UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

**COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO À ABRASÃO DOS AÇOS
AISI 4340, 4140, 5140 E 300M NITRETADOS POR PLASMA EM
DIFERENTES CONDIÇÕES**

ENGº MARCUS ALBERTO DELLA COLETTA

DEDALUS - Acervo - EESC

31100036729

Dissertação de Mestrado apresentada à área de Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

ORIENTADOR : Prof. Assoc. Dr. Luiz Carlos Casteletti

SÃO CARLOS
2000

Class.	FSC-EEEC
Cutt.	1814.
Tombo	T0214101

1199034

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Ciência e Engenharia de Materiais

Caixa Postal, 369 - CEP 13560-970 - São Carlos - SP - Brasil

Tel.: (0xx16) 273-9589 - Fax: (0xx16) 273 9777 E-mail: erica@if.sc.usp.br

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO DE *MARCUS ALBERTO DELLA COLETTA*,
APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERUNIDADES, ÁREA EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS,
DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 22/09/2000.

COMISSÃO JULGADORA:

Luiz Carlos Casteletti

Prof. Dr. **Luiz Carlos Casteletti** - EESC/USP (Orientador)

Claudemiro Bolfarini

Prof. Dr. **Claudemiro Bolfarini** - UFSCar

Tomaz Toshimi Ishikawa

Prof. Dr. **Tomaz Toshimi Ishikawa** - UFSCar

Dedico este trabalho aos meus queridos
pais Vanderlei Della Coletta e Sonia
Ferreira de Abreu.

“Pergunta o discípulo ao Buda :

Como pode existir a imortalidade ? Extingue-se acaso a atividade do espírito, e deixam de existir nossos pensamentos quando acabamos de pensar ?”

O Buda respondeu : “Destroi-se nossas faculdades de pensar, mas nossos pensamentos permanecem. Cessa o raciocínio, mas perdura o conhecimento.”

AGRADECIMENTOS

"Ter gratidão e não demonstrá-la
é como embrulhar um presente e
não entregar."

(William Arthur Ward)

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para realização deste trabalho. Em particular, agradeço :

Ao Professor Associado Dr. Luiz Carlos Casteletti pela sua valiosa orientação, apoio e confiança na realização do trabalho e na vida profissional.

Ao Professor Clodomiro Alves Júnior, pela contribuição de seus conhecimentos e apoio no trabalho.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia de Materiais pelo apoio na parte experimental do trabalho : Eliezer (Tico), João, Silvano, Alberto e Pedro.

A Eng^a Rosamel Melita Muñoz Riofano , pela seu apoio na realização deste trabalho.

À FAPESP pela concessão da Bolsa de Mestrado I e financiamento para construção do Equipamento de Nitretação por Plasma.

Agradeço em especial a minha namorada Lilian Lima Dias, pelo apoio, dedicação, estímulo, paciência e compreensão durante a realização deste trabalho.

Agradeço especialmente a Deus.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	v
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
I.INTRODUÇÃO.....	1
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
II.1. Fragilidade do Revenido.....	4
II.2. Plasma.....	5
II.3. Nitretação.....	7
II.3.1. Nitretação por Plasma	8
II.3.2. Mecanismo de Nitretação por Plasma.....	12
II.3.3. Estrutura e Propriedades das Camadas Nitretadas.....	16
II.3.4. Aplicações.....	17
II.3.5. Equipamento de Nitretação por Plasma.....	19
II.3.6. Fonte de Tensão Pulsada.....	20
II.4. Desgaste.....	21
II.4.1. Tipos de Desgaste.....	21
II.4.1.1. Desgaste Abrasivo.....	22
II.4.1.1.1. Desgaste por Microsulcamento.....	23
II.4.1.1.2. Desgaste por Micro-corte.....	24
II.4.1.1.3. Desgaste por Micro-lascamento.....	25
II.4.1.2. Fatores que afetam o desgaste abrasivo.....	26
II.4.2. Ensaio de Desgaste.....	27
III - MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
III.1 - Análise Química dos Aços.....	28
III.2. Equipamento de Nitretação por Plasma.....	28
III.3. Procedimento Experimental.....	31
III.3.1. Preparação das Amostras.....	32
III.3.2. Operação do Equipamento de Nitretação por Plasma.....	32
III.3.3. Nitretação por Plasma.....	33
III.3.4. Caracterização.....	34

III.3.4.1. Ensaio Metalográfico.....	35
III.3.4.2. Microdureza e Espessura da Camada.....	35
III.3.4.3. Ensaio de Desgaste Abrasivo.....	36
III.3.4.4. Difractometria de Raios-X.....	37
III.3.4.5. Análise por Microsonda.....	37
III.4. Metodologia para Análise dos Resultados.....	37
IV. RESULTADOS e DISCUSSÃO.....	39
IV.1. Análise Química.....	39
IV.2. Resultados de Dureza após Tratamento Térmico.....	39
IV.3. Aço AISI 4340.....	41
IV.3.1. Ensaio de Microdureza.....	41
IV.3.2. Ensaio de Desgaste Abrasivo.....	43
IV.3.3. Metalografia.....	46
IV.4. Aço AISI 4140.....	47
IV.4.1. Ensaio de Microdureza.....	47
IV.4.2. Ensaio de Desgaste Abrasivo.....	49
IV.4.3. Metalografia.....	52
IV.5. Aço AISI 5140.....	53
IV.5.1. Ensaio de Microdureza.....	53
IV.5.2. Ensaio de Desgaste Abrasivo.....	55
IV.5.3. Metalografia.....	57
IV.5.4. Ensaio de Raios-X.....	58
IV.6. Aço 300M – 550 °C.....	59
IV.6.1. Ensaio de Microdureza.....	59
IV.6.2. Ensaio de Desgaste Abrasivo.....	62
IV.6.3. Metalografia.....	64
IV.6.4. Ensaio de Raios-X.....	66
IV.6.5. Análise por Microsonda.....	68
IV.7. Aço 300M – 350 °C.....	70
IV.7.1. Ensaio de Microdureza.....	70
IV.7.2. Ensaio de Desgaste Abrasivo.....	72
IV.7.3. Ensaio de Raios-X.....	74
IV.8. Comparação entre os aços.....	75
IV.8.1. Ensaio de Microdureza.....	77

IV.8.2. Ensaio de Desgaste Abrasivo.....	83
IV.8.2.1. Amostras Nitretadas com 2 horas.....	83
IV.8.2.2. Amostras Nitretadas com 4 e 6 horas.....	84
V. CONCLUSÃO.....	87
VI. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
APÊNDICE 1 – Resultados do Ensaio de Microdureza.....	1
APÊNDICE 2 – Resultados dos Ensaio de Desgaste Abrasivo com 2 horas...	3
APÊNDICE 3 – Resultados dos Ensaio de Desgaste Abrasivo com 4 e 6 horas.....	5

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Tecnologia do plasma na indústria automobilística.....	6
Figura 02 - Diagrama de Equilíbrio Ferro-Nitrogênio.....	7
Figura 03 - Aplicações da nitretação por plasma.....	10
Figura 04 - Curva característica da voltagem X corrente entre dois eletrodos, numa descarga elétrica em gases.....	11
Figura 05 - Mecanismo de nitretação proposto por Kölbel.....	15
Figura 06 - Esquema de um equipamento de nitretação iônica.....	18
Figura 07 – Mecanismo de eliminação do arco catódico pelo plasma pulsado.....	19
Figura 08 - Interações físicas entre partículas abrasivas e a superfície dos materiais.....	22
Figura 09 – Representação esquemática de desgaste abrasivo sob força normal..	23
Figura 10 - Representação esquemática do desgaste abrasivo sob forças normal e paralela a superfície.....	24
Figura 11 - Equipamento de nitretação por plasma.....	28
Figura 12 - Fluxograma do procedimento experimental.....	30
Figura 13 - Disposição de pontos na medição de microdureza.....	34
Figura 14 - Ensaio de Microdureza do aço AISI 4340 nitretado com 2 horas.....	40
Figura 15 - Ensaio de Microdureza do aço AISI 4340 nitretado com 4 horas.....	41
Figura 16 - Ensaio de Microdureza do aço AISI 4340 nitretado com 6 horas.....	41
Figura 17 - Ensaio de Desgaste Abrasivo do aço AISI 4340 nitretado com 2h.....	43
Figura 18 - Ensaio de Desgaste Abrasivo do aço AISI 4340 nitretado com 4h.....	43
Figura 19 - Ensaio de Desgaste Abrasivo do aço AISI 4340 nitretado com 6h.....	44
Figura 20 - Micrografia do aço 4340 nitretado com 6 horas, CC à 550°C.....	45
Figura 21 - Ensaio de Microdureza do aço 4140 nitretado com 2 horas.....	46
Figura 22 - Ensaio de Microdureza do aço 4140 nitretado com 4 horas.....	47
Figura 23 - Ensaio de Microdureza do aço 4140 nitretado com 6 horas.....	47
Figura 24 - Ensaio de Desgaste Abrasivo do aço AISI 4140 nitretado com 2h.....	49
Figura 25 - Ensaio de Desgaste Abrasivo do aço AISI 4140 nitretado com 4h.....	49
Figura 26 - Ensaio de Desgaste Abrasivo do aço AISI 4140 nitretado com 6h.....	50
Figura 27 - Micrografia do aço 4140 nitretado com 4 horas, 2 KHz à 550°C.....	51
Figura 28 - Ensaio de Microdureza do aço AISI 5140 nitretado com 2 horas.....	52
Figura 29 - Ensaio de Microdureza do aço AISI 5140 nitretado com 4 horas.....	53
Figura 30 - Ensaio de Microdureza do aço AISI 5140 nitretado com 6 horas.....	53

Figura 31 - Ensaio de Desgaste Abrasivo do aço AISI 5140 nitretado com 2h.....	55
Figura 32 - Ensaio de Desgaste Abrasivo do aço AISI 5140 nitretado com 4h.....	55
Figura 33 - Ensaio de Desgaste Abrasivo do aço AISI 5140 nitretado com 6h.....	56
Figura 34 - Micrografia do aço 5140 nitretado com 2 horas em CC.....	57
Figura 35 - Ensaio de Raios-X do aço AISI 5140 nitretado com 2h – CC.....	57
Figura 36 - Ensaio de Microdureza do aço 300M nitretado com 2 horas - 550 °C...	59
Figura 37 - Ensaio de Microdureza do aço 300M nitretado com 4 horas - 550 °C...	59
Figura 38 - Ensaio de Microdureza do aço 300M nitretado com 6 horas - 550 °C...	60
Figura 39 - Ensaio de Desgaste Abrasivo do aço 300M nitretado em 2h à 550 °C..	61
Figura 40 - Ensaio de Desgaste Abrasivo do aço 300M nitretado em 4h à 550 °C..	62
Figura 41 - Ensaio de Desgaste Abrasivo do aço 300M nitretado em 6h à 550 °C..	62
Figura 42 - Micrografia do aço 300M nitretado com 4 horas, 10 KHz à 550°C.....	63
Figura 43 - Micrografia do aço 300M nitretado com 6 horas, CC à 550°C....	64
Figura 44 - Micrografia do aço 300M nitretado com 4 horas, 10 KHz à 550°C.....	64
Figura 45 - Micrografia do aço 300M nitretado com 6 horas, CC à 550°C.....	65
Figura 46 - Ensaio de Raios-X do aço 300M nitretado com 6h - CC – 550°C.....	66
Figura 47 - Ensaio de Raios X do aço 300M nitretado com 4h – 10 KHz – 550°C...	66
Figura 48 - Imagem ilustrando a região percorrida pela microsonda na camada nitretada.....	67
Figura 49 - Perfis de concentração obtidos para o Níquel, Ferro, Cromo, Silício e Nitrogênio nas camadas nitretadas.....	68
Figura 50 - Ensaio de Microdureza do aço 300M nitretado em 2 horas - 350 °C.....	69
Figura 51 - Ensaio de Microdureza do aço 300M nitretado em 4 horas - 350 °C.....	70
Figura 52 - Ensaio de Microdureza do aço 300M nitretado em 6 horas - 350 °C.....	70
Figura 53 - Ensaio de Desgaste Abrasivo do aço 300M nitretado em 2h à 350 °C..	71
Figura 54 - Ensaio de Desgaste Abrasivo do aço 300M nitretado em 4h à 350 °C..	72
Figura 55 - Ensaio de Desgaste Abrasivo do aço 300M nitretado em 6h à 350 °C..	72
Figura 56 - Ensaio de Raios X do aço 300M nitretado com 6h – CC – 350°C.....	73
Figura 57 - Variação da espessura da camada composta com o tempo de tratamento.....	75
Figura 58 - Ensaio de Microdureza do aços nitretado em 10 KHz e 2 horas.....	76
Figura 59 - Ensaio de Microdureza do aços nitretado em 10 KHz e 4 horas.....	77
Figura 60 - Ensaio de Microdureza do aços nitretado em 10 KHz e 6 horas.....	77
Figura 61 - Ensaio de Microdureza do aços nitretado em 2 KHz e 2 horas.....	78
Figura 62 - Ensaio de Microdureza do aços nitretado em 2 KHz e 4 horas.....	78

Figura 63 - Ensaio de Microdureza do aços nitretado em 2 KHz e 6 horas.....	79
Figura 64 - Ensaio de Microdureza do aços nitretado em CC e 2 horas.....	79
Figura 65 - Ensaio de Microdureza do aços nitretado em CC e 4 horas.....	80
Figura 66 - Ensaio de Microdureza do aços nitretado em CC e 6 horas.....	80
Figura 67 - Perda de Massa Total para as amostras nitretadas com 2 horas	82
Figura 68 - Perda de Massa Total para as amostras nitretadas com 4 horas.....	83
Figura 69 - Perda de Massa Total para as amostras nitretadas com 6 horas.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Material e tipo de camada indicada para cada tipo de desgaste.....	17
Tabela 2 - Composição química nominal dos aços AISI 4340, 4140, 5140 e 300 M (% em peso).....	27
Tabela 3 - Condições de tratamento utilizadas.....	33
Tabela 4 - Resultados das análises químicas dos aços AISI 4340, 4140, 5140 e 300M.....	38
Tabela 5 - Valores de Dureza após Tratamento Térmico.....	39
Tabela 6 – Espessura camada branca para o Aço 4340.....	42
Tabela 7 – Espessura camada branca para o Aço 4140.....	48
Tabela 8 – Espessura camada branca para o Aço 5140.....	54
Tabela 9 – Espessura camada branca para o Aço 300M – 550 °C.....	60
Tabela 10 – Valores de espessura de camada branca, máxima dureza superficial e dureza de núcleo.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	American Iron Steel Institute
ASTM	American Society of Testing Materials
aC	Corrente alternada
dC	Corrente contínua
CC	Corrente contínua
CFC	Cúbica de face centrada
CVD	Chemical Vacuum Deposition
DIN	Deutsches Institut für Normung
HCP	Hexagonal compacta
JIS	Japanese International Standard
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NF	Não formou
PIB	Produto Interno Bruto
PVD	Plasma Vacuum Deposition
rpm	rotações por minuto
SiC	Carbeto de silício
STLE	Sociedade dos Engenheiros de Tribologia e Lubrificantes
TE	Tempering Embrittlement
TME	Martensite Tempering Embrittlement

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	fase épsilon
γ'	fase gama linha
λ	comprimento de onda
δ	ciclo de trabalho
θ	ângulo de varredura
f	frequência
Δm	perda de massa
M_i	massa inicial
M_f	massa final
t_{on}	tempo ligado
t_{off}	tempo desligado
μm	micrometro
e^-	elétron
F_N	Força normal
F_p^1	Força paralela à superfície desgastada
S_a	resistência a fratura da partícula abrasiva
P_m	resistência mecânica da superfície indentada
G^0	átomo ou molécula no estado fundamental
G^+	representa um íon gasoso
N_2^+	Íon molecular de nitrogênio
H_2^+	Íon molecular de hidrogênio
Hz	Hertz
HV	Dureza Vickers
KHz	Kilohertz
Kgf	kilograma-força
mA/cm^2	miliâmpere por centímetro quadrado
mm	milímetros
m^3	metro cúbico
g	gramas
KVA	Kilovolt-ampère
V	Volts
V_b	Tensão de ruptura
$V_{b \text{ mín}}$	Tensão de ruptura mínima

RESUMO

COLETTA, M. A. D. (2000). Comparação do desempenho à abrasão dos aços AISI 4340, 4140, 5140 E 300M nitretados por plasma em diferentes condições. São Carlos, 2000. 91p.

Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Os aços de ultra-alta-resistência com médio carbono e baixa liga apresentam excelentes propriedades de resistência mecânica e à fadiga além de uma elevada temperabilidade. No entanto, tais aços apresentam o fenômeno da fragilidade do revenido, o que limita as faixas de temperatura de tratamentos pós-têmpera ou de tratamentos superficiais. O aço 300M foi desenvolvido visando a ampliação desta faixa, permitindo tratamentos em temperaturas em torno de 350 °C, viabilizando o emprego da técnica de nitretação do mesmo por plasma sem a consequente fragilização.

Neste trabalho comparou-se as características e propriedades das camadas nitretadas do aço 300M nitretado por plasma à 350 °C e 550 °C com os aços de alta-resistência AISI 4340, 4140 e 5140 nitretados à 550 °C. Variou-se as condições de tratamento de forma a verificar a influência do tempo de nitretação e da frequência de pulso nas camadas nitretadas.

Verificou-se que a nitretação por plasma demonstrou ser bastante efetiva para conferir resistência ao desgaste abrasivo para todos os aços nitretados. O aço 300M nitretado em 350 °C apresentou no ensaio de desgaste abrasivo comportamento similar aos demais aços nitretados em 550 °C, enquanto que o melhor resultado geral foi alcançado pelo 300M nitretado à 550 °C em CC durante 6 horas, devido a formação de uma camada composta dupla de elevada dureza e espessura.

Palavras-Chave : Nitretação, Plasma, Aços, Nitretação Iônica

ABSTRACT

COLETTA, M. A. D. (2000). Comparison of performance of AISI 4340, 4140, 5140 and 300M steels nitrited by plasma in different conditions. São Carlos, 2000. 91 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The ultra-high-strength steels with medium carbon and low alloy, like AISI 4340, show excellent tensile strength and fatigue properties further higher hardenability. However, these steels have the phenomenon of tempering embrittlement, that restrict the temperature of treatments after quench or surfaces treatments. The 300M steel was developed aiming the enlargement this area of application, this steel permits treatments in temperatures about 350 °C. what allowed to use the plasma nitriding without problems with the embrittlement.

In this production were compared the properties of the nitrited layers of the 300M nitriding by plasma in 350 °C and 550 °C with the steels AISI 4340, AISI 4140, AISI 5140 nitriding in 550 °C. Plasma nitriding conditions like time and pulse frequency were varied.

It was checked that the plasma nitriding showed good performance to improve the resistance to the abrasive wear in all the steels tested. The 300M steel nitrited in 350 °C showed results similar to the others in the pin-on-disk test and the better result occurred to the 300M steel nitrited in 550 °C in dC plasma during 6 hours, because of a double compound lawyer that arouse with a high thickness and high hardness.

Keywords : plasma, nitriding, steels, ion nitriding

I – INTRODUÇÃO

Atualmente, devido ao grande avanço tecnológico, os materiais estão sendo submetidos a aplicações cada vez mais severas, além de que, aspectos relacionados com segurança e preservação do meio ambiente tomaram-se uma exigência.

Desta forma, há uma crescente demanda por materiais que possuam combinadas excelentes propriedades de resistência mecânica, resistência ao desgaste e à corrosão aliada a uma boa fabricabilidade, um baixo custo e preferencialmente que sejam recicláveis.

Os gastos com desgaste de materiais aumentam a cada ano sendo importante a realização de pesquisas nesta área. Em países como EUA os gastos com reparos e manutenção de equipamentos devido ao desgaste chega a 1,6 % do PIB e na Alemanha a 4,5 % do PIB (KRIM, 1996).

Os aços de ultra-alta-resistência, com médio carbono e baixa liga, apresentam limites de escoamentos superiores a 1400 MPa, além de uma elevada temperabilidade. Tais aços são particularmente adequados em aplicações onde uma elevada relação resistência/peso seja fundamental, a exemplo das indústrias aeronáuticas e espaciais (PICKERING, 1978). No entanto, estes aços apresentam o fenômeno da Fragilidade do Revenido, o que limita as faixas de temperatura de tratamentos pós-têmpera ou tratamentos superficiais. O aço 300M foi desenvolvido visando a ampliação desta faixa, permitindo tratamentos em temperaturas em torno de 350 °C, o que viabilizou a utilização da técnica de Nitretação por Plasma no mesmo. O aço 300M pode apresentar então, além de uma elevada resistência mecânica e excelente temperabilidade, boas propriedades de resistência ao desgaste e à corrosão.

A técnica de nitretação por plasma ou nitretação iônica é bastante utilizada na Europa no tratamento de componentes automotivos, matrizes de extrusão, matrizes de estampagem, etc. No Brasil a técnica ainda não é muito difundida, representando um grande potencial de desenvolvimento. A grande perspectiva do crescimento da indústria automobilística no Brasil vem de encontro ao desenvolvimento da nitretação por plasma no país e a gradativa instalação de novas unidades. Sendo assim, faz-se

necessário a formação de mão-de-obra especializada e de grupos de trabalho entre universidades e empresas para que a técnica possa ser difundida.

O objetivo deste trabalho foi comparar características e propriedades das camadas nitretadas dos aços de alta-resistência AISI 4340, AISI 4140 e AISI 5140, nitretados por plasma em fonte de tensão pulsada à 550 °C, com o aço 300M nitretado à 350 e 550 °C. Variou-se as condições de tratamento de forma a verificar a influência da frequência de pulso e do tempo de nitretação nas camadas nitretadas.

II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1 - Fragilidade do Revenido

Aços de alta resistência temperados e revenidos são suscetíveis a diferentes tipos de fragilidade. Alguns mecanismos de fragilidade são decorrentes das mudanças estruturais que acontecem durante o revenimento. Outros referem-se as interações do ambiente com a microestrutura temperada e revenida, a exemplo do que ocorre na presença de hidrogênio (RITCHIE, et al 1978).

Os dois tipos principais de fragilidades devidos a mudanças estruturais durante o revenimento ocorrem em duas faixas de temperaturas :

- 260 à 370 °C : conhecida como fragilidade da martensita revenida (TME). O mecanismo de atuação deste tipo de fragilidade ainda permanece inconclusivo. Um desses mecanismos está associado à presença de austenita retida entre as ripas de martensita. A fragilização estaria associada à precipitação de cementita entre as ripas durante o revenido e a conseqüente instabilidade dos filmes de austenita retida inter-ripas, durante carregamento subsequente (EBRAHIME, 1983). O outro mecanismo proposto refere-se a um processo de fragilização intergranular causado pela precipitação de carbonetos nos contornos de grão austeníticos originais, que já podem estar previamente enfraquecidos pela segregação de fósforo e enxofre (McMAHON et al, 1983a).

Molibdênio pode atuar como um efetivo neutralizador da influência do fósforo e de outras impurezas fragilizadoras, mas este efeito pode ser perdido se o molibdênio precipitar na forma de carbonetos, como resultado da permanência em temperaturas elevadas, o que causará a liberação do fósforo que precipitará nos contornos de grãos. A presença de vanádio retarda o processo de fragilização interferindo na formação dos carbonetos ricos em molibdênio (McMAHON et al, 1983a).

Na faixa de temperatura em questão ocorre também a transformação do carboneto ϵ ou η , precipitado no início do revenido, em cementita, na forma de filmes contínuos frágeis, o que pode também contribuir para a queda na tenacidade.

- 375 à 575 °C : conhecida como fragilidade da martensita (TE), este tipo de fragilidade está associado à presença de impurezas como o fósforo, arsênio, antimônio e estanho, segregados nos contornos de grãos austeníticos originais. Teores destes elementos da ordem de 100 ppm ou menos provocam TE. Os aços carbono não são suscetíveis a este tipo de fragilização, desde que seus teores de manganês sejam menores que 0,5 %. Os aços ligados, principalmente com cromo e níquel são os mais suscetíveis (McMAHON et al, 1983b).

Portanto, os aços de alta resistência devem ser revenidos de duas maneiras. Em temperaturas de até 200 °C, o que pode resultar em um aumento modesto na tenacidade, sendo adequado para aplicações que requerem alta resistência à tração e à fadiga, ou onde a sollicitação é predominantemente compressiva; ou então revenidos em temperaturas acima de 600 °C, o que pode ocasionar quedas acentuadas em suas durezas. As duas faixas de fragilidade praticamente se superpõem, 260-370 e 375-575 °C, devendo ser evitadas.

Em decorrência dos problemas relacionados com a TME, foi desenvolvido o aço 300M, que é derivado do aço 4340, com adição de silício em torno de 1,5 %, 0,1 % de vanádio e 0,4 % de molibdênio.

O silício aumenta a estabilidade do carboneto ϵ ou η , retardando a formação da cementita e consequentemente aumentando a estabilidade térmica e mecânica da austenita retida até temperaturas superiores (RITCHIE et al, 1978). Desta forma, a TME é deslocada para temperaturas próximas a 420 °C, o que permitirá tratamentos de revenido à temperaturas em torno de 350 °C, o que resultará em melhores tenacidades, em comparação com o aço base, AISI 4340. O silício resulta também em uma melhor temperabilidade, maior endurecimento por solução sólida e melhor resistência ao amolecimento a temperaturas mais elevadas. Aplicações típicas deste aço incluem caixas de engrenagens para aeronaves, trem de pouso, peças de aviões, vasos de pressão, fixadores em geral, carcaças de motores e corpos de foguetes (PICKERING, 1978).

Os aços abordados anteriormente, se submetidos a tratamentos de endurecimento superficial, tem aumentada as suas resistências ao desgaste e à fadiga, ampliando a sua faixa de utilização. No entanto, tal tipo de tratamento não deve comprometer substancialmente a resistência mecânica do substrato, o que prejudicaria o desempenho da peça.

A nitretação por plasma é particularmente adequada a esta aplicação, uma vez que diferentemente dos demais processos de nitretação, admite tratamentos em uma

faixa mais ampla de temperaturas, permitindo tratamentos próximos à 350 °C (EDENHOFER et al, 1973).

II.2. Plasma

Apesar de plasmas não serem muitos comuns em nosso planeta, eles são abundantes no universo. Plasma é um gás contendo espécies carregadas e neutras tais como elétrons, íons positivos, íons negativos, átomos e moléculas. Na média, o plasma é eletricamente neutro pois qualquer desbalanceamento de carga resulta em campos elétricos que movem as cargas no sentido de eliminar este desbalanceamento. O plasma é considerado o quarto estado da matéria já que ele ocorre adicionando-se energia a um gás. No entanto, não há uma transformação nítida de fase entre um gás neutro e o plasma, o processo é contínuo (CECCHI, 1990).

A utilização de plasmas de descargas luminescentes em processos industriais é comentada por diversos autores. A descarga luminescente é assim chamada devido a luz visível que emana da região próxima à superfície que está sendo tratada, causada pela recombinação de íons e elétrons. Um plasma de descarga luminescente pode ser definido como uma região de pressão e temperatura relativamente baixas, onde uma ionização em estado quase neutro é mantida pela presença de elétrons energéticos. Num processo puramente térmico, este estado somente seria atingido aquecendo-se o gás a temperaturas de algumas centenas de milhares de graus. No entanto, aplicando-se uma diferença de potencial elétrico, o estado de plasma pode ser obtido em temperaturas mais baixas (SHOHET, 1991).

As características deste plasma são consequências das diferenças de massa de elétrons e íons. Quando um campo elétrico é aplicado a um gás ionizado, a energia é transferida mais rapidamente aos elétrons que aos íons. Além disso, a transferência de energia cinética de um elétron para uma partícula pesada (átomo, molécula ou íon) em uma colisão elástica é proporcional à razão das massas elétron/partícula pesada e por isso muito pequena (aproximadamente 10^{-5}). Consequentemente, em baixas pressões (baixa frequência de colisões), os elétrons livres podem acumular suficiente energia cinética, tendo então alta probabilidade de produzirem excitação ou ionização durante as colisões que eles sofrem contra partículas mais pesadas. A interação das espécies do plasma com superfícies e revestimentos é a razão que fez com que plasmas de descargas luminescente assumissem um papel cada vez mais importante no processamento de materiais. O emprego de técnicas que utilizam plasma em escala industrial tem sido considerado muito promissor (THORNTON, 1982).

A utilização do plasma na indústria vem aumentando cada vez mais ao longo dos anos por ser um processo limpo, que não causa danos e nem gera resíduos ao meio ambiente. Exemplos típicos destas aplicações são os processos de deposição visando a obtenção de resistência à corrosão e ao desgaste em componentes plásticos e metálicos tais como PVD, CVD, nitretação por plasma. Tem-se ainda diversos processos de limpeza e ativação por plasma para componentes eletrônicos e aeroespaciais, além da fabricação de coatings para resistência em altas temperaturas (SUCHENTRUNK et al, 1999). A figura 1 a seguir ilustra as principais aplicações do plasma atualmente na indústria automobilística.

**Figura 1 - Tecnologia do plasma na indústria automobilística
(SUCHENTRUNK et al, 1999)**

- Limpeza do sistema de exaustão por descarga de plasma
- Barreiras de difusão em tanques de combustível plásticos
- Tratamento com descargas corona para melhorar as propriedades dos tecidos dos bancos
- Pré-tratamentos em componentes plásticos melhorando a pintura e adesão das tintas
- Lâmpadas de plasma com alta intensidade para os faróis
- Proteção para as lentes dos faróis
- Vários tipos de coatings para melhorar a resistência ao desgaste de vários componentes tais como virabrequins, engrenagens, válvulas, etc.

II.3. Nitretação

Na Europa, Dr. Adolph Fry, da Krupps Steel Company, estudou a solubilidade do nitrogênio em ferros fundidos e aços apresentando, em 1906, o primeiro diagrama de equilíbrio Fe-N exibido na figura 2. Ao mesmo tempo, Dr. Adolph Machlet, da American Gas Company em New Jersey – EUA, começou a estudar o efeito do endurecimento de aços baixa liga e ferros fundidos pelo Nitrogênio criando a primeira patente em 1908 (Totten & Howes, 1997).

Figura 2 - Diagrama de Equilíbrio Ferro-Nitrogênio (Totten & Howes, 1997)

Criou-se então um novo método de endurecimento superficial considerado revolucionário para os engenheiros da época pois, devido a menor temperatura de tratamento, o processo resultava em um mínimo de distorção e pouco afetava as propriedades do núcleo. A técnica ganhou rapidamente aplicação nas indústrias onde a distorção era um problema crítico como a aeronáutica, ferroviária e têxtil.

II.3.1. Nitretação por Plasma

No início de 1932, Wehnelt um físico alemão, descobriu um outro método de nitretação que ele denominou "Glow Discharge" (descarga luminescente). No entanto, Wehnelt encontrou grandes dificuldades para controlar a "Glow Discharge". Foi então que Berghaus, um famoso industrial alemão, começou a trabalhar junto com Wehnelt para encontrar uma forma de controlar a descarga instável. Iniciou-se assim um novo processo metalúrgico de endurecimento superficial, considerado na época muito complexo, caro e incapaz de garantir reprodutibilidade de resultados, conhecido posteriormente como Nitretação por Plasma ou Nitretação iônica (Totten & Howes, 1997).

Somente nos anos 50, quando dois cientistas da General Electric em Massachusetts - EUA, Claude Jones e Derek Sturges, descobriram um sistema capaz de controlar a descarga luminescente, é que a técnica passou a ser utilizada comercialmente.

Com o avanço da tecnologia do vácuo e com o desenvolvimento da eletrônica a técnica foi ganhando progressivamente o seu espaço na indústria. Atualmente empresas como Rolls Royce, Peugeot, Citroën, Renault e Volkswagen, através de seus fornecedores, utilizam este processo para o tratamento de suas peças (ALVES Jr, 1995). Segundo Kovacs (1992), encontram-se em funcionamento cerca de 1500 unidades de nitretação por plasma em todo mundo. No Brasil a técnica ainda é pouco conhecida, tanto no meio empresarial como no meio acadêmico. Há pouco mais de 4 anos entrou em operação a primeira unidade de nitretação iônica adquirida por uma empresa nacional.

As principais vantagens da nitretação iônica sobre os processos convencionais de nitretação, como nitretação em banho de sais e a gás estão apresentadas a seguir.

- Baixa temperatura de tratamento : a nitretação iônica permite que ocorra nitretação em temperaturas baixas (300 ° C), evitando assim distorções dimensionais e, em peças que foram submetidas a processos de endurecimento anteriores, não ocorra queda de dureza muito acentuada no núcleo.
- Controle da Camada : a metalurgia da camada pode ser controlada através das variáveis do processo. Pode-se, com facilidade, produzir uma camada monofásica fina e tenaz de nitretos do tipo γ' ou então uma camada monofásica espessa de nitretos tipo ϵ de elevada dureza, dependendo do tipo de aplicação desejada.

- Tempo de Tratamento Inferior : comparada com a nitretação gasosa, que apresenta tempos de tratamento da ordem de 40 a 60 horas, na nitretação iônica pode-se obter a mesma espessura de camada em cerca de 4 a 20 horas.
- Nitretação Localizada : as áreas onde não se pretende nitretar, podem ser facilmente protegidas com materiais isolantes ou com materiais metálicos sem a necessidade de haver grandes ajustes entre a peça e a máscara. Normalmente utiliza-se aço carbono comum com uma folga máxima de 1 mm entre a máscara e a peça.
- Não poluente : com as exigências atuais de controle ambiental, como a norma ISO 14000, as técnicas que utilizam sais de cianeto e amônia, como fonte de nitrogênio, necessitarão de gastos adicionais crescentes para eliminação de seus resíduos. A nitretação iônica utiliza-se do nitrogênio atmosférico como fonte, não causando portanto impacto ambiental e não gerando componentes nocivos à saúde (ALVES Jr, 1995).

Além destes fatores, existem facilidades de automação, alta reprodutibilidade e alta flexibilidade. Algumas limitações existentes anteriormente na aplicação deste processo são listadas a seguir.

- Efeito do Catodo Oco : ocorre em peças com geometrias complexas, ou regiões que possuem pequenos furos ou concavidades, devido ao acúmulo de elétrons secundários nestas regiões. Este fenômeno causa um maior aquecimento nas mesmas, podendo danificar as propriedades da peça.
- Abertura de Arcos : durante o aquecimento da peça até a temperatura de trabalho pode haver a formação de arcos que podem danificar a peça. No entanto, com a evolução da eletrônica de potência, estes fenômenos já podem ser evitados ou minimizados, utilizando-se fontes de tensão pulsadas com aquecimento auxiliar.

Como principais aplicações da nitretação iônica pode-se citar:

- matrizes para conformação a quente e a frio;
- matrizes para injeção de alumínio sob pressão e plásticos;
- ferramentas de corte;
- engrenagens, virabrequins, anéis, pistões e molas;
- válvulas, etc (HUCHEL & DRESSLER, 1995).

A figura 3 ilustra algumas aplicações da nitretação por plasma.

1) peças com até 2 m de diâmetro e 5 m altura	5) ligas de titânio
2) ferramentas de usinagem	6) moldes de injeção
3) matriz de forjamento	7) virabrequins
4) ferramentas de estampagem	

Figura 3 – Aplicações da nitretação por plasma (Advanced Heat Treat Corp, 1997).

II.3.2. Mecanismo de Nitretação por Plasma

Para formação do plasma na nitretação iônica, deve-se estabelecer uma diferença de potencial entre dois eletrodos em um sistema hermeticamente fechado a uma pressão suficientemente baixa. Elétrons e íons são acelerados pelo campo elétrico, colidindo com outras partículas e produzindo assim mais íons e elétrons através da seguinte combinação (EDENHOFER, 1974a):

onde : G^0 = átomo ou molécula no estado fundamental

G^+ = representa um íon deste gás

Na figura 4 pode-se observar no gráfico tensão x corrente, a região anômala, que é utilizada nos processos de deposição a plasma, por ter alta densidade de corrente e portanto maior eficiência. A densidade de corrente geralmente situa-se entre 0,1 à 5,0 mA/cm² para uma voltagem entre 400 e 800 Volts (DRESSLER, 1989).

Figura 4 - Curva característica da voltagem X corrente entre dois eletrodos, numa descarga elétrica em gases (ALVES Jr, 1995).

Esta descarga é auto sustentada porque o íon gerado é acelerado para o catodo, produzindo novos elétrons secundários, que por sua vez produzirão novos íons. Valores maiores de corrente causarão a formação de arcos.

Com o estabelecimento da descarga anômala, uma série de reações entre as espécies presentes no plasma começam a ocorrer, sendo elas (HOWATSON, 1965):

Ionização : os elétrons mais energéticos, ao colidirem com as moléculas de gás, provocam a remoção de um elétron do átomo, produzindo um íon e dois elétrons.

Excitação : se a energia do elétron for inferior àquela necessária para ionização, poderão haver as seguintes excitações :

onde * representa estados excitados.

Relaxação ou Emissão : após a excitação das espécies haverá o decaimento dos elétrons para estados menos energéticos resultando na emissão de fótons.

Através da análise da luz emitida é possível fazer um diagnóstico do plasma.

Dissociação : na colisão entre moléculas e elétrons, dependendo da energia do elétron, poderá haver a formação de átomos neutros, excitados ou ionizados. Para o caso particular do Nitrogênio temos:

Recombinação : quando espécies ionizadas chocam-se com uma superfície, elétrons são liberados, neutralizando as espécies pelos seguintes processos de recombinação :

Um parâmetro importante do plasma é o seu grau de ionização, que é a fração das espécies neutras originais que foram ionizadas. Se esta fração for muito menor que a unidade o plasma é dito fracamente ionizado ou plasma frio. Este é o tipo de plasma utilizado na nitretação iônica (ROSSNAGEL et al, 1989).

Quando um íon energético proveniente das reações ocorridas no plasma colide com a superfície do catodo (pólo positivo), ele produzirá além de elétrons secundários, “sputtering” na superfície do catodo. Ele também pode ser refletido pela superfície como íon de alta energia, colisão elástica ou partícula neutra (EDENHOFER, 1974a).

O “sputtering” da superfície consiste num processo de desarranjo e ejeção de átomos da superfície de um sólido. Para o sputtering ocorrer é necessário que a espécie incidente possua uma energia maior ou igual a energia de ligação do átomo na superfície (energia de sublimação).

Os átomos arrancados por “sputtering” reagem com as espécies presentes no plasma formando compostos instáveis do tipo FeN que se depositam na superfície da peça e recombina-se para formar nitretos mais estáveis. Dessas combinações há um excesso de nitrogênio que se difundirá para dentro da peça ou voltará para o plasma. A zona mais interna formada pela difusão de nitrogênio atômico na amostra é chamada de zona de difusão ou camada de difusão e a zona mais superficial é a zona de compostos, camada de compostos ou ainda camada branca. A zona de difusão é formada por uma solução sólida de nitrogênio na matriz e alguns precipitados dispersos de nitretos de ferro ou nitretos dos elementos de liga presentes no aço. A zona de compostos é formada das fases γ' - Fe₄N e ϵ - Fe₂₋₃N para uma matriz de ferro.

A figura 5 ilustra o modelo de nitretação elaborado por Kölbel. Apesar de ser um mecanismo genérico, tanto do ponto de vista físico quanto químico, este é aceito pela maioria dos pesquisadores da área (Alves Jr, 1995).

nitrogênio podendo chegar até 30 μm de espessura. (Edenhofer, 1976 e Dressler, 1989)

A fase γ' apresenta estrutura hexagonal compacta (^{CFC}~~hcp~~) com características anti-aderentes, sendo isenta de poros. Possui boas propriedades de resistência ao desgaste abrasivo e adesivo além de apresentar maior ductibilidade do que a fase ϵ . Para sua obtenção faz-se necessário uma atmosfera com baixo teor de nitrogênio e livre de carbono (Edenhofer, 1974b), porém sua espessura dificilmente ultrapassa 10 μm (Dressler, 1989).

Devido as fases ϵ e γ' possuírem estruturas diferentes, camadas polifásicas tendem a ter propriedades inferiores as das camadas monofásicas.

A composição química do material a ser nitretado influi fortemente nas características da camada nitretada. A presença de carbono nos aços aumenta a espessura da camada de compostos e diminui a zona de difusão. Este fato ocorre pois a fase ϵ apresenta uma maior solubilidade de carbono do que a fase γ' levando a formação de carbonitretos de ferro (CHO & LEE, 1980). A presença de elementos formadores de nitretos como Ti, V, Cr, Mo, etc também influencia nas propriedades da camada nitretada. Geralmente, ocorre uma diminuição da espessura da camada nitretada acompanhada de um aumento de dureza devido a precipitação de nitretos e carbonitretos coerentes e semi-coerentes destes elementos de liga (INAL et al, 1990).

II.3.4. Aplicações

A princípio, qualquer componente ou peça confeccionados a partir de aços comuns, aços liga, aços ferramenta, ligas de titânio, ferro fundido, metalurgia do pó, podem ser nitretados por plasma. A tabela 1 fornece os principais materiais utilizados atualmente na nitretação por plasma com as suas características segundo a aplicação.

Tabela 1 – Material e tipo de camada indicada para cada tipo de desgaste
(Heat Treat Corp, 1997)

Esforços na superfície		Tipo de camada				
Nome	Esquema	γ'	$\epsilon + \gamma'$	ϵ	Camada de difusão	Material disponível *
Desgaste		+	0	++	x	A, B e C
Adesivo		++	x	+	0	D, E, F e G
Desgaste		+	0	+	0	D, F e G
Abrasivo		+	0	+	++	H
Desgaste		+	x	+	0	A, B e C
por		++	x	0	++	D, E, F e G
impacto		x	x	x	++	H

++ muito bom + bom 0 pobre x não recomendado

* A = aços baixo carbono como 1008, 1010 e 1020

B = aços médio carbono como 1035, 1040 e 1045

C = ferro fundido cinzento e nodular

D = nitralloy 135

E = aços de alta resistência como 4140, 4145, 4330, 4340 e 5140

F = aços ferramenta como H11, H12 e H13

G = aços para moldes da série P

H = aços ferramenta como M2 e D2

II.3.5. Equipamento para Nitretação por Plasma

A figura 6 ilustra um equipamento típico de nitretação iônica.

**Figura 6 - Esquema básico de um equipamento de nitretação iônica
(ALVES Jr.,1995)**

O equipamento constitui-se basicamente de um sistema de vácuo, uma fonte de potência e um reator. O sistema de vácuo deve ser capaz de atingir em torno de 10^{-2} mbar de pressão e possuir válvulas para controlar a vazão dos gases introduzidos para tratamento. A fonte de potência possui uma saída com uma voltagem máxima de 1500 Volts e uma corrente capaz de fornecer energia para peça para que esta seja aquecida a uma temperatura entre 300 e 600 °C. No reator estão dois eletrodos onde o catodo é também o porta-amostra. Ainda no reator devem existir saídas para as medidas de pressão, temperatura e outras variáveis desejadas para controle do processo. Devem possuir ainda entradas para os gases e bomba de vácuo (ALVES Jr, 1995).

II.3.6. Fonte de Tensão Pulsada

Os equipamentos mais antigos utilizavam fontes de tensão contínua para geração da potência do reator, no entanto, haviam muitos problemas relacionados com abertura de arco. Com o avanço da eletrônica de potência surgiram as fontes de tensão retificadas, o que possibilitou o desenvolvimento da nitretação iônica em escala industrial. A fonte de tensão retificada, operando em frequências entre 1000 e 10000 Hz, utilizando pulsos quadrados com duração inferior a 100 μ s, praticamente evita a formação de arcos. Porém, a razão entre a largura e a pausa do pulso deve ser variável, de forma a controlar a potência de entrada e assim controlar a temperatura da peça. Variando-se a frequência, consegue-se variar o tempo ligado e desligado. Para maior pausa, menor a potência média fornecida e consequentemente menor será a temperatura (ALVES Jr, 1995). A figura 7 ilustra o mecanismo de eliminação do arco catódico pelo plasma pulsado.

Figura 7 - Mecanismo de eliminação do arco catódico pelo plasma pulsado.

A fonte de tensão pulsada evita também o problema de superaquecimento pelo efeito do catodo oco visto que as cargas que permanecem em regiões confinadas são dispersas após o pulso.

II.4. DESGASTE

Desgaste, corrosão e fadiga dos materiais podem ser considerados como alguns dos maiores problemas industriais. O desgaste geralmente não é catastrófico, mas diminui muito a eficiência de um ou mais componentes, sendo significativo se for considerado o aspecto econômico (EYRE, 1978).

Para identificação do tipo de desgaste ocorrido no sistema, deve ser considerada a tribologia do sistema. A tribologia envolve dados sobre os materiais, lubrificantes, meio ambiente, ruído, vibração, geometria, temperatura, tempo, carga, desgaste, velocidade, ou seja, todos os fatores que de alguma forma influenciam no sistema analisado. Mais da metade dos sistemas que usam combustíveis ou lubrificantes apresentam falhas tribológicas (EYRE, 1991).

O desgaste de um material pode ser definido como uma perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido a ação mecânica, isto é, o contato e o movimento relativo contra um sólido, líquido ou gás. O desgaste é o resultado de um acúmulo de tensão nas regiões próximas a superfície, levando a formação e propagação de trincas e, em casos extremos, a fratura do material (GAHR, 1987).

O resultado do processo de desgaste é a mudança dimensional de peças e a mudança nas características estéticas de uma superfície, acarretando na troca ou substituição do componente desgastado e um maior gasto com manutenção.

II.4.1. Tipos de desgaste

Como citado anteriormente, o desgaste é um problema que afeta uma grande variedade de indústrias e produtos, levando a um alto custo para a manutenção de máquinas e peças. Por existir uma ampla variedade de formas de desgaste, há a necessidade de classificá-los segundo algum critério.

O critério de classificação mais utilizado é a classificação por mecanismos de desgaste descritos na Norma DIN 50320.

Os tipos de desgaste segundo o seu mecanismo são :

- adesivo: envolve uma ligação localizada entre duas superfícies através da transferência de material de uma para outra.

- abrasivo: envolve a penetração de partículas na superfície e o destacamento de material na forma de lascas alongadas.
- corrosivo: envolve reações químicas que ocorrem quando favoráveis termodinamicamente.
- erosivo: envolve uma alta tensão de contato devido a energia cinética de um fluxo de partículas em um fluido (gás ou líquido) que encontra a superfície.
- "fretting" : está associado a uma vibração de baixa amplitude entre as superfícies.

Geralmente, o desgaste de um material é a combinação de dois ou mais tipos de desgaste que ocorrem simultaneamente, porém sempre com a predominância de um dos tipos (GAHR, 1987).

II.4.1.1. Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo é o deslocamento e o arrancamento de material causado pela presença de partículas duras entre uma ou duas superfícies em movimento ou pela presença de saliências ou rugosidade na superfície. Este tipo de desgaste pode ser classificado em abrasão por dois corpos ou abrasão por três corpos e representa cerca de 50% dos problemas de desgaste industrial (PETERSON, 1980). Na abrasão por dois corpos, as partículas abrasivas movem-se livremente sobre a superfície do material, já no desgaste abrasivo por três corpos, as partículas agem como elementos de interface entre duas superfícies. O desgaste abrasivo por três corpos apresenta algumas ordens de grandeza menor que a abrasão por dois corpos (GAHR, 1987).

Muitos mecanismos de desgaste abrasivo são propostos para explicar como o material é removido da superfície durante o processo de abrasão, sendo eles: micro-sulcamento, micro-fadiga, micro-corte e micro-lascamento, conforme mostrado na Figura 8. Devido a complexidade do processo de abrasão, nenhum destes mecanismos explica completamente a perda de material.

Figura 8 - Interações físicas entre partículas abrasivas e a superfície dos materiais (GAHR, 1987).

II.4.1.1.1. Desgaste por micro-sulcamento

O micro-sulcamento ocorre através da penetração da partícula abrasiva na superfície sem o arrancamento de material. Neste mecanismo ocorre uma deformação plástica com deslocamento de material para as laterais. Este mecanismo ocorre sob baixas cargas e não resulta em uma perda real de material. A perda ou destacamento de material pode até acontecer, mas somente se a superfície estiver submetida a muitas partículas abrasivas simultaneamente ou sucessivamente caracterizando a micro-fadiga (SHACKELFORD, 1996).

No desgaste por micro-sulcamento somente a força normal (F_N) está presente. O resultado é um deslocamento ou saliências ao redor da indentação e posteriormente a perda de material através de lascas. A perda do material ocorre quando a deformação plástica da superfície atinge um determinado limite de ductilidade causando uma trinca superficial.

A profundidade da penetração da partícula abrasiva (ou profundidade do dano) é limitada pela resistência a fratura da partícula abrasiva (S_a) e também pela resistência mecânica da superfície indentada (P_m). Quando a partícula abrasiva

quebra, fragmentos com uma força componente paralela (F_p^1) à superfície desgastada pode interagir, causando finos riscos de forma aleatória. O resultado é um maior dano da superfície para cada interação e o aumento da taxa de desgaste. Este tipo de desgaste pode ser observado esquematicamente na Figura 9.

Figura 9 - Representação esquemática de desgaste abrasivo sob força normal (GAHR, 1987).

II.4.1.1.2. Desgaste por micro-corte

O micro-corte resulta em perda de material igual ao volume do sulco produzido. O material é removido através do riscamento com um indentador de dureza igual ou maior que a dureza da superfície. A proporção entre material destacado e material deslocado, depende do ângulo de ataque entre a partícula abrasiva e a superfície. O material é retirado pelo mecanismo de micro-corte quando o ângulo de ataque é maior que um valor crítico, ou seja, este ângulo caracteriza a transição entre o mecanismo de micro-sulcamento para micro-corte e é função do material desgastante e das condições do meio (SHACKELFORD, 1996).

Para este caso será feita uma análise similar a anterior, porém com a adição de uma força paralela (F_p) a superfície de desgaste, conforme mostrado na Figura 10. Novamente a profundidade do dano é uma função da magnitude da força aplicada e da resistência mecânica da material (P_m) e é limitada pela resistência a fratura da partícula abrasiva (S_a). A força paralela a superfície causa um movimento relativo entre a superfície e a partícula, formando um sulco (GAHR, 1987).

Figura 10 - Representação esquemática do desgaste abrasivo sob forças normal e paralela a superfície (GAHR, 1987).

Quando a trajetória da partícula abrasiva é impedida, o sulco é formado ou pelo corte da superfície ou pela deformação plástica da superfície. O desgaste por micro-corte resulta em uma perda imediata de material e a mais alta taxa de desgaste quando comparado ao desgaste por micro-sulcamento.

Para materiais dúcteis, os mecanismos de micro-sulcamento e micro-corte são observados, sendo o mecanismo de micro-corte a forma mais severa de abrasão nesta classe de materiais (GAHR, 1987).

II.4.1.1.3. Desgaste por micro-lascamento

A indentação e o riscamento por partículas abrasivas resultam na formação e propagação de trincas, devido a uma alta concentração de tensões imposta pelas partículas abrasivas. As microtrincas causam um volume de desgaste maior que o volume dos sulcos, caracterizando o mecanismo de micro-lascamento. Este mecanismo ocorre nas superfícies de materiais frágeis, pois estes possuem

pouca ou nenhuma deformação plástica. A formação de uma trinca ocorre quando materiais frágeis são deformados plasticamente até que a zona de deformação exceda um determinado valor crítico (GAHR, 1987).

II.4.1.2. Fatores que afetam o desgaste abrasivo

A perda de massa no desgaste abrasivo pode ser influenciada pelo tipo de abrasivo, velocidade de deslizamento, temperatura, carga, lubrificação, umidade e efeitos corrosivos. Características do abrasivo como dureza, tenacidade, tamanho e geometria influenciam no desgaste (TYLCZAK & ALBANY, 1992).

- **Dureza do abrasivo** : a taxa de desgaste depende do grau de penetração na superfície pelo abrasivo sendo portanto relacionada com a dureza superficial do material.
- **Geometria das partículas abrasivas** : o formato das partículas abrasivas influencia nos sulcos produzidos pelo material. Quanto mais agudas forem as arestas das partículas abrasivas maior será a perda de material.
- **Tamanho do abrasivo** : o volume de material removido aumenta com o tamanho da partícula abrasiva até um tamanho crítico.
- **Velocidade de deslizamento** : Para velocidades de deslizamento de até 2,5 m/s pode-se verificar um aumento no volume de material removido devido ao aquecimento provocado pelo atrito das partículas abrasivas.
- **Temperatura** : o aumento da temperatura aumenta a taxa de desgaste devido à diminuição da dureza e do limite de elasticidade.
- **Carga** : o aumento da carga aumenta a taxa de desgaste até um valor crítico onde ocorre o emperramento.
- **Dureza do material** : esta é uma das principais características associada ao desempenho contra o desgaste. As maiores durezas geralmente correspondem a resistências maiores.
- **Umidade** : a umidade tem forte influencia nas taxas de desgaste abrasivo. Geralmente o desgaste é maior com teores de umidade elevados.
- **Efeito corrosivo** : o desgaste abrasivo é aumentado por condições corrosivas, principalmente com pH baixo (TYLCZAK & ALBANY, 1992).

II.4.2. Ensaios de Desgaste

Existem vários tipos de testes de desgaste, e este número continua aumentando. Os testes de desgaste visam principalmente avaliar as características do material quanto à variação de composição, microestrutura e resistência mecânica dentro de um comportamento tribológico simulado de uma condição de serviço.

A Sociedade dos Engenheiros de Tribologia e Lubrificantes (STLE) nos EUA, tem documentada mais de 300 tipos diferentes de métodos para testes de fricção, desgaste e lubrificação. Os testes mais utilizados são :

- pino sobre disco
- pino ou bloco sobre anel
- pino sobre chapa.

Estes testes podem ser utilizados com boa aproximação para o estudo e desenvolvimento de novos materiais e estudos de simulação.

Para o ensaio de pino sobre disco um pino é posicionado perpendicularmente a um disco plano. O pino é pressionado contra o disco através de uma carga conhecida. O método de carregamento pode ser feito com pesos colocados em braços ou alavancas ou através de sistemas hidráulicos ou pneumáticos. As amostras, segundo a norma ASTM G 99-90, devem apresentar de 2 a 10 mm de diâmetro e 2 a 10 mm de espessura. A amostra é pesada antes e após cada ensaio de modo a se verificar a perda de massa e desta forma verificar o desgaste ocorrido. Este é o tipo de ensaio utilizado no presente trabalho.

- **Dureza do material** : esta é uma das principais características associada ao desempenho contra o desgaste. As maiores durezas geralmente correspondem a resistências maiores.
- **Umidade** : a umidade tem forte influencia nas taxas de desgaste abrasivo. Geralmente o desgaste é maior com teores de umidade elevados.
- **Efeito corrosivo** : o desgaste abrasivo é aumentado por condições corrosivas, principalmente com pH baixo (TYLCZAK & ALBANY, 1992).

II.4.2. Ensaios de Desgaste

Existem vários tipos de testes de desgaste, e este número continua aumentando. Os testes de desgaste visam principalmente avaliar as características do material quanto à variação de composição, microestrutura e resistência mecânica dentro de um comportamento tribológico simulado de uma condição de serviço.

A Sociedade dos Engenheiros de Tribologia e Lubrificantes (STLE) nos EUA, tem documentada mais de 300 tipos diferentes de métodos para testes de fricção, desgaste e lubrificação. Os testes mais utilizados são :

- pino sobre disco
- pino ou bloco sobre anel
- pino sobre chapa.

Estes testes podem ser utilizados com boa aproximação para o estudo e desenvolvimento de novos materiais e estudos de simulação.

Para o ensaio de pino sobre disco um pino é posicionado perpendicularmente a um disco plano. O pino é pressionado contra o disco através de uma carga conhecida. O método de carregamento pode ser feito com pesos colocados em braços ou alavancas ou através de sistemas hidráulicos ou pneumáticos. As amostras, segundo a norma ASTM G 99-90, devem apresentar de 2 a 10 mm de diâmetro e 2 a 10 mm de espessura. A amostra é pesada antes e após cada ensaio de modo a se verificar a perda de massa e desta forma verificar o desgaste ocorrido. Este é o tipo de ensaio utilizado no presente trabalho.

III - MATERIAIS E MÉTODOS

III.1. Análise Química dos Aços

As análises químicas dos aços utilizados neste trabalho foram realizadas no Laboratório Químico do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística da USP - São Carlos utilizando o método de análise por via úmida.

Na tabela 2 podemos verificar as composições químicas nominais dos aços utilizados neste trabalho.

**Tabela 2 – Composição química nominal dos aços AISI 4340, 4140, 5140 e 300M
(% em peso)**

Elementos	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	V
4140	0.4	0.87	0.95	-	0.2	0.27	-
5140	0.4	0.8	0.8	-	-	0.27	-
4340	0.4	0.8	0.8	1.8	0.25	0.26	-
300M	0.4	0.8	0.8	1.8	0.4	1.5	0.1

III.2. Equipamento de Nitretação por Plasma

O sistema de nitretação por plasma utilizado neste trabalho foi construído no Laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e Automobilística, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP). A figura 11 ilustra este equipamento.

FIGURA 11 - Equipamento de nitretação por plasma.

Câmara de nitretação - o reator de plasma consiste de uma câmara de forma cilíndrica fabricado em aço inoxidável de diâmetro interno de 300mm e altura de 300mm, resultando num volume de 0.021m^3 . O catodo (porta-amostra) consta de uma chapa de 90mm de diâmetro e espessura de 4mm, com blindagem elétrica permitindo uma maior eficiência no tratamento. Duas flanges de aço inoxidáveis são usadas para fechar a câmara. Na flange superior (móvel) é conectado o terminal positivo da fonte de potência. A flange inferior possui 7 orifícios, dos quais um central por onde passa o termopar de cromel-alumel eletricamente isolado. Os 6 orifícios periféricos são ocupados por conexões necessárias de instrumentação, evacuação da câmara, entrada de gases, etc. As vedações das partes superior e inferior foram feitas com gaxeta "L" de viton. Uma janela posicionada na parte dianteira da câmara serve para visualizar o tratamento.

Sistema de vácuo - a câmara é evacuada por uma bomba mecânica rotativa, modelo E2M8 da Edwards, seguida por uma válvula de isolamento solenóide (PV25EK-Edwards), montada na linha de entrada. A válvula de isolamento é eletricamente ligada em paralelo com o motor. Uma válvula diafragma está situada na entrada da câmara. Em todas as interligações bomba/câmara e válvulas usou-se mangueiras de borracha adequadas para sistemas de vácuo.

Fonte de Tensão - esta fonte consiste de um sistema de retificação que recebe tensão da rede (220V-ac). Possui uma tensão máxima de saída de 800V, dc, ajustável continuamente, com uma potência máxima de 2KVA. Além da tensão dc, uma tensão pulsada (onda quadrada), também pode ser obtida, com frequência variável de 1-10kHz, e ciclo de trabalho de 30-90%.

Sistema de processamento de dados - este sistema dispõe de uma placa conversora com 8 canais a/d e 2 canais d/a, permitindo saída para o microcomputador. O software utilizado no processamento de dados foi desenvolvido pela Indústria de Aparelhos Médicos - Científicos Fac. Ltda., utilizando a linguagem LabView e placas a/d da National Instruments. Esta linguagem de programação por objeto orientado é composta de aquisição de dados, controle das variáveis e armazenamento da informação.

A câmara, a fonte de tensão e a bomba de vácuo foram montadas formando um sistema compacto único, dotado de mostradores digitais que permitem o monitoramento de todas as variáveis requeridas para o tratamento. Na figura 11, no lado direito da câmara, na parte superior, há um painel de controle composto, da esquerda para a direita, de uma chave liga/desliga do pulsado; liga/desliga da fonte; liga/desliga do painel de leitura; ajuste grosso e fino da corrente e tensão; ajuste de frequência e ciclo de trabalho. Na parte inferior do lado esquerdo da câmara há outro painel de controle formado, da esquerda para a direita, de duas válvulas agulha; válvula diafragma; chave liga/desliga da bomba de vácuo; liga/desliga do solenóide. Ao lado direito há um painel de leitura para a pressão, temperatura, frequência, ciclo de trabalho, tensão na câmara e leitura da corrente .

III.3. Procedimento Experimental

A seqüência do experimento foi dividida de acordo com o fluxograma mostrado na figura 12.

FIGURA 12 – Fluxograma do procedimento experimental.

III.3.1. Preparação das Amostras

As amostras foram usinadas em formato cilíndrico, com dimensões de 10mm de diâmetro e 10mm de altura, conforme estabelecido pela norma ASTM G99-90 "Standard Test Method for Wear Testing With a Pin-On-Disk Apparatus". As faces foram retificadas garantindo o paralelismo entre elas, característica fundamental para os ensaios de dureza e abrasão.

Foram realizados os tratamentos térmicos das mesmas anteriormente a nitretação, que consistiu em têmpera e revenimento. As amostras foram mantidas a uma temperatura de 860 °C por 2 horas e temperadas em óleo. Para os aços 4340, 4140 e 5140 foi feito revenimento de 1 hora na temperatura de 550 °C e no caso do 300M, revenimentos à 350 e 550 °C. Após o revenimento mediu-se as durezas das amostras escala Rockwell C utilizando um durômetro marca Testor, modelo Dia Testor 2 RC, com carga de 150 Kgf e identador de diamante.

As amostras foram então lixadas manualmente à úmido em lixas 80, 150, 220, 320, 400 e 600 mesh e depois polidas em óxido de cromo de granulometria média em torno de 15 µm até que todos os riscos desaparecessem.

III.3.2. Operação do equipamento de Nitretação por Plasma

Para iniciar a operação, primeiramente a amostra foi minuciosamente limpa e colocada no catodo (porta-amostra), em seguida a câmara foi fechada, e o anodo e catodo foram ligados à fonte de energia. O sistema foi evacuado abrindo-se as válvulas solenóide e diafragma para a produção de vácuo na câmara até pressão de aproximadamente 4×10^{-2} mbar. Abriu-se a válvula de agulha (V1) para evacuação das mangueiras até 10^{-1} mbar, fechou-se V1 nesta pressão e deixou-se novamente a pressão atingir 4×10^{-2} mbar. Na continuação, abriu-se o regulador de gás até 3 kgf/cm². Em seguida, abriu-se V1 para purgar a câmara até 2 mbar. Ligou-se a fonte de tensão na pressão de 10^{-1} mbar, e aumentou-se a voltagem lentamente, até a luminescência característica do processo surgir. Uma vez que a luminescência foi acesa, a corrente e voltagem foram lentamente aumentadas e começou o bombardeamento iônico aquecendo a peça. Se durante o aquecimento produziam-se algumas faíscas na luminescência, era sinal que existiam ainda algumas impurezas na superfície, e que estavam sendo limpas. Após a limpeza das impurezas, injetou-se gás até a pressão de trabalho, elevando assim a temperatura até o valor desejado. Neste ponto iniciou-se a contagem do tempo de tratamento. Depois do tratamento

completado, desligava-se o equipamento e a amostra resfriava-se dentro da câmara. Quando a temperatura da amostra atingia um valor próximo à temperatura ambiente, a pressão da câmara era aumentada por admissão de ar para retirada das amostras.

III.3.3. Nitretação por plasma

Para todos os experimentos utilizou-se uma mistura gasosa de 20%N₂ - 80%H₂ e pressão de 4 mbar. O tempo de nitretação foi de 2, 4 e 6 horas e a temperatura 550 °C sendo que, para o aço 300M, utilizou-se também 350 °C. A tabela 1 indica as condições de tratamento que foram utilizadas neste trabalho.

Utilizou-se corrente contínua e corrente pulsada sendo que o pulso foi variado utilizando-se frequência de 2 e 10 KHz com o ciclo de trabalho (razão t_{on} / t_{off} - tempo ligado e tempo desligado da fonte de tensão pulsada) de 75 %. A seguir estão demonstrados os cálculos do tempo de duração de cada pulso para as duas frequências.

Frequência (f) = 2 KHz e Ciclo de trabalho (δ) = 75% :

$$\text{Ciclode Trabalho}(\delta) = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} \times f \quad (1)$$

onde:

$$T = \text{período} = t_{on} + t_{off} \quad (2) \quad \text{assim}$$

$$t_{on} = \frac{\delta}{f} = \frac{0.75}{2000\text{Hz}} = 375\mu s$$

$$t_{off} = \frac{1}{f} - t_{on} = \frac{1}{2000} - 375\mu s = 125\mu s$$

Frequência (f) = 10 KHz e Ciclo de trabalho (δ) = 75% :

$$t_{on} = \frac{\delta}{f} = \frac{0.75}{10000Hz} = 75\mu s$$

$$t_{off} = \frac{1}{f} - t_{on} = \frac{1}{10000} - 75\mu s = 25\mu s$$

As condições de tratamento utilizadas neste trabalho estão descritas na tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Condições de tratamento utilizadas

Condição de Tratamento	4340 550°C	4140 550°C	5140 550°C	300M 550°C	300M 350 °C
A	Tempo de Tratamento = 2 horas e frequência de pulso = 10 KHz				
B	Tempo de Tratamento = 2 horas e frequência de pulso = 2 KHz				
C	Tempo de Tratamento = 2 horas e corrente contínua (CC)				
D	Tempo de Tratamento = 4 horas e frequência de pulso = 10 KHz				
E	Tempo de Tratamento = 4 horas e frequência de pulso = 2 KHz				
F	Tempo de Tratamento = 4 horas e corrente contínua (CC)				
G	Tempo de Tratamento = 6 horas e frequência de pulso = 10 KHz				
H	Tempo de Tratamento = 6 horas e frequência de pulso = 2 KHz				
I	Tempo de Tratamento = 6 horas e corrente contínua (CC)				

III.3.4. Caracterização

Para caracterização das amostras utilizou-se o ensaio metalográfico, microdureza Vickers, ensaio de desgaste abrasivo, ensaio de raio-X e análise por microsonda.

III.3.4.1. Ensaio Metalográfico

Seccionamento ou corte: os cortes das amostras foram executados numa máquina de corte de tipo CUT-OFF, com refrigeração de óleo solúvel em água, tendo como ferramenta de corte um disco abrasivo em alta rotação.

O corte foi feito longitudinalmente, tomando-se o cuidado de fazer um avanço lento para evitar o aquecimento da amostra.

Embutimento: as amostras foram embutidas em resina de poliéster juntamente com um anel metálico para evitar o abaulamento das bordas.

Lixamento: a superfície de cada amostra foi lixada manualmente utilizando lixas com as seguintes granulometrias : 80, 150, 240, 320, 400 e 600 mesh. Em cada um destes estágios de lixamento, o corpo de prova foi movimentado sobre a superfície de tal maneira que os riscos fossem formados apenas numa direção. O lixamento com cada lixa foi efetuado até o ponto em que os riscos produzidos no estágio anterior desaparecessem totalmente.

Polimento : após o lixamento as amostras foram polidas inicialmente com óxido de cromo de granulometria média de 10 μ m e posteriormente com pasta de diamante na seguinte granulometria : 9, 6, 3, 1 e 0.25 μ m.

Ataque Químico : foi utilizado o reagente Nital 5%, e as fotomicrografias realizadas em microscópio Carl-Zeiss modelo Axiotech, com a técnica de contraste de interferência diferencial.

III.3.4.2. Microdureza e espessura da camada

Os valores de microdurezas e espessuras das camadas foram obtidos, utilizando-se um microdurômetro Vickers da marca Buehler, modelo MMT-3. Os perfis de microdureza foram obtidos com carga de 50 gramas. Para as correlações de microdureza e profundidade das camadas de difusão e camada composta, várias indentações foram feitas em cada profundidade, de acordo com a norma JIS G0562 "Standards update - Method of Measuring Nitrided Case Depth for Iron and Steel", conforme mostra a figura 13.

FIGURA 13 - Disposição de pontos na medição de microdureza

III.3.4.3. Ensaios de desgaste abrasivo

As amostras com 2 horas de nitretação foram ensaiadas num abrasômetro a dois corpos tipo pino-sobre-disco com lixa de SiC de 400 mesh, carga constante de 154 gramas e rotação de 53 rpm. Devido a impossibilidade de continuar utilizando este abrasômetro, visto que o mesmo pertencia a outro laboratório, as amostras com 4 e 6 horas de nitretação foram ensaiadas em outro abrasômetro tipo pino-sobre-disco, semelhante ao anterior porém a carga utilizada e a rotação eram diferentes : 288 gramas e 74 rpm.

Em ambos os casos a lixa foi fixada no disco giratório. A cada 200 giros, de um total de 2000, a máquina parava e a lixa limpa com um pincel. O desgaste foi investigado em condições não lubrificadas e em temperatura ambiente. O desgaste das amostras foi quantificado pela perda de massa percentual com relação à massa inicial (Eq. 3), isto é:

$$\Delta m = \frac{M_i}{M_f} \times 100\% \quad (3)$$

onde : Δm = perda de massa;
 M_i = massa da amostra sem desgaste;
 M_f = massa final.

Em cada pausa a amostra foi limpa com acetona e pesada numa balança com 0,0001g de precisão da marca Mettler. Uma nova lixa foi usada em cada ensaio. Os procedimentos de ensaio foram realizados de acordo com a norma ASTM G99-90.

III.3.4.4. Difratometria de raios-X

O emprego desta análise permitiu determinar as fases presentes na superfície das amostras nitretadas. O equipamento usado foi um difratômetro de marca Rigaku Rotaflex, utilizando-se um tubo de radiação de Cu. As amostras foram analisadas por meio da técnica de varredura contínua, com uma constante de tempo 2s e uma velocidade de varredura de 1°/min, com 2θ variando de 3° a 120°.

III.3.4.5. Análise por microsonda

No microscópio eletrônico de varredura do Instituto de Química de São Carlos, realizou-se análise por microsonda EDX na amostra do aço 300M nitretada em CC durante 6 horas utilizando a técnica da varredura em linha.

III.4. Metodologia para análise dos resultados

Os resultados de microdureza, espessura de camada branca e desgaste foram analisados para cada aço quanto a influência das variáveis frequência e tempo. Para tanto, foram plotados gráficos mantendo-se constante a variável tempo. Posteriormente, após a análise de cada aço em separado, fez-se a análise comparativa de todos os aços seguindo o mesmo conceito de análise utilizado para cada aço em separado.

Em seguida, fez-se a análise do aço 300M nitretado em 350 °C para verificar o seu desempenho em relação àqueles nitretados à 550 °C, verificando a eficiência da dureza do substrato na resistência ao desgaste abrasivo.

Fez-se ainda a análise dos difratogramas e do resultado da análise por microsonda para as amostras do aço 300M nitretado em 550 °C, o qual apresentou o resultado inédito de uma camada branca dupla.

IV. RESULTADOS e DISCUSSÃO

IV.1. Análise Química

A tabela 4 fornece os resultados das análises químicas dos aços AISI 4340, AISI 4140, AISI 5140 e 300M que foram utilizados neste trabalho.

Tabela 4 - Resultados das análises químicas dos aços AISI 4340, 4140, 5140 e 300 M (% em peso)

Aços	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si	V
4340	0.41	0.76	0.75	1.68	0.20	0.26	-
4140	0.41	0.92	0.91	-	0.21	0.28	-
5140	0.40	0.86	0.80	-	0.05	0.29	-
300M	0.41	0.80	0.83	1.94	0.44	1.73	0.1

IV.2. Resultados de Dureza após Tratamento Térmico

A tabela 5 apresenta os resultados obtidos para as amostras após Tratamento Térmico de Têmpera e Revenimento.

Tabela 5 - Valores de Dureza após Tratamento Térmico

Após Têmpera	AISI 4340	300M		AISI 4140	AISI 5140
Dureza Média (Rockwell C)	60.0	60.5		60.3	59.5
Desvio Padrão (Rockwell C)	1.20	0.92		1.02	0.90
Após Revenimento	AISI 4340	300M 550 °C	300M 350 °C	AISI 4140	AISI 5140
Dureza Média (Rockwell C)	35.5	46.5	52.5	35.2	34.0
Desvio Padrão (Rockwell C)	1.47	1.05	1.05	0.74	0.89

Analisando a tabela 5 pode-se observar que o aço 300M revenido à 550 °C possui maior valor de dureza que os demais aços revenidos nesta temperatura. Tal fato comprova a influência do Silício na manutenção da dureza do substrato.

Os resultados seguintes são apresentados para cada tipo de aço separadamente a fim de facilitar o entendimento.

IV.3. Aço AISI 4340

IV.3.1. Ensaio de Microdureza

São apresentados nas figuras 14 à 16 os resultados dos ensaios de microdureza realizados nas amostras nitretadas nas várias condições de tratamento.

Verifica-se um aumento da dureza superficial com o aumento do tempo de tratamento de 2 até 6 horas. Não houve variação significativa das durezas dos substratos com o aumento do tempo.

Figura 14 - Ensaio de Microdureza do aço AISI 4340 nitretado durante 2 horas

Figura 15 - Ensaio de Microdureza do aço AISI 4340 nitretado durante 4 horas

Figura 16 - Ensaio de Microdureza do aço AISI 4340 nitretado durante 6 horas

Na tabela 6 estão apresentados os valores de espessura das camadas compostas produzidas pela nitretação.

Tabela 6 – Espessura de camada composta para o Aço AISI 4340

2 horas	Espessura (μm)	4 horas	Espessura (μm)	6 horas	Espessura (μm)
10 KHz	15	10 KHz	15	10 KHz	16
2 KHz	13	2 KHz	13	2 KHz	14
CC	14	CC	14	CC	16

Observando a tabela 6 verifica-se que a variação da frequência do pulso no tratamento de nitretação por plasma do aço 4340 não gerou variações significativas nas espessuras das camadas compostas. O aumento do tempo de tratamento levou a espessuras maiores de camada composta em todas as frequências analisadas.

IV.3.2. Ensaio de Desgaste Abrasivo

São apresentados nas figuras 17 à 19 os valores de perdas de massa obtidos no ensaio de desgaste abrasivo. Verifica-se que estes valores estão bastante próximos, independente da frequência de tratamento utilizada. A perda de massa em relação a amostra não nitretada foi acentuada, sendo que as amostras com 6 horas de nitretação perderam praticamente metade da quantidade de massa quando comparada com a amostra sem nitretar. Tal fato demonstrou a eficiência da Nitretação por Plasma para melhorar a resistência ao desgaste abrasivo.

Figura 17 - Desgaste Abrasivo do aço AISI 4340 nitretado durante 2 horas

Figura 18 - Desgaste Abrasivo do aço AISI 4340 nitretado durante 4 horas

Figura 19 - Desgaste Abrasivo do aço AISI 4340 nitretado durante 6 horas

IV. 3.3. Metalografia

Na figura 20 pode-se verificar a presença da camada composta na superfície e abaixo desta uma região escura com a presença de vários precipitados dispersos na rede constituindo-se na camada de difusão.

44 μm

Figura 20 - Micrografia do aço AISI 4340 nitretado durante 6 horas, em CC à 550°C,

IV.4. Aço AISI 4140

IV.4.1. Ensaio de Microdureza

São apresentados nas figuras 21 à 23 os resultados dos ensaios de microdureza realizados nas amostras nitretadas.

Verifica-se um aumento da dureza superficial com o aumento do tempo de tratamento de 2 até 6 horas semelhante ao AISI 4340. As amostras nitretadas com 10 KHz apresentaram as maiores durezas superficiais nos tempos de tratamento de 4 e 6 horas. No entanto, a frequência de 2 KHz em 4 horas demonstrou uma camada de difusão com dureza pouco superior às amostras nitretadas com 10 KHz.

Figura 21 - Ensaio de Microdureza do aço AISI 4140 nitretado durante 2 horas

Figura 22 - Ensaio de Microdureza do aço AISI 4140 nitretado durante 4 horas

Figura 23 - Ensaio de Microdureza do aço AISI 4140 nitretado durante 6 horas

Observando a tabela 7 verifica-se que a variação da frequência do pulso no tratamento de nitretação por plasma do aço AISI 4140 não gerou variações significativas nas espessuras de camada composta. Porém, as amostras nitretadas com 10 KHz tendem a apresentar maiores espessuras de camada composta.

Tabela 7 – Espessura camada composta para o Aço AISI 4140

2 horas	Espessura (μm)	4 horas	Espessura (μm)	6 horas	Espessura (μm)
10 KHz	18	10 KHz	19	10 KHz	21
2 KHz	16	2 KHz	17	2 KHz	18
CC	18	CC	18	CC	20

Em relação ao AISI 4340 as espessuras de camada composta do AISI 4140 são sempre superiores, independente da condição de tratamento.

IV.4.2. Ensaio de Desgaste Abrasivo

São apresentados nas figuras 24 à 26 os valores de perdas de massa obtidos no ensaio de desgaste abrasivo. Verifica-se que estes valores estão bastante próximos, independente da frequência de tratamento. A perda de massa em relação a amostra não nitretada foi um pouco menor do que o AISI 4340, quando comparada com a amostra sem nitretar. Tal fato demonstrou a eficiência da Nitretação por Plasma para melhorar a resistência ao desgaste abrasivo. Assim como o AISI 4340, o aumento do tempo de tratamento levou a uma menor perda de massa.

Figura 24 - Desgaste Abrasivo do aço AISI 4140 nitretado durante 2 horas

Figura 25 - Desgaste Abrasivo do aço AISI 4140 nitretado durante 4 horas

Figura 26 - Desgaste Abrasivo do aço AISI 4140 nitretado durante 6 horas

IV. 4.3. Metalografia

A figura 27 abaixo ilustra uma micrografia do aço AISI 4140 nitretado durante 4 horas em 2KHz. Observando esta figura podemos verificar um aspecto bastante semelhante a camada composta do aço AISI 4340. A camada composta apresenta-se com pequenas ramificações para o interior da camada de difusão.

18 μm

Figura 27 - Micrografia do aço AISI 4140 nitretado durante 4 horas, em 2 KHz à 550°C

IV.5. Aço AISI 5140

IV.5.1. Ensaio de Microdureza

São apresentados nas figuras 28 à 30 os resultados dos ensaios de microdureza realizados nas amostras nitretadas.

Observando estas figuras pode-se verificar que a variação da frequência praticamente não exerceu influência na dureza das amostras nitretadas. Observou-se um aumento de dureza com o aumento do tempo de nitretação.

Figura 28 - Ensaio de Microdureza do aço AISI 5140 nitretado durante 2 horas

Figura 29 - Ensaio de Microdureza do aço AISI 5140 nitretado durante 4 horas

Figura 30 - Ensaio de Microdureza do aço AISI 5140 nitretado durante 6 horas

Na tabela 8 estão descritos os resultados das espessuras das camadas compostas do AISI 5140.

Tabela 8 – Espessura de camada composta para o Aço AISI 5140

2 horas	Espessura (μm)	4 horas	Espessura (μm)	6 horas	Espessura (μm)
10 KHz	17	10 KHz	19	10 KHz	22
2 KHz	18	2 KHz	22	2 KHz	23
CC	22	CC	22	CC	24

Observando a tabela 8 podemos observar que as amostras nitretadas obtiveram valores elevados de espessura de camada composta, com 2 horas de nitretação já foi possível obter camadas de 22 μm , no entanto, para 6 horas de tratamento a espessura atingida foi 24 μm . Tal fato evidencia o modelo de nitretação proposto por Kolbel onde no início do processo, devido a maior concentração de átomos de ferro na superfície, a formação de nitretos ocorre de forma imediata e em grande quantidade. Com o decorrer do tempo, a concentração diminui, pois a superfície fica coberta por uma camada de nitretos, ocorrendo uma diminuição na taxa de crescimento da camada branca.

Os valores de espessura de camada branca para o AISI 5140 foram os maiores dentre todos os aços estudados.

IV.5.2. Ensaio de Desgaste Abrasivo

As amostras do AISI 5140 apresentaram comportamento semelhante ao AISI 4140 e 4340, ou seja, a perda de massa foi em torno da metade da amostra revenida, evidenciando o papel da camada composta na resistência ao desgaste. A variação da frequência também não exerceu influência sobre a perda de massa no ensaio de desgaste abrasivo. Também, conforme o esperado, as amostras com 6 horas perderam menos massa do que as amostras com 4 horas. Nas figuras 31 à 33 pode-se observar estes resultados.

Figura 31 - Desgaste Abrasivo do aço AISI 5140 nitretado durante 2 horas

Figura 32 - Desgaste Abrasivo do aço AISI 5140 nitretado durante 4 horas

Figura 33 - Desgaste Abrasivo do aço AISI 5140 nitretado durante 6 horas

I V. 5.3. Metalografia

Na figura 34 pode-se observar uma micrografia da camada do aço AISI 5140 nitretado com 2 horas em CC. O aspecto da camada composta difere bastante daquele observado para o AISI 4140 e AISI 4340. A camada do AISI 5140 é mais homogênea e uniforme podendo observar com clara nitidez o final da camada composta (branca) e o início da camada de difusão.

18 μm

Figura 34 - Micrografia do aço AISI 5140 nitretado durante 2 horas em CC

IV.5.4. Ensaio de Raios-X

Na figura 35 abaixo pode-se verificar o difratograma do ensaio de raios-X para o aço AISI 5140 nitretado durante 2h em CC.

Analizando-se o difratograma pode-se verificar a presença de uma camada composta polifásica com a presença das fases ϵ e γ' .

Figura 35 - Ensaio de Raios-X do aço AISI 5140 nitretado durante 2h em CC

IV.6. Aço 300M nitretado em 550 °C

IV.6.1. Ensaaios de Microdureza

São apresentados nas figuras 36 à 38 os resultados dos ensaios de microdureza realizados nas amostras nitretadas em 550 °C.

Observando estas figuras pode-se verificar que a variação da frequência não exerceu influência significativa na dureza das amostras nitretadas. No entanto, para os tratamentos efetuados durante 4 horas em 10 KHz e 6 horas em CC, observou-se a formação de uma camada composta dupla, as quais apresentaram valores elevados de dureza. Observou-se também o aumento de dureza com o aumento do tempo de nitretação em todas as condições de tratamento.

Os valores de dureza para o aço 300M na camada de compostos são os maiores dentre todos aços estudados. Isto evidencia o papel dos elementos de liga Cromo, Molibdênio e Vanádio na formação de nitretos que promovem o maior endurecimento superficial.

Figura 36 - Microdureza do aço 300M nitretado durante 2 horas em 550 °C

Figura 37 - Microdureza do aço 300M nitretado durante 4 horas em 550 °C

Figura 38 - Microdureza do aço 300M nitretado durante 6 horas em 550 °C

Na tabela 9 estão apresentados os valores de espessura de camada composta obtidos para o 300M nitretado em 550 °C.

Tabela 9 – Espessura camada composta para o Aço 300M – 550 °C

2 horas	Espessura (μm)	4 horas	Espessura (μm)	6 horas	Espessura (μm)
10 KHz	8	10 KHz	14 (7+7)	10 KHz	14
2 KHz	6	2 KHz	13	2 KHz	13
CC	7	CC	14	CC	30 (14+16)

Para 2 horas de tratamento podemos verificar que a variação da frequência praticamente não exerceu influência na espessura de camada composta.

Para 4 horas observou-se um comportamento semelhante para todas as frequências utilizadas porém, em 10 KHz ocorreu a formação da camada composta dupla. Tal fato ocorreu também para amostra nitretada em 6 horas em CC, sendo que, para 4 horas observou-se duas camadas distintas, com cerca de 7

μm cada uma, enquanto que, para amostra com 6 horas, estas camadas apresentaram espessuras de 14 e 16 μm . Nas figuras 42 à 45, apresentadas adiante, pode-se observar as micrografias que ilustram estas camadas.

IV.6.2. Ensaio de Desgaste Abrasivo

Nas figuras 39 a 41 estão apresentados os gráficos dos resultados obtidos nos ensaios de desgaste abrasivo.

Observando estes gráficos, podemos verificar que as amostras do aço 300M nitretado em 550 °C que apresentaram o fenômeno da camada composta dupla foram as que obtiveram melhor desempenho em relação a perda de massa. A amostra nitretada com camada dupla com 6 horas e CC, figura 41, perdeu cerca de menos da metade de massa do que a amostra não nitretada (somente revenida). Outro fato interessante foi que a amostra do 300M nitretado em 10 KHz durante 4 horas, que também formou camada dupla, perdeu menos massa do que a amostra do 300M nitretada em 10 KHz durante 6 horas, evidenciando o excelente desempenho desta camada no desgaste abrasivo. Nas demais condições de tratamento a perda de massa não foi tão expressiva em relação a amostra não nitretada.

Figura 39 - Desgaste Abrasivo do aço 300M nitretado 2 horas à 550 °C

Figura 40 - Desgaste Abrasivo do aço 300M nitretado 4 horas à 550 °C

Figura 41 - Desgaste Abrasivo do aço 300M nitretado 6 horas à 550 °C

IV. 6.3. Metalografia

Nas figuras 42 e 43 pode-se observar nitidamente nas micrografias a camada composta dupla formada nas duas condições de tratamento. Tal fato é inédito não sendo encontrado na literatura fenômeno semelhante. O Silício, Molibdênio e Vanádio são os elementos químicos que diferem dos demais aços, podendo ser atribuída a presença deles na camada a explicação para a ocorrência da camada dupla.

Nas figuras 44 e 45 observar-se a camada composta dupla juntamente com a camada de difusão.

18 μm

Figura 42 - Micrografia do aço 300M nitretado durante 4 horas, 10 KHz à 550°C

18 μm

Figura 43 - Micrografia do aço 300M nitretado durante 6 horas, CC à 550°C

44 μm

Figura 44 - Micrografia do aço 300M nitretado durante 4 horas, 10 KHz à 550°C

88 μm

Figura 45 - Micrografia do aço 300M nitretado durante 6 horas, CC à 550°C,

IV. 6.4. Ensaio de Raios X

A análise dos difratogramas, figuras 46 e 47, mostra que as camadas compostas dupla são polifásicas, porém, estas amostras foram as que obtiveram melhor desempenho no ensaio de desgaste abrasivo. Provavelmente a elevada espessura das camadas aliada ao alto valor de dureza sejam responsáveis pela menor perda de massa, pois, segundo a literatura, camadas polifásicas não são favoráveis para uma boa resistência ao desgaste.

Figura 46 - Ensaio de Raios-X do aço 300M nitretado durante 6 horas em CC à 550°C

Figura 47 - Ensaio de Raios X do aço 300M nitretado durante 4 horas em 10 KHz e 550°C

IV. 6.5. Análise por Microsonda

Na figura 48 pode-se observar a região percorrida pela microsonda na técnica de varredura em linha. Na figura 49 estão apresentados os perfis de concentração obtidos na varredura efetuada na região da camada nitretada do aço 300M nitretado em CC durante 6 horas que formou a camada composta dupla.

Observando estes resultados podemos verificar a presença de grande quantidade de nitrogênio na região próxima à superfície e pouca quantidade de ferro. A quantidade de nitrogênio vai diminuindo com o aumento da profundidade enquanto que a quantidade de ferro aumenta consideravelmente próximo a 36 μm , evidenciando o final da camada composta próximo a esta região e o início da camada de difusão.

Silício, Cromo e Níquel apresentam-se em menor quantidade na região próxima a superfície. No entanto, Cromo e Silício podem estar presentes na camada composta dupla na forma de nitretos.

Figura 48 – Imagem ilustrando a região percorrida pela microsonda na camada nitretada

Figura 49 – Perfis de concentração obtidos para o Níquel (Ni), Ferro (Fe), Cromo (Cr), Silício (Si) e Nitrogênio (N) nas camadas nitretadas.

IV.7. Aço 300M nitretado em 350 °C

IV.7.1. Ensaio de Microdureza

Nas figuras 50 à 52 apresenta-se os resultados obtidos nos ensaios de microdureza do aço 300M nitretado com 350 °C.

Observando estas figuras verifica-se que para baixos tempos de tratamento existe uma tendência das amostras nitretadas em CC apresentarem maior valor de dureza, porém tal fato está associado ao maior potencial de nitretação existente do plasma em corrente contínua. Para 6 horas de tratamento podemos verificar que a frequência praticamente não exerce nenhuma influência na dureza das camadas. Não foi observada a presença de camada composta devido a baixa temperatura de tratamento e tempo de nitretação que não propiciam a formação de nitretos em quantidade suficiente para a formação da camada. A dureza do substrato permaneceu em torno de 500 HV.

Figura 50 - Microdureza do aço 300M nitretado durante 2 horas - 350 °C

Figura 51 - Microdureza do aço 300M nitretado durante 4 horas - 350 °C

Figura 52 - Microdureza do aço 300M nitretado durante 6 horas - 350 °C

IV.7.2. Ensaio de Desgaste Abrasivo

Nas figuras 53 à 55 estão apresentados os resultados obtidos no ensaio de desgaste abrasivo para o aço 300M nitretado em 350 °C.

Observando estes gráficos verifica-se que para 2 horas de tratamento a amostra nitretada em CC apresentou melhor resultado. Para 4 e 6 horas os valores de perda de massa estão próximos não havendo uma grande diferença de perda de massa em relação a amostra apenas revenida. Porém, deve-se considerar que amostra que apresentou a menor perda de massa entre todos os aços na condição somente revenida (sem nitretação) foi justamente o aço 300M em 350 °C

Figura 53 - Desgaste Abrasivo do aço 300M nitretado com 2 horas à 350 °C

Figura 54 - Desgaste Abrasivo do aço 300M nitretado com 4 horas à 350 °C

Figura 55 - Desgaste Abrasivo do aço 300M nitretado com 6 horas à 350 °C

IV.7.3. Ensaio de Raios X

Na figura 56 tem-se o difratograma da amostra nitretada em 350 °C em CC do aço 300M. Pode-se verificar a presença de picos da fase γ' , evidenciando o início de formação desta fase mesmo com temperatura de tratamento de 350 °C.

Figura 56 - Ensaio de Raios X do aço 300M nitretado durante 6 horas, CC - 350°C

IV.8. Comparação entre os aços

A tabela 10 ilustra os valores de espessura de camada composta, máxima dureza superficial e dureza de núcleo dos aços utilizados para todas as condições de tratamento.

Tabela 10 – Valores de espessuras das camadas compostas, máximas durezas superficiais e durezas de substrato.

Tempo de Tratamento	Frequência	Espessura Camada Composta (μm)					Máxima Dureza Superficial (HV)					Dureza Substrato (HV)				
		300M 550 °C	300M 350 °C	4340	4140	5140	300M 550 °C	300M 350 °C	4340	4140	5140	300M 550 °C	300M 350 °C	4340	4140	5140
2 horas	10 KHz	8	NF	15	18	17	845	633,2	701	677,3	719,7	403,8	494	317	286,1	290
2 horas	2 KHz	6	NF	13	16	16	710	628	683,2	665,9	732,5	408,3	501	302,3	291	283
2 horas	CC	7	NF	14	18	22	836	689	654,7	677,3	737	401,3	490,4	295,3	306,2	288
4 horas	10 KHz	7+7	NF	15	19	19	849,9	671,5	745,8	773,2	745,8	396	508,7	301,3	315	292
4 horas	2 KHz	13	NF	13	17	22	802,3	654,7	677,3	687,8	722,1	404,9	501,2	317,6	309	281
4 horas	CC	18	NF	14	18	22	759,3	719,7	732,6	683,2	677,3	408,7	508,6	301,2	304,4	286
6 horas	10 KHz	14	NF	16	21	22	840,9	745,8	802,3	780,2	773,2	403,9	483	320	306,2	273,5
6 horas	2 KHz	13	NF	14	18	23	865,5	713,4	792,1	742,8	752,5	403,9	490,4	315	301	275,3
6 horas	CC	14+16	NF	16	20	24	890	739,1	754,7	712	710,6	401,3	491,4	286,1	317,8	284,6

Observando-se a tabela 10 verifica-se que com relação à espessura de camada composta o aço AISI 5140 foi o que apresentou os maiores valores, independente do tempo ou da frequência utilizados, salvo em relação ao 300M nitretado em 550 °C durante 6 horas em CC que formou a camada composta dupla com 30 μm de espessura. O aço 300M não formou camada composta em 350 °C e para 550 °C observou-se o aparecimento da camada composta dupla em duas condições de tratamento. Os aços AISI 4340 e 4140 tiveram menor influência do tempo de tratamento na espessura da camada composta sendo que o aço AISI 4140 apresentou espessuras superiores ao AISI 4340 e todas as condições.

Na figura 57 pode-se verificar a variação da espessura da camada composta com o tempo de tratamento para todas as condições.

Figura 57 – Variação da espessura da camada composta com o tempo de tratamento

Quanto a máxima dureza superficial pode-se verificar que o aço 300M nitretado em 550 °C apresentou os maiores valores. Os demais aços apresentaram valores semelhantes com um pequeno aumento para o AISI 5140. O 300M nitretado em 350 °C com 6 horas de tratamento conseguiu atingir valores de dureza do nível dos outros aços nitretados em 550 °C. De uma maneira geral aos aços nitretados em corrente pulsada apresentaram valores de dureza superiores as amostras nitretadas em CC.

A dureza do núcleo para o aço 300M nitretado em 350 °C ficou em torno de 500 HV em média enquanto que para 550 °C este valor permaneceu em torno de 400 HV comprovando o papel do Silício na resistência ao amolecimento em temperaturas elevadas. Os aços AISI 4340 e 4140 apresentaram resultados semelhantes entre si, com durezas de núcleo em torno de 300 HV. O aço AISI 5140 apresentou dureza um pouco menor, em torno de 280 HV, o que já era esperado devido a menor quantidade de elementos de liga do mesmo.

IV.8.1. Ensaio de Microdureza

Nas figuras 58 à 66 estão apresentados os perfis de microdureza obtidos para os aços nas 9 condições de tratamento utilizadas. Plotou-se curvas de todos os aços juntos em cada condição de tratamento para uma melhor visualização durante a comparação.

Figura 58 - Ensaio de Microdureza do aço nitretados em 10 KHz e 2 horas

Figura 59 - Ensaio de Microdureza do aços nitretados em 10 KHz e 4 horas

Figura 60 - Ensaio de Microdureza do aços nitretado em 10 KHz e 6 horas

Figura 61 - Ensaio de Microdureza do aços nitretado em 2 KHz e 2 horas

Figura 62 - Ensaio de Microdureza do aços nitretado em 2 KHz e 4 horas

Figura 63 - Ensaio de Microdureza do aço nitretado em 2 KHz e 6 horas

Figura 64 - Ensaio de Microdureza do aço nitretado em CC e 2 horas

Figura 65 - Ensaio de Microdureza do aço nitretado em CC e 4 horas

Figura 66 - Ensaio de Microdureza do aço nitretado em CC e 6 horas

Analisando os gráficos das figuras 58 à 66 podemos verificar que o aço 300M nitretado à 550 °C obteve maior valor de dureza próximo a superfície entre todas as condições de tratamento.

Para valores de profundidade acima de 100 μm notamos a superioridade do 300M revenido à 350 °C com valores de dureza de substrato acima de 500 HV. Já o AISI 5140 apresentou os menores valores de dureza devido a sua menor quantidade de elementos de liga.

O AISI 4340 e 4140 variaram o comportamento conforme cada condição de tratamento, porém o AISI 4340 tende a apresentar sempre uma maior dureza próximo a superfície.

IV.8.2. Resultados do Ensaio de Desgaste Abrasivo

São apresentados a seguir os resultados dos ensaios de desgaste abrasivo para todos os aços estudados em função dos tempos de tratamento.

IV.8.2.1. Amostras nitretadas com 2 horas

Na figura 67 estão apresentados os resultados de perda de massa total obtidos a partir do ensaio de desgaste abrasivo tipo pino-sobre-disco. A perda de massa total de cada amostra está apresentada em gramas para cada condição de tratamento. No entanto, estes valores não podem ser comparados com os obtidos em 4 e 6 horas pois o abrasômetro utilizado foi diferente.

Figura 67 - Perda de Massa Total para as amostras nitretadas durante 2 horas

Para 2 horas de tratamento verifica-se que os valores de perda de massa estão semelhantes para todos os aços.

Os aços AISI 5140, 4340 e 4140 perderam cerca de 40 % menos massa quando comparados as suas amostras ensaiadas sem nitretação (somente revenidas). Os bons resultados dos aços AISI 5140 e 4140 podem ser explicados pelos valores elevados de espessura de camada composta obtidos para 2 horas de tratamento, a amostra nitretada em CC do AISI 5140 por exemplo, apresentou 22 μm de espessura. Já as camadas do aço AISI 4340, apesar de não apresentarem

espessuras tão elevadas, tiveram durezas elevadas. O aço 300M nitretado em 550 °C apresentou os maiores valores de dureza nas camadas, porém as espessuras destas foram bastante inferiores aos demais aços, sendo assim, seu resultado não foi tão bom, sua perda de massa foi em torno de 27 % em relação a amostra revenida. O aço 300M nitretado em 350 °C apresentou perdas de massa semelhante aos demais aços mesmo sem formação de camada composta. As amostras em todas as condições de tratamento perderam cerca de 20 % menos massa quando comparado a amostra não nitretada comprovando a eficiência da dureza do substrato no sentido de garantir boas propriedades em relação ao desgaste.

IV.8.2.2. Amostras nitretadas com 4 e 6 horas

Nas figuras 68 e 69 estão apresentados os gráficos de perda de massa total para as amostras nitretadas em 4 e 6 horas.

Figura 68 - Perda de Massa Total para as amostras nitretadas durante 4 horas

Figura 69 - Perda de Massa Total para as amostras nitretadas durante 6 horas

Observando as figuras 68 e 69 pode-se verificar que para todos os aços a perda de massa em relação a amostra não nitretada (somente revenida) é significativa, comprovando a eficiência do tratamento de nitretação por plasma para garantir melhores propriedades em relação ao desgaste.

O aço AISI 4340 apresentou um bom desempenho devido ao valor elevado de dureza das suas camadas enquanto que o bom resultado do AISI 5140 pode ser explicado pelas espessuras elevadas das camadas compostas. O AISI 4140 apresentou durezas pouco menores que o AISI 4340 mas suas espessuras de camada composta foram maiores o que levou a resultados semelhantes para esses dois aços. O aumento do tempo de tratamento levou a uma menor perda massa para todos os aços mas a variação da frequência não demonstrou exercer grande influência.

O aço 300M nitretado a 550 °C apresentou excelentes propriedades em relação ao desgaste abrasivo, quando comparado aos demais aços, no caso

das amostras que formaram camada dupla a 550 °C, 10 KHz – 4 horas e CC – 6 horas. O melhor resultado observado no ensaio de desgaste abrasivo ocorreu para o aço 300M nitretado em CC durante 6 horas que formou camada composta dupla com uma espessura total de 30 μm e obteve uma perda de massa 52 % menor do que a amostra não nitretada. Tal fato demonstra o excelente resultado da camada composta dupla no ensaio de desgaste abrasivo

O aço 300M nitretado a 350 °C apresentou valores de perdas de massa semelhantes aos outros aços mesmo sem a formação de camada composta. A dureza de núcleo com valores cerca de 200 HV acima das durezas de núcleo dos demais aços foi efetiva para garantir este resultado. A perda de massa foi de aproximadamente 25 % relação a amostra não nitretada em 6 horas de tratamento.

V.CONCLUSÃO

- Os aços AISI 4340, 4140, 5140 nitretados em 550 °C apresentaram desempenho semelhante ao aço 300M nitretado em 350 °C no ensaio de desgaste abrasivo.
- O tratamento de nitretação por plasma demonstrou ser bastante efetivo para conferir resistência ao desgaste abrasivo para os aços AISI 4340, 4140, 5140 e 300M nitretados em 550 °C.
- A nitretação por plasma garantiu boas propriedades de resistência ao desgaste abrasivo para os aços de alta-resistência em todas as condições de tratamento.
- Dureza do substrato elevada foi eficiente para garantir boas propriedades em relação ao desgaste abrasivo para o aço 300M nitretado em 350 °C.
- O aumento do tempo de tratamento garantiu maiores valores de espessuras das camadas nitretadas e maiores valores de dureza em todos os aços estudados.
- A variação da frequência não proporcionou variações significativas nas propriedades das camadas nitretadas.
- A camada composta dupla obteve excelente resultado no ensaio de desgaste abrasivo.

VI. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1) Caracterizar a camada composta dupla e estudar seu mecanismo de formação
- 2) Estudar o comportamento destes aços utilizando ensaio de desgaste adesivo
- 3) Nitretar o aço 300M à 350 °C com tempos de tratamento superiores a 10 horas
- 4) Analisar as amostras submetidas ao ensaio desgaste abrasivo em MEV
- 5) Estudar a influência dos elementos de liga na camada nitretada, principalmente o Silício.

VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADVANCED HEAT TREAT CORP. (1997). Ultra Glow Ion Nitriding. Ohio. /folder/
- ALVES JR, C. (1995) *Nitreção por plasma pulsado: Equipamento, preparação e caracterização das camadas nitretadas*. São Carlos 176p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1990). ASTM G99-90 - Standard Test Method for Wear Testing With a Pin-On-Disk Apparatus. In: *Annual book of ASTM standards*. Philadelphia p. 387-391.
- CECCHI, JOSEPH L. (1990). Introduction to plasma concepts and discharge configurations. In: ROSSNAGEL, STEPHEN M.; CUOMO, JEROME J.; WETWOOD, WILLIAM D., coords. *Handbook of plasma processing technology: fundamentals, etching, deposition, and surface interactions*. Np, New Jersey. Cap.2, p. 14-67.
- DRESSLER, SIDNEY (1989). Plasma Treatments. IN: *Surface Modification Technologies* (Sudarchan, T. S.) Cap: 5. Marcel Dekker, INC. New York and Basel.
- DRESSLER, SIDNEY. (1990). Plasma parameter control for industrial situations: the role of hot wall plasma nitriding furnaces.. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ION NITRIDING /CARBURIZING, 2nd, Cincinnati, 1989. *Anais*. Proceeding Materials Park, ASM International, 1989, p.183-193.
- EBRAHIME, Z. F. (1983). The Evaluation of Tempered Martensite Embrittlement in 4130 Steel by Instrumented Charpy V-Notch Testing, *Metallurgical Transactions A*, v. 14 A, p. 1109, june.
- EDENHOFER, B. ET AL. (1973). Low temperature ion-nitriding at temperatures below 500 °C for tools and precision machine parts, In: *Heat Treatment'73*, The Metals Society, London, 12-13, p. 7, dec.
- EDENHOFER B. (1974a). Physical and metalurgical aspects of ionitriding. *Heat treatment of metals*. part.1, v.1, p. 23-28.

- EDENHOFER B. (1974b). Physical and metalurgical aspects of ionitriding. *Heat treatment of metals*. part.2, v.2, p. 59-67.
- EDENHOFER B. (1976) Production ionitriding. *Metal Progress*, mar., v.109, N° 3, p. 38-42.
- EYRE, T. S. (1978). Wear characteristics of metals. In: *Source book or wear control technology*. Metals Park. Ohio, American Society for Metals. p. 1-10.
- EYRE, T.S. (1991). Friction and wear control in industry. *Surface Engineering*, p. 143, march.
- GARH, K. H. Z. (1987). *Microstructure and Wear of material.*, New York, Elsevier, v. 10, p. 559
- HOWATSON, A.M. (1965). *Descargas electras en gases*. Madrid, Urmo, p. 198.
- HUCHEL, U. e DRESSLER, S. (1995). Nitretação por plasma pulsado para indústria automotiva - Experiência de produção. *Anais do I Seminário Internacional de Engenharia de Superfície*. Mogi das Cruzes, p. 13.
- INAL, O. T.; OZBAYSAL, K.; METIN, E. S.; PEHLINVANTURK, N. Y. (1990). A review of plasma surface modification: process, parameters, and microstructural characterization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ION NITRIDING /CARBURIZING, 2nd, Cincinnati, 1989. *Anais Proceeding Materials Park, ASM International*, 1989, p.57-66.
- KOVACS, WILLIAM L. (1990). Comercial and economic trends in ion nitriding/carburizing; In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ION NITRIDING/CARBURIZING, 2nd, Cincinnati, 1989. *Anais. Proceeding Materials Park, ASM International*, 1989, p.5-17.
- KRIM, J. (1996). Friction in Atomic Scale. *Scientific American*, p. 48-56.
- KUPPUSAMI, P.; TERRANCE, A. L. E.; SUNDARARAMAN, D.; RAGHUNATHAN, V. S. (1993). Kinetics of growth of plasma nitrided layers on a titanium modified stainless steel. *Surfeca Engineering*, v. 9, n. 2, p.142-147.
- McMAHON, C. J. ET AL (1983a). The Micro-Mechanisms of Tempered Martensite Embrittlement in 4130-Type Steels. *Metallurgical Transactions A*, v. 14 A, p. 1313, july.
- McMAHON, C. J. ET AL (1983b). The Effects of Tempering Reactions on Temper Embrittlement of Alloy Steels, *Metallurgical Transactions A*, v. 14 A, p. 1101, june.

- MOORE, M. A. (1979) Abrasive wear. In: *TREATISE on Materials Science and Technology*, v. 13, Academic press, p. 217-257.
- O'BRIEN, JAMES M. (1991) Plasma (ion)nitriding. *Metals Handbook ASM*. v.4, p. 420-424.
- PETERSON, M.B. (1980). Classification of wear process. In: PETERSON, M.B. & Winer, W.O. , coords. *Wear control Handbook*. ASME, New York, p. 9-15.
- PICKERING, F.B. (1978). *Physical Metallurgy and the Design of Steels*, Applied Science Publishers LTD, London, p. 127-133.
- RITCHIE, R. O ET AL (1978). Mechanisms of Tempered Martensite Embrittlement in Low Alloys Steels, *Metallurgical Transactions A*, v. 9 A, aug. 1978, p. 1039.
- ROSSNAGEL, S. M.; CUOMO, J.J. ; WESTWOOD, W. D. (1989). *Handbook of Plasma Processing Technology - fundamentals, etching, depositions and surface interactions*. New Jersey, Noyes, p. 523.
- SUCHENTRUNK, R. et al (1999). Plasma surface engineering - innovative process and coating system for high-quality products. *Surface and Coatings Technology*, v. 112, p.351-357, feb.
- SHACKELFORD, J. F. (1996). *Introduction to Material Science for Engineers*. 4 ed. New Jersey, Prentice Hall, p. 670.
- SHOHET, J. L. (1991). Plasma-aid manufacturing. *IEEE Transactions on Plasma Science*, v. 19, n. 5, p. 725-733.
- THORNTON, J. A. (1982). Plasma in deposition process. In : BUNSHAH, R. F. (Coord.) *Deposition technologies for films and coatings*. New Jersey, USA : Noyes Publication, p. 19-62.
- TOTTEN, G. E. ; HOWES, M.A.H. (1997). *Steel Heat Treatment Handbook*. New York, Marcel Dekker, p. 721.
- TYLCZAK, J. ; ALBANY, O. (1992). Abrasive Wear. In: *ASM Handbook; Friction Lubrication and Wear Technology*. ASM International, v. 18 p. 184-190.

APÊNDICE 1 - Resultados do ensaio de Microdureza

ENSAIO DE MICRODUREZA PARA AMOSTRAS NITRETADAS COM 10 KHz					
4340 - 10 KHz - 2h		4340 - 10 KHz - 4h		4340 - 10 KHz - 6h	
Profundidade (µm)	Dureza (HV)	Profundidade (µm)	Dureza (HV)	Profundidade (µm)	Dureza (HV)
9	701	10	745,8	8	802,3
38	582,3	28	552,8	17	802,3
69	501	49	570,8	28	665,9
116	483	75	574,8	58	574,8
182	411,1	112	497,6	86	552,8
255	359,3	156	447,1	105	552,8
340	341,9	225	434,9	121	540,2
402	322	304	378,5	149	486,8
476	317	402	334,4	248	407,8
		510	311,5	331	369
				405	388,7
				489	345,6
núcleo	317,2	núcleo	301,3	núcleo	320
espessura camada branca : 15 µm		espessura camada branca : 15 µm		espessura camada branca : 16 µm	
300M - 550 °C - 10 KHz - 2h		300M - 550 °C - 10 KHz - 4h		300M - 550 °C - 10 KHz - 6h	
Profundidade (µm)	Dureza (HV)	Profundidade (µm)	Dureza (HV)	Profundidade (µm)	Dureza (HV)
8	845	10	849,9	9	840,9
10	755	28	622,9	32	752
12	710	55	540,1	37	695
15	710	80	520,2	62	689
20	518	120	501,2	81	677,3
32	530	159	486,8	126	565,9
65	504	213	450,2	188	497,6
88	504	268	434,9	231	473,9
124	456	349	429	283	453,4
212	416	420	423,3	341	420,4
288	406,3	524	420,1	422	416
núcleo	403,8	núcleo	396	núcleo	403,9
espessura camada branca : 8		espessura camada branca : 14		espessura camada branca : 14	
300M - 350 °C - 10 KHz - 2h		300M - 350 °C - 10 KHz - 4h		300M - 350 °C - 10 KHz - 6h	
Profundidade (µm)	Dureza (HV)	Profundidade (µm)	Dureza (HV)	Profundidade (µm)	Dureza (HV)
8	633,2	11	671,5	12	745,8
29	579,4	35	557,1	31	588,6
53	548,6	62	548,6	42	561,5
91	544,4	89	548,6	68	548,6
137	512,3	139	548,6	133	536,1
198	505	187	524,1	187	532,1
288	505	241	516,3	199	516,3
359	501	304	512,5	259	516,3
411	501	377	512,5	317	508,7
		459	512,5	396	497
		581	512,5	483	490,4
núcleo	494	núcleo	508,7	núcleo	483
espessura camada branca : não formou		espessura camada branca : não formou		espessura camada branca : não formou	

ENSAIO DE MICRODUREZA PARA AMOSTRAS NITRETADAS COM 10 KHz					
4140 - 10 KHz - 2 h		4140 - 10 KHz - 4h		4140 - 10 KHz - 6h	
Profundidade _i (μm)	Dureza (HV)	Profundidade _i (μm)	Dureza (HV)	Profundidade _i (μm)	Dureza (HV)
7	677,3	15	773,2	8	780,2
36	396	23	671,5	31	649,2
72	483,3	43	548,6	57	638,5
109	434,9	75	512,5	88	568,4
173	378,5	108	476,4	126	479,8
258	330,4	152	453,4	171	469,7
390	304,4	197	429	222	434,9
492	284,5	263	393,5	284	396
		324	338,5	370	348,9
		419	322,7	481	336
		528	317,2	588	317,8
núcleo	286,1	núcleo	315	núcleo	306,2
espessura camada branca : μm		espessura camada branca : μm		espessura camada branca : μm	
5140 - 10 KHz - 2h		5140 - 10 KHz - 4h		5140 - 10 KHz - 6h	
Profundidade _i (μm)	Dureza (HV)	Profundidade _i (μm)	Dureza (HV)	Profundidade _i (μm)	Dureza (HV)
9	719,7	13	745,8	15	773,2
30	508,7	23	552,8	19	683,1
52	574,8	43	520,2	41	505
105	516,3	66	494,4	53	450,2
168	434,9	104	490,4	80	398,6
279	371,4	146	450,2	91	393,5
399	317	191	440,9	136	357,7
495	294,2	242	420,4	184	346,8
		334	373,7	250	328,5
		411	324,6	364	303,2
		519	319,6	442	283
núcleo	290	núcleo	292	núcleo	273,5
espessura camada branca : μm		espessura camada branca : μm		espessura camada branca : μm	

ENSAIO DE MICRODUREZA PARA AMOSTRAS NITRETADAS COM 2 KHz					
4340 - 2 KHz - 2h		4340 - 2 KHz - 4h		4340 - 2 KHz - 6 h	
Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)
9	683,2	7	677,3	9	792,1
21	595	23	643,8	21	628
34	517	49	622,9	37	593,4
56	501	73	548,6	58	557,1
82	432	107	512	81	557,1
118	416	149	444	107	505
180	395	190	440,9	157	453,4
254	357	245	376,1	194	434,9
308	342	299	366,7	244	385,9
344	320,2	368	341,8	313	353,9
		461	320,2	379	342,1
				458	335,2
				482	332,1
núcleo	302,3	núcleo	317,6	núcleo	315
espessura camada branca : 13 μm		espessura camada branca : 13 μm		espessura camada branca : 14 μm	
300M - 550 °C - 2 KHz - 2h		300M - 550 °C - 2 KHz - 4h		300M - 550 °C - 2 KHz - 6h	
Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)
10	710	10	802,3	10	865,5
13	665	17	643,8	28	759,3
17	518	36	665,9	46	689
25	530	54	649,2	64	643,8
32	530	92	598	88	617,8
48	530	123	520,2	114	612,8
67	468	160	468,8	144	570,3
101	468	203	459,8	185	501,5
131	421	259	453	227	497,6
255	416	334	453	286	450,2
301	417,2	424	447,1	330	450,2
				402	447,1
				462	436
núcleo	408,3	núcleo	404,9	núcleo	403,9
espessura camada branca : 6 μm		espessura camada branca : 13 μm		espessura camada branca : 13 μm	
300M - 350 °C - 2 KHz - 2h		300M - 350 °C - 2 KHz - 4h		300M - 350 °C - 2 KHz - 6h	
Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)
10	628	13	654,7	11	713,4
26	565,9	34	643,8	22	665,9
46	552,8	64	528,1	37	612,8
67	508,7	97	520,2	58	574,8
110	508,7	140	512,5	82	557,1
161	508,7	178	512,5	115	540,2
219	508,7	247	512,5	150	540,2
303	505	376	512,5	228	536
420	505	456	508,7	278	540,2
		576	508,7	374	536,1
				438	520,2
				532	512
núcleo	501	núcleo	501,2	núcleo	490,4
espessura camada branca : não formou		espessura camada branca : não formou		espessura camada branca : não formou	

ENSAIO DE MICRODUREZA PARA AMOSTRAS NITRETADAS COM 2 KHz					
4140 - 2 KHz - 2h		4140 - 2 KHz - 4h		4140 - 2 KHz - 6h	
Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)
9	665,9	9	687,8	11	742,8
34	490,4	33	494	32	544,4
70	466,3	59	508,7	57	532,1
121	398,6	135	490,4	83	520,2
200	355,4	206	453,4	115	494
302	311,4	263	447,1	154	490,4
424	297,6	362	426,1	210	463
		456	432	285	403,9
		501	406,3	371	396
		595	348,5	458	366,4
				562	330,2
núcleo	291	núcleo	309	núcleo	301
espessura camada branca : 16 μm		espessura camada branca : 17 μm		espessura camada branca : 18 μm	
5140 - 2 KHz - 2h		5140 - 2 KHz - 4h		5140 - 2 KHz - 6h	
Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)
9	732,5	14	722,1	10	752,5
33	473	39	617,8	24	578,3
65	516,3	77	483,3	47	494
101	453,4	118	439,8	66	428,3
172	390,9	192	372,6	102	423,3
253	317	262	371,4	140	417,6
341	309,7	346	346,3	191	406,6
457	288,3	458	328,5	245	396
				299	357,7
				355	306,2
				413	288,1
				511	284,6
núcleo	283	núcleo	281	núcleo	275,3
espessura camada branca : 16 μm		espessura camada branca : 22 μm		espessura camada branca : 23 μm	

ENSAIO DE MICRODUREZA PARA AMOSTRAS NITRETADAS em CC					
4340 - CC - 2h		4340 - CC - 4h		4340 - CC - 6h	
Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)
10	654,7	7	732,6	9	654,7
37	530,2	24	622,9	22	612,8
68	466,3	48	593,4	46	524,1
107	429	87	512,5	100	453,4
167	390,9	138	466,3	127	447,1
247	344,7	196	398,6	173	403,9
337	340,5	260	369	234	383,4
415	320,8	325	353,2	302	355,4
468	303	403	313,4	380	324,6
		494	304,5	459	295,9
				503	292,6
núcleo	295,3	núcleo	301,2	núcleo	286,1
espessura camada branca : 14 μm		espessura camada branca : 14 μm		espessura camada branca : 16 μm	
300M - 550 °C - CC - 2h		300M - 550 °C - CC - 4h		300M - 550 °C - CC - 6h	
Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)
7	836	9	759,3	6	794,9
12	760	17	665,9	19	780,4
16	637	35	633,2	37	617,2
22	539	53	544,4	59	540,2
44	497	94	532,1	98	494
55	485	146	494	148	456,6
73	461	189	459,8	240	440,9
95	428	246	434,8	312	403,9
175	418	300	414,9	399	390,9
247	416,6	384	401,3	480	396
303	414,9	483	391		
núcleo	401,3	núcleo	408,7	núcleo	401,3
espessura camada branca : 7 μm		espessura camada branca : 18 μm		espessura camada branca : 30 μm	
300M - 350 °C - CC - 2h		300M - 350 °C - CC - 4h		300M - 350 °C - CC - 6h	
Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)
8	689	14	719,7	9	739,1
20	643,8	33	622,9	25	628
42	536,1	73	561,5	42	588,6
65	532,1	116	516,3	67	561,5
105	524,1	168	516,3	90	557,1
147	512,5	231	520,2	123	532,1
218	501,2	301	508,7	152	524,2
307	505	390	508,7	192	520,2
402	501,2	464	508,7	230	516
		570	505	283	508,7
				385	501
				478	494,4
núcleo	490,4	núcleo	508,6	núcleo	491,4
espessura camada branca : não formou		espessura camada branca : não formou		espessura camada branca : não formou	

ENSAIO DE MICRODUREZA PARA AMOSTRAS NITRETADAS em CC					
4140 - CC - 2h		4140 - CC - 4h		4140 - CC - 6h	
Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)
10	677,3	7	683,2	10	712
33	532,1	19	548,7	25	617,8
63	532,1	42	506,5	61	560,3
100	532,1	68	490,4	95	531
159	429	118	388,4	131	480,3
232	385,9	154	401,3	158	473,2
336	308	238	366,7	206	444
446	306,2	344	382,1	277	417,5
		431	362,1	357	388,2
		567	357,3	472	357,7
				555	320,2
núcleo	306,2	núcleo	304,4	núcleo	317,8
espessura camada branca : 18 μm		espessura camada branca : 18 μm		espessura camada branca : 20 μm	
5140 - CC - 2h		5140 - CC - 4h		5140 - CC - 6h	
Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)	Profundidade (μm)	Dureza (HV)
6	737	10	677,3	9	710,6
13	694	26	473	22	577,5
27	601	57	463	51	508,7
39	539	97	450,2	68	444
59	486	141	434,9	95	432,2
87	473	194	380,9	133	416
118	418	256	353,2	172	403,2
184	408	358	318,9	231	388,4
276	331	464	295,9	295	360,1
385	303			366	342,6
				419	317,6
				486	301
núcleo	288			núcleo	284,6
espessura camada branca : 22 μm		espessura camada branca : 23 μm		espessura camada branca : 24 μm	

APÊNDICE 2 - Resultados de Desgaste Abrasivo - 2 horas

ENSAIOS DE DESGASTE DOS AÇOS 4140, 5140, 4340 E 300M NITRETADOS COM 2 HORAS				
	4340 - 2 KHz	4340 - 10 KHz	4340 - CC	4340 - revenido 550 °C - s/ nitretar
Nº Ciclos	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)
200	0,199	0,185	0,207	0,266
400	0,376	0,349	0,285	0,446
600	0,495	0,472	0,395	0,618
800	0,596	0,575	0,489	0,751
1000	0,717	0,687	0,583	0,912
1200	0,789	0,759	0,677	1,045
1400	0,855	0,821	0,781	1,141
1600	0,936	0,903	0,866	1,226
1800	1,014	0,985	0,946	1,301
2000	1,091	1,046	0,999	1,373
	300M - 550 C - 2 KHz	300M - 550 C - 10 KHz	300M - 550 C - CC	300M - rev. 550 C - s/nitretar
Nº Ciclos	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)
200	0,167	0,189	0,158	0,237
400	0,295	0,352	0,281	0,434
600	0,42	0,495	0,392	0,564
800	0,548	0,599	0,485	0,673
1000	0,626	0,691	0,58	0,751
1200	0,692	0,769	0,666	0,865
1400	0,759	0,853	0,723	0,964
1600	0,813	0,893	0,786	1,028
1800	0,856	0,964	0,833	1,085
2000	0,899	0,997	0,867	1,132
	300M - 350 °C - 2 KHz	300M - 350 °C - 10 KHz	300M - 350 °C - CC	300M - rev. 350 °C - s/ nitretar
Nº Ciclos	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)
200	0,205	0,187	0,193	0,209
400	0,334	0,303	0,322	0,329
600	0,419	0,392	0,393	0,426
800	0,465	0,454	0,438	0,512
1000	0,492	0,515	0,471	0,592
1200	0,512	0,561	0,496	0,655
1400	0,537	0,603	0,522	0,698
1600	0,565	0,638	0,541	0,739
1800	0,589	0,671	0,554	0,765
2000	0,609	0,688	0,567	0,793

	4140 - 2 KHz	4140 - 10 KHz	4140 - CC	4140 - revenido 550 °C - s/ nitretar
Nº Ciclos	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)
200	0,131	0,135	0,148	0,231
400	0,261	0,262	0,286	0,416
600	0,36	0,363	0,402	0,575
800	0,458	0,470	0,489	0,691
1000	0,511	0,532	0,555	0,85
1200	0,575	0,583	0,61	0,958
1400	0,655	0,625	0,679	1,115
1600	0,733	0,691	0,745	1,204
1800	0,794	0,762	0,798	1,292
2000	0,855	0,831	0,86	1,434
	5140 - 2 KHz	5140 - 10 KHz	5140 - CC	5140 - rev. 550 °C - s/ nitretar
Nº Ciclos	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)
200	0,133	0,154	0,125	0,247
400	0,237	0,284	0,217	0,401
600	0,313	0,368	0,285	0,586
800	0,379	0,445	0,36	0,761
1000	0,458	0,51	0,421	0,967
1200	0,543	0,599	0,505	1,121
1400	0,606	0,675	0,582	1,224
1600	0,67	0,749	0,644	1,348
1800	0,744	0,802	0,681	1,44
2000	0,799	0,843	0,738	1,522

APÊNDICE 3 - Resultados de Desgaste Abrasivo - 4 e 6 horas

ENSAIOS DE DESGASTE DOS AÇOS 4140, 5140, 4340 E 300M NITRETADOS COM 4 HORAS				
	4340 - 10 KHz	4340 - 2 KHz	4340 - CC	4340 - revenido 550 °C - sem nitretar
Nº Ciclos	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)
200	0,136	0,139	0,142	0,349
400	0,214	0,213	0,243	0,531
600	0,301	0,296	0,354	0,642
800	0,352	0,379	0,415	0,769
1000	0,456	0,444	0,455	0,895
1200	0,544	0,5	0,506	0,975
1400	0,581	0,546	0,527	1,046
1600	0,621	0,592	0,547	1,109
1800	0,662	0,639	0,587	1,165
2000	0,689	0,677	0,628	1,236
	300M - 550 C - 10 KHz	300M - 550 C - 2 KHz	300M - 550 C - CC	300M - rev. 550 C - sem nitretar
Nº Ciclos	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)
200	0,154	0,166	0,152	0,237
400	0,262	0,315	0,28	0,434
600	0,362	0,438	0,388	0,564
800	0,452	0,543	0,484	0,673
1000	0,506	0,622	0,557	0,751
1200	0,542	0,691	0,622	0,865
1400	0,633	0,744	0,687	0,964
1600	0,696	0,797	0,756	1,028
1800	0,75	0,849	0,799	1,085
2000	0,777	0,902	0,847	1,132
	300M - 350 °C - 10 KHz	300M - 350 °C - 2 KHz	300M - 350 °C - CC	300M - rev. 350 °C - sem nitretar
Nº Ciclos	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)
200	0,157	0,174	0,149	0,23
400	0,276	0,31	0,286	0,362
600	0,405	0,406	0,391	0,469
800	0,515	0,493	0,474	0,563
1000	0,571	0,561	0,549	0,651
1200	0,626	0,629	0,605	0,721
1400	0,672	0,677	0,651	0,768
1600	0,709	0,716	0,679	0,813
1800	0,736	0,745	0,753	0,842
2000	0,764	0,764	0,773	0,872

	4140 - 10 KHz	4140- 2 KHz	4140 - CC	4140 - revenido 550 °C - s/ nitretar
Nº Ciclos	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)
200	0,138	0,142	0,136	0,207
400	0,262	0,244	0,235	0,353
600	0,359	0,339	0,345	0,513
800	0,444	0,421	0,432	0,674
1000	0,531	0,5	0,495	0,792
1200	0,592	0,568	0,561	0,899
1400	0,649	0,633	0,642	1,065
1600	0,716	0,682	0,689	1,124
1800	0,761	0,734	0,735	1,188
2000	0,802	0,778	0,768	1,241
	5140 - 10 KHz	5140 - 2 KHz	5140 - CC	5140 - rev. 550 C - s/ nitretar
Nº Ciclos	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)
200	0,152	0,166	0,145	0,249
400	0,253	0,257	0,239	0,438
600	0,342	0,357	0,325	0,563
800	0,465	0,485	0,449	0,688
1000	0,553	0,551	0,539	0,802
1200	0,619	0,612	0,601	0,928
1400	0,7	0,704	0,672	1,029
1600	0,765	0,781	0,748	1,124
1800	0,815	0,855	0,796	1,212
2000	0,888	0,912	0,845	1,322

ENSAIOS DE DESGASTE DOS AÇOS 4140, 5140, 4340 E 300M NITRETADOS COM 6 HORAS				
	4340 - 10 KHz	4340 - 2 KHz	4340 - CC	4340 - revenido 550 °C - s/ nitretar
Nº Ciclos	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)
200	0,126	0,144	0,128	0,349
400	0,235	0,251	0,219	0,531
600	0,289	0,305	0,311	0,642
800	0,343	0,341	0,384	0,769
1000	0,379	0,377	0,43	0,895
1200	0,415	0,413	0,466	0,975
1400	0,46	0,448	0,484	1,046
1600	0,505	0,475	0,512	1,109
1800	0,541	0,511	0,539	1,165
2000	0,568	0,547	0,558	1,236
	300M - 550 °C - 10 KHz	300M - 550 °C - 2 KHz	300M - 550 °C - CC	300M - rev. 550 °C - s/nitretar
Nº Ciclos	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)
200	0,139	0,163	0,142	0,237
400	0,249	0,288	0,256	0,434
600	0,338	0,431	0,313	0,564
800	0,418	0,565	0,369	0,673
1000	0,527	0,671	0,388	0,751
1200	0,607	0,738	0,407	0,865
1400	0,706	0,824	0,483	0,964
1600	0,796	0,901	0,559	1,028
1800	0,856	0,958	0,606	1,085
2000	0,915	1,006	0,644	1,132
	300M - 350 °C - 10 KHz	300M - 350 °C - 2 KHz	300M - 350 °C - CC	300M - rev. 350 °C - s/ nitretar
Nº Ciclos	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)
200	0,166	0,171	0,149	0,23
400	0,323	0,305	0,28	0,362
600	0,444	0,399	0,354	0,469
800	0,536	0,485	0,42	0,563
1000	0,601	0,552	0,476	0,651
1200	0,638	0,619	0,532	0,721
1400	0,657	0,666	0,56	0,768
1600	0,675	0,705	0,578	0,813
1800	0,74	0,733	0,622	0,842
2000	0,777	0,752	0,737	0,872

ENSAIOS DE DESGASTE DOS AÇOS 4140, 5140, 4340 E 300M NITRETADOS COM 6 HORAS				
	4140 - 10 KHz	4140- 2 KHz	4140 - CC	4140 - revenido 550 °C - s/ nitretar
Nº Ciclos	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)
200	0,138	0,132	0,121	0,207
400	0,235	0,224	0,206	0,353
600	0,299	0,285	0,262	0,513
800	0,341	0,325	0,309	0,674
1000	0,398	0,376	0,357	0,792
1200	0,441	0,416	0,395	0,899
1400	0,505	0,478	0,454	1,065
1600	0,565	0,538	0,511	1,124
1800	0,622	0,589	0,560	1,188
2000	0,669	0,63	0,599	1,241
	5140 - 10 KHz	5140 - 2 KHz	5140 - CC	5140 - rev. 550 C - s/ nitretar
Nº Ciclos	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)	Δm (%)
200	0,136	0,128	0,124	0,249
400	0,241	0,202	0,196	0,438
600	0,303	0,257	0,25	0,563
800	0,356	0,302	0,294	0,688
1000	0,387	0,348	0,338	0,802
1200	0,46	0,385	0,375	0,928
1400	0,492	0,44	0,428	1,029
1600	0,523	0,486	0,536	1,124
1800	0,555	0,55	0,578	1,212
2000	0,589	0,614	0,606	1,322