografias dos riscos (A)T970R500, (B)T970R550, (C)T970R600, (D)1020R550, (E)T1020R600, (F)T1070R500

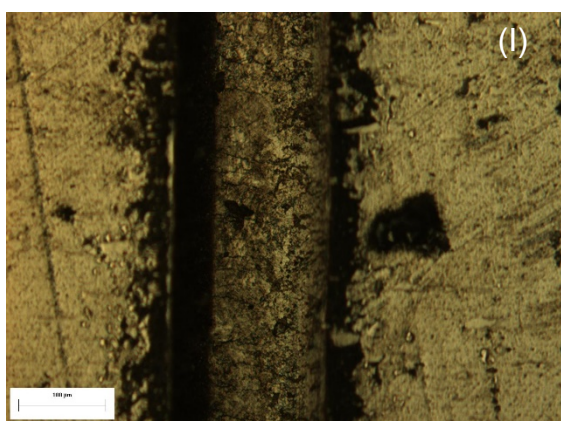
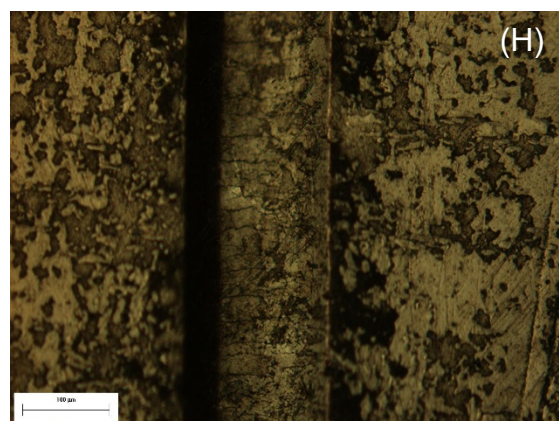
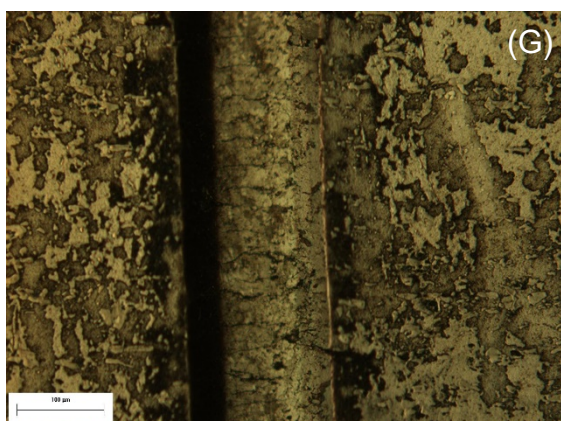


Figura 47 - Micrografias dos riscos (G)T1070R500, (H)1070R550, (I)T1070R600