



Universidade Federal do Paraná
Setor de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica
Laboratório de Tecnologia de Pós e Plasma

UFPR

LT2P

Laboratório de Tecnologia de Pós e Plasma

Tratamento de superfícies por plasma: uma introdução



Prof. Rodrigo Perito Cardoso

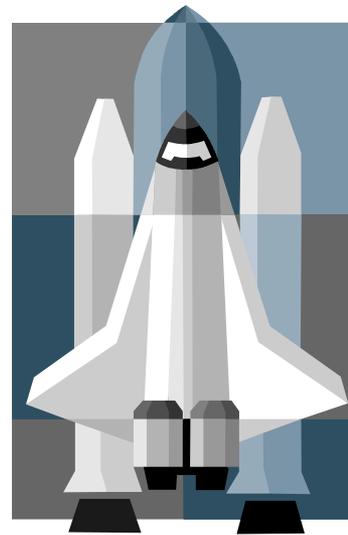
Objetivos

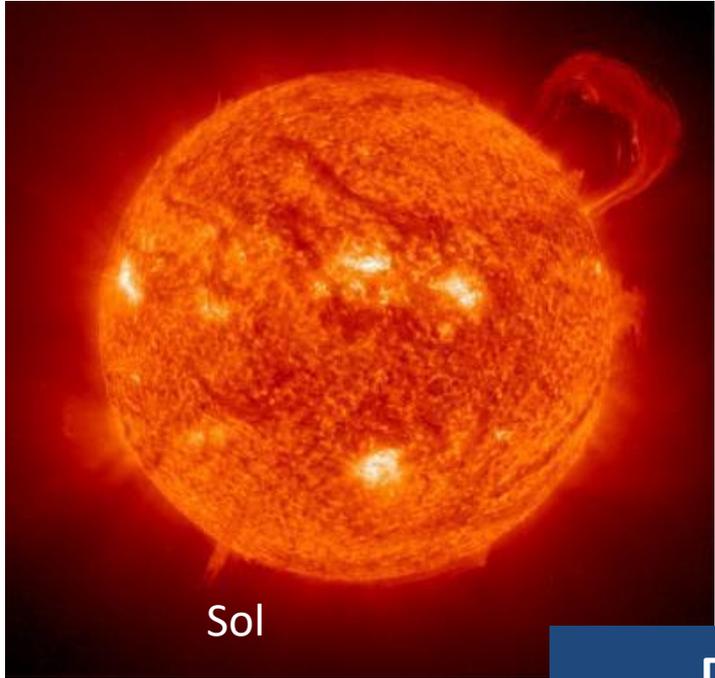
- Devido à grande diversidade de aplicações:
 - Apresentar aspectos fundamentais comuns aos diversos processos
- Para entender os tratamentos por plasma:
 - Apresentar uma visão generalizada sobre plasma
- Para entende porque os plasmas são úteis para tratamentos de superfícies:
 - Apresentar os principais fenômenos físicos e químicos dos plasmas e a interação plasma-superfície
- Apresentar uma aplicação de plasma DC:
 - Cementação a baixa temperatura do aço inoxidável AISI420

Plano da apresentação

- Parte 1
 - Introdução/Generalidades
 - Fundamentos de plasma
 - Como aplicar plasma no tratamento de superfícies
- Parte 2
 - Estudo de caso: Cementação a baixa temperatura do aço inoxidável AISI420

Onde encontramos Plasmas



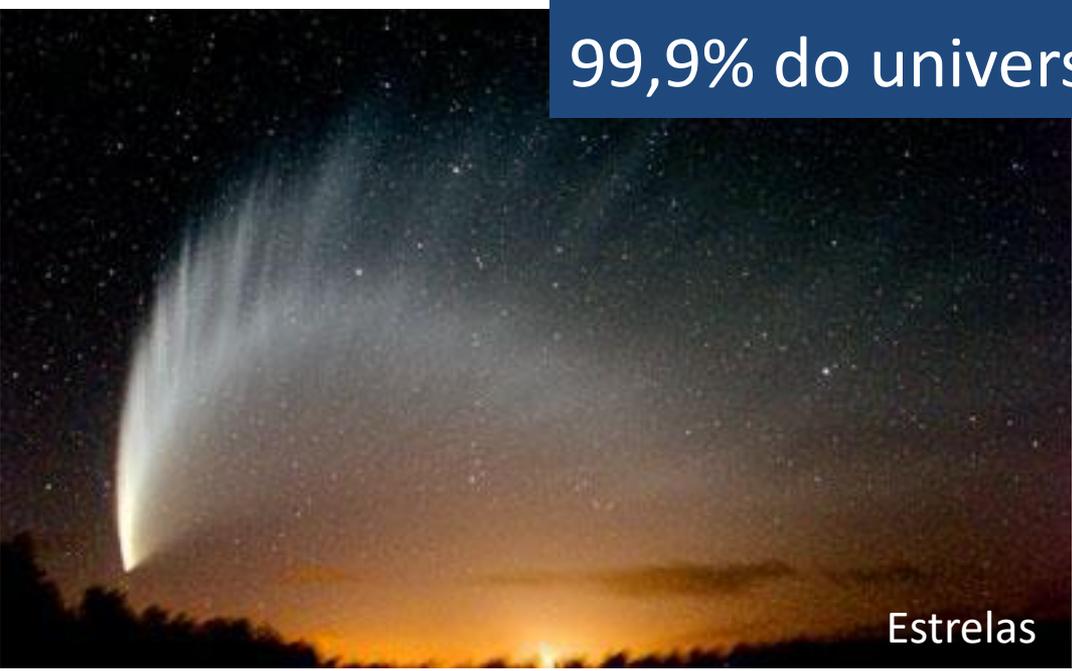


Sol



Aurora Boreal

Plasmas Naturais
99,9% do universo visível

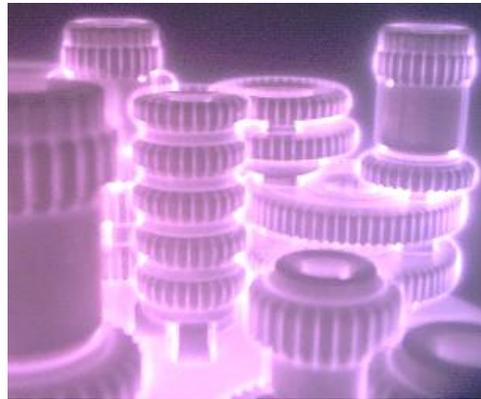
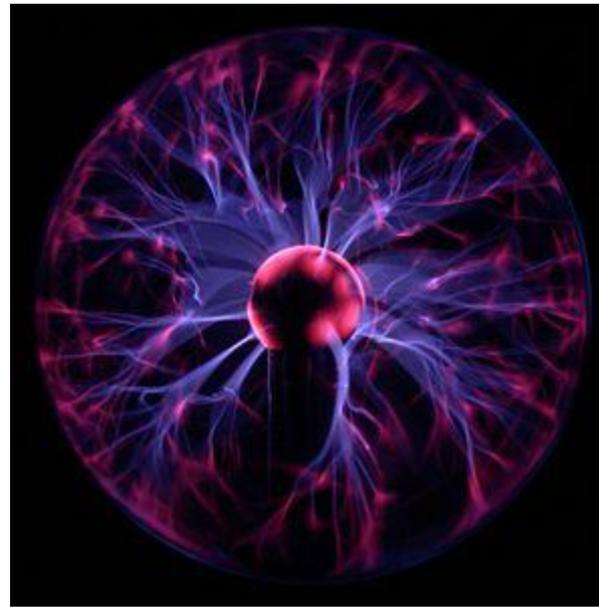


Estrelas

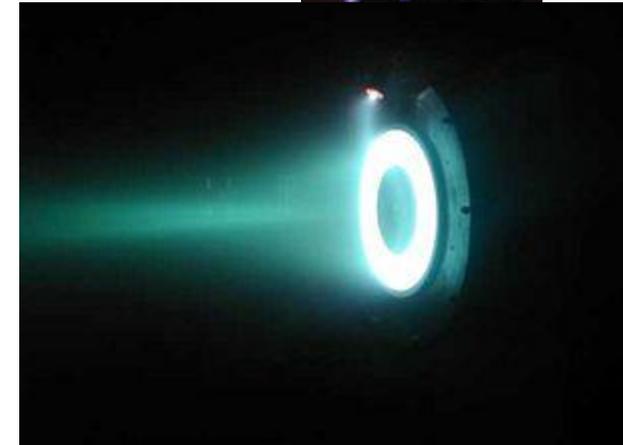


Raios

© JEFF SMITH 2006 WWW.LIGHTNINGSMITHS.COM



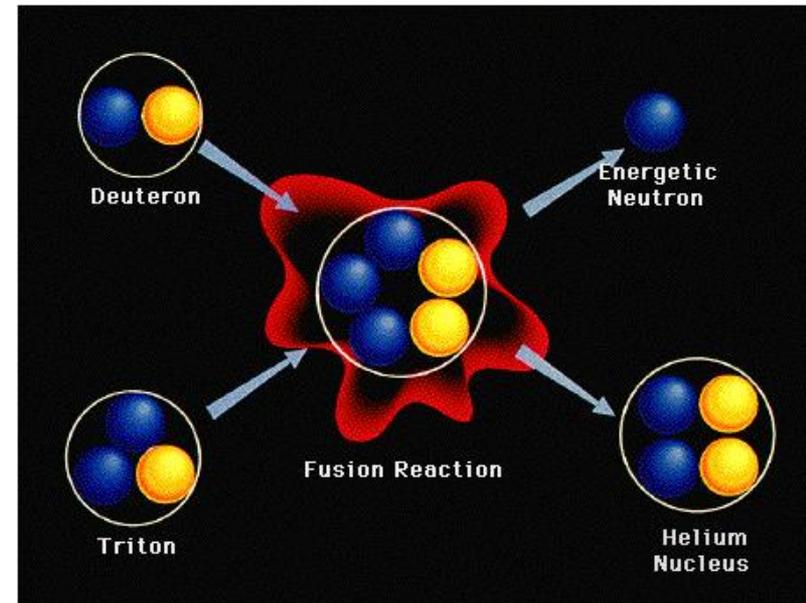
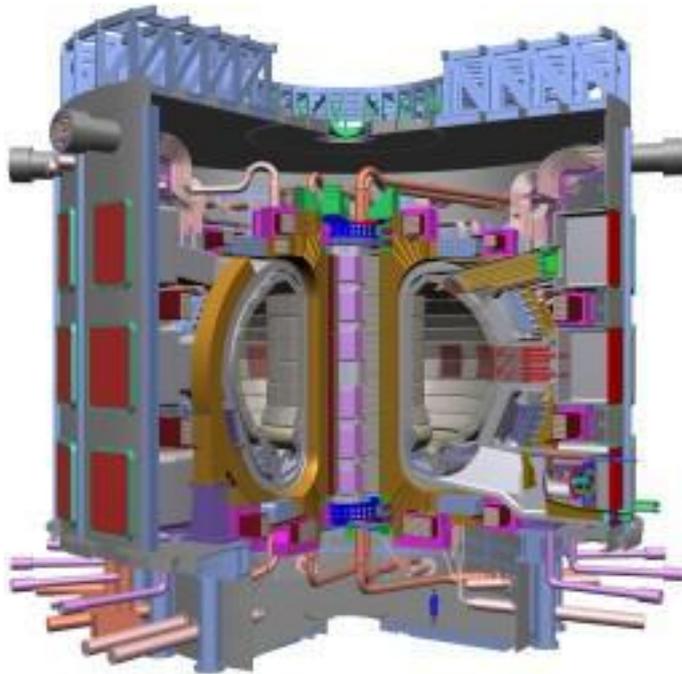
Plasmas "artificiais"



Propulsores iônicos (Xe)

Busca de soluções para produção de energia

<https://www.iter.org/>

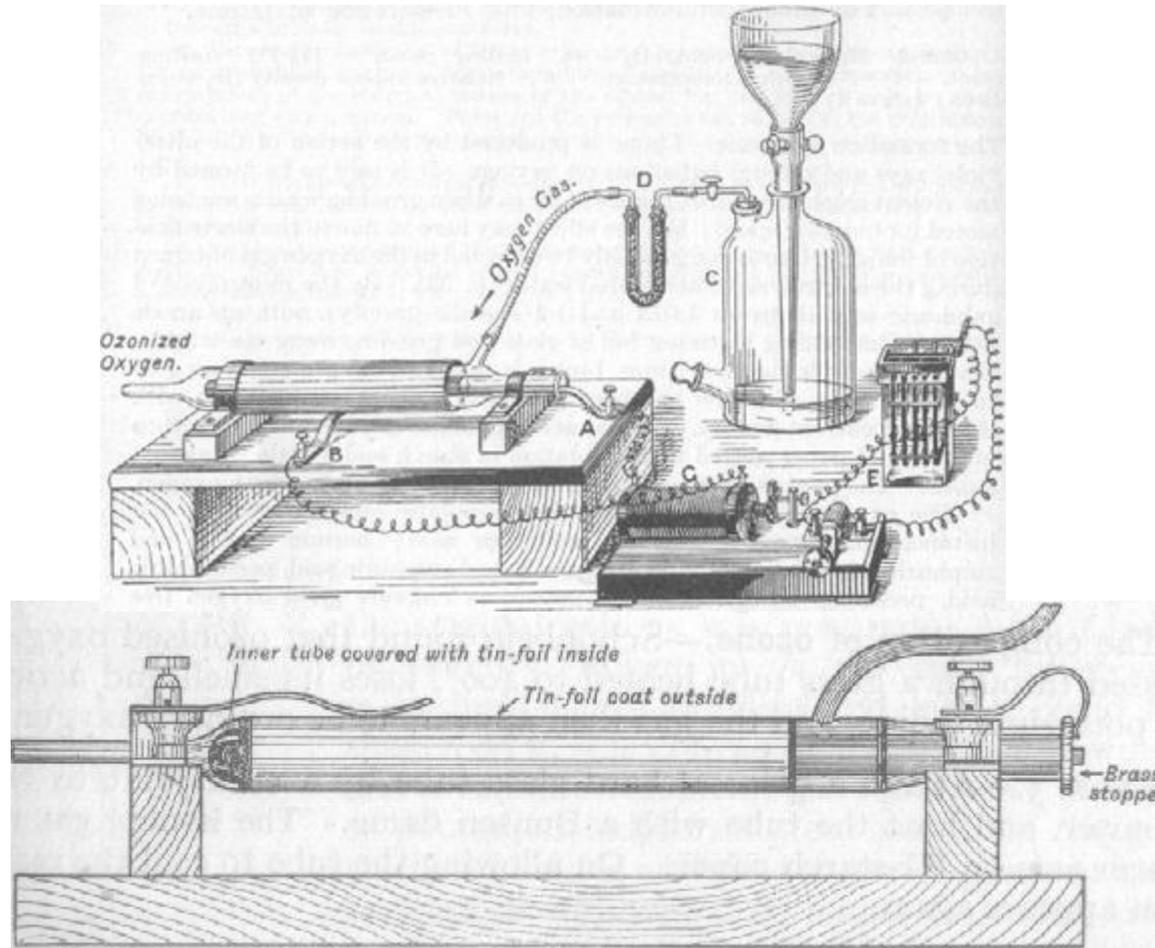


$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (11600 \text{ K})$$

Plasmas "exóticos"

Curiosidade: Siemens' ozonizer – 1857

Vovô das aplicações industriais



Uma das primeiras aplicações da plasma industrial ($O+O_2 \rightarrow O_3$)
Tratamento de água

O QUE É PLASMA?

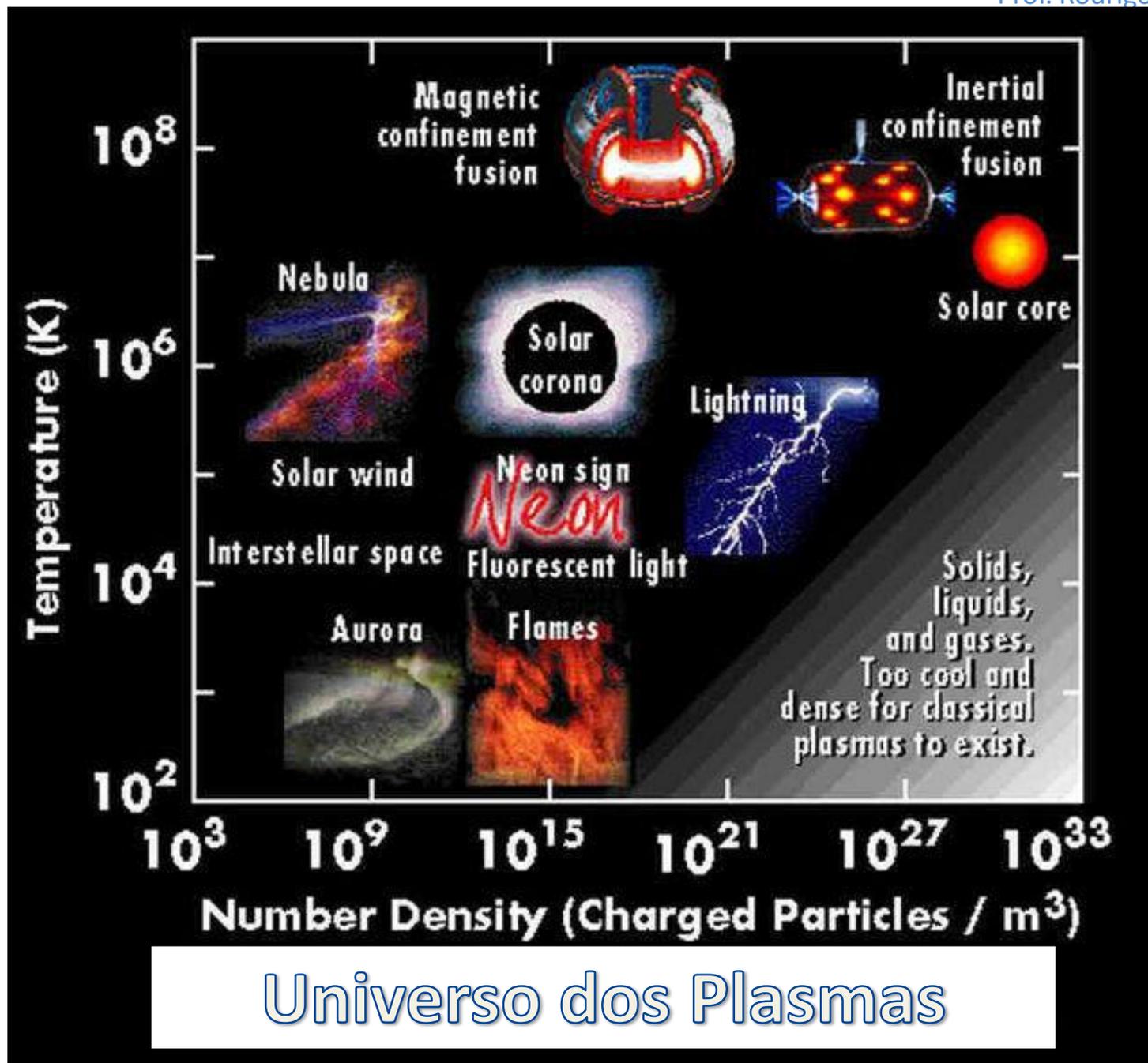
Definição de Plasma: meio contendo espécies eletricamente carregadas, permanecendo macroscopicamente neutro (igual numero de espécies negativas e positivas) com **comportamento coletivo**.

+	+	+	+	+	+	+	+	+
-	-	-	-	-	-	-	-	-
+	+	+	+	+	+	+	+	+
-	-	-	-	-	-	-	-	-
+	+	+	+	+	+	+	+	+
-	-	-	-	-	-	-	-	-
+	+	+	+	+	+	+	+	+
-	-	-	-	-	-	-	-	-
+	+	+	+	+	+	+	+	+
-	-	-	-	-	-	-	-	-

O que é comportamento coletivo?

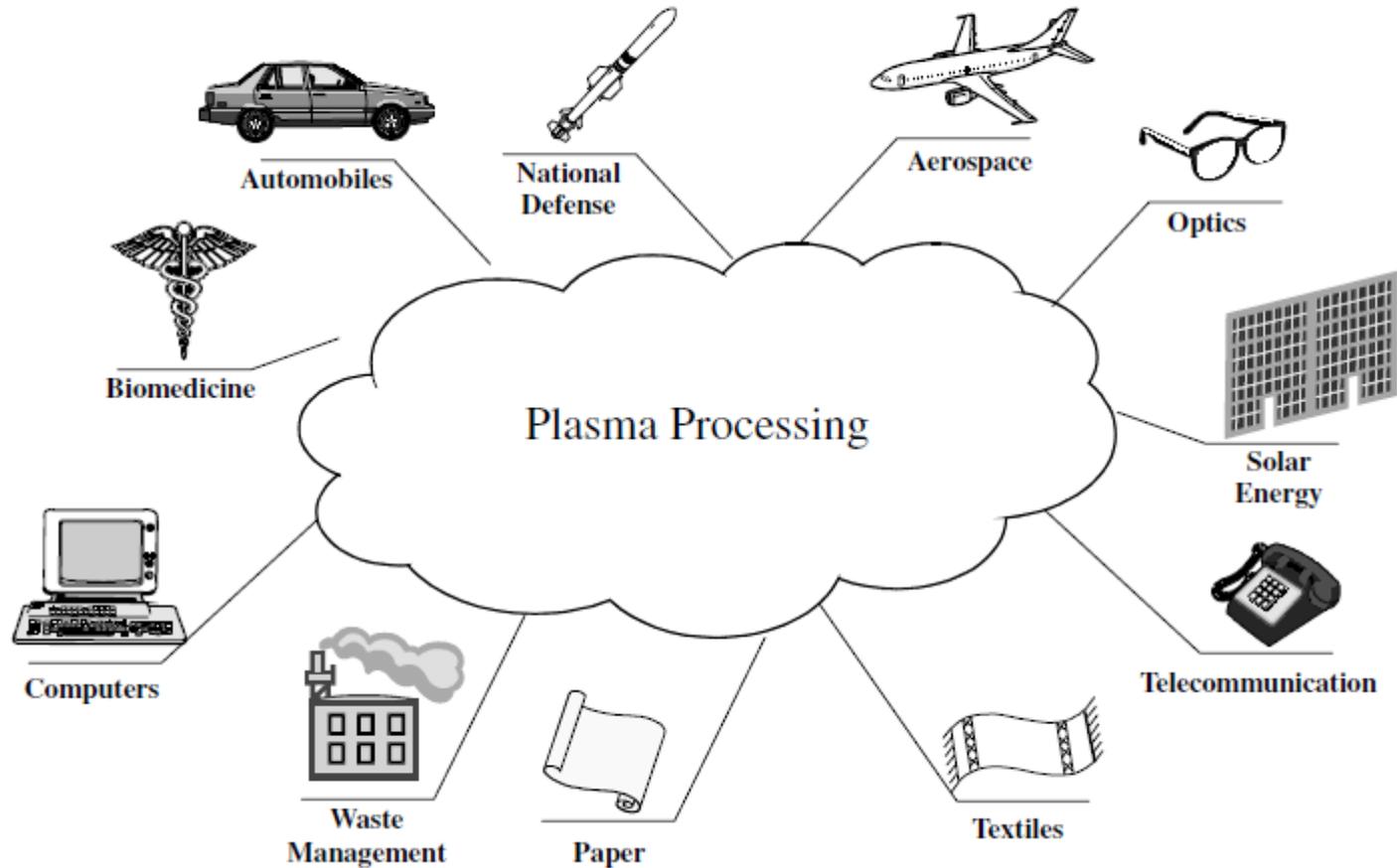
Existem também espécies neutras (majoritárias nos plasmas frios)

Muita coisa se encaixa nesta definição (existem muitos “plasmas”)



Universo dos Plasmas

Onde é aplicado na Indústria?



Algumas aplicações em materiais



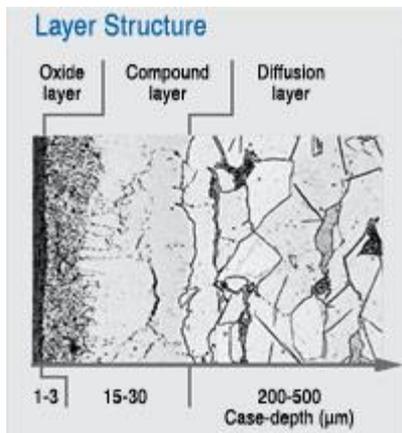
Deposição de filmes duros



Decoração

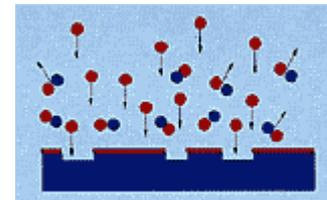
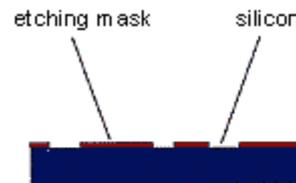


Prótese recoberta de Diamante



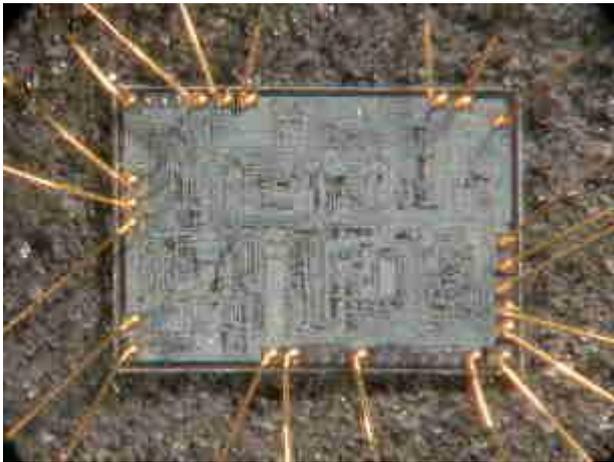
Nitretação

Tratamentos termoquímicos



Microeletrônica (responsável por grande avanços na aplicação de plasmas industriais)

Algumas aplicações em materiais



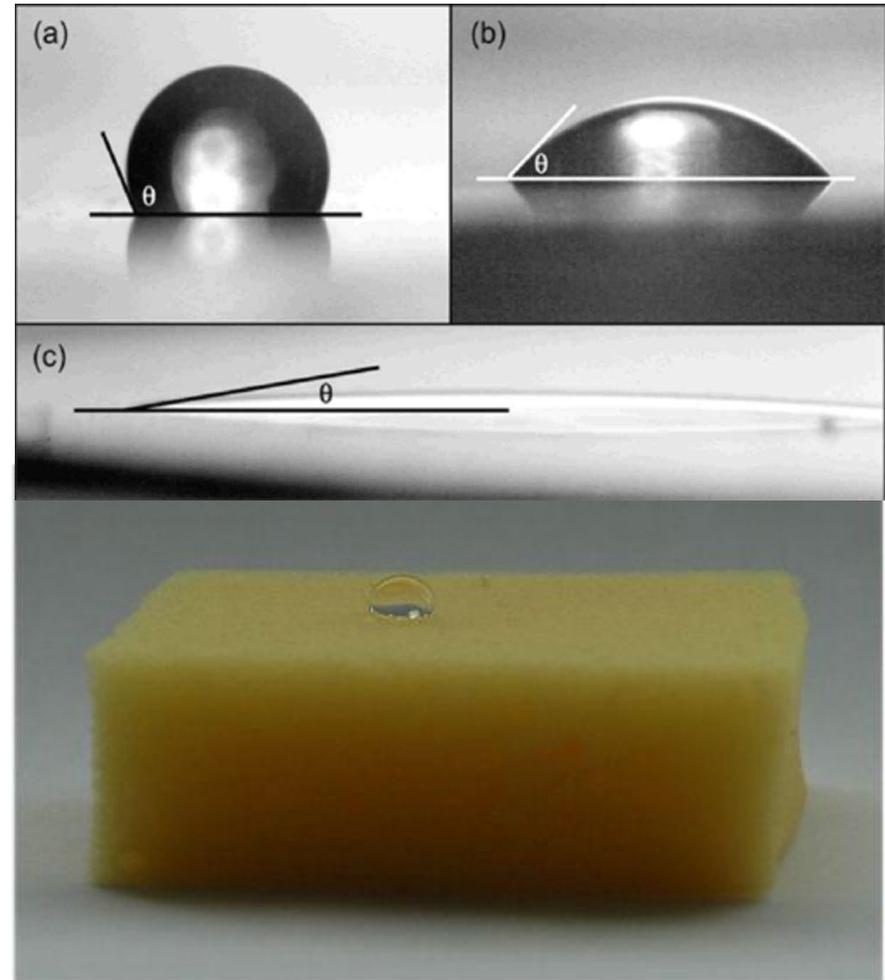
Industria Microeletrônica

Diversas etapas:

deposição

ataque

limpeza



Funcionalização (alterar molhabilidade)
Hidrofóbico/hidrofílico

Como criar um plasma ?

- Criando espécies carregadas

Distribuição

53
I
Iodo

Número máximo de elétrons por subnível

s ²	p ⁶
d ¹⁰	f ¹⁴

1s2, 2s2, 2p6, 3s2, 3p6, 4s2, 3d10, 4p6, 5s2, 4d10, 5p5

Camadas

K	L	M	N	O	P	Q
2	8	18	18	7	0	0

Total de elétrons: 53

Distribuir Conferir Corrigir

“Arrancar elétrons dos átomos/moléculas”

Ligações/regra do octeto -> estabilidade

O átomo de Bohr

Como são os níveis de energia

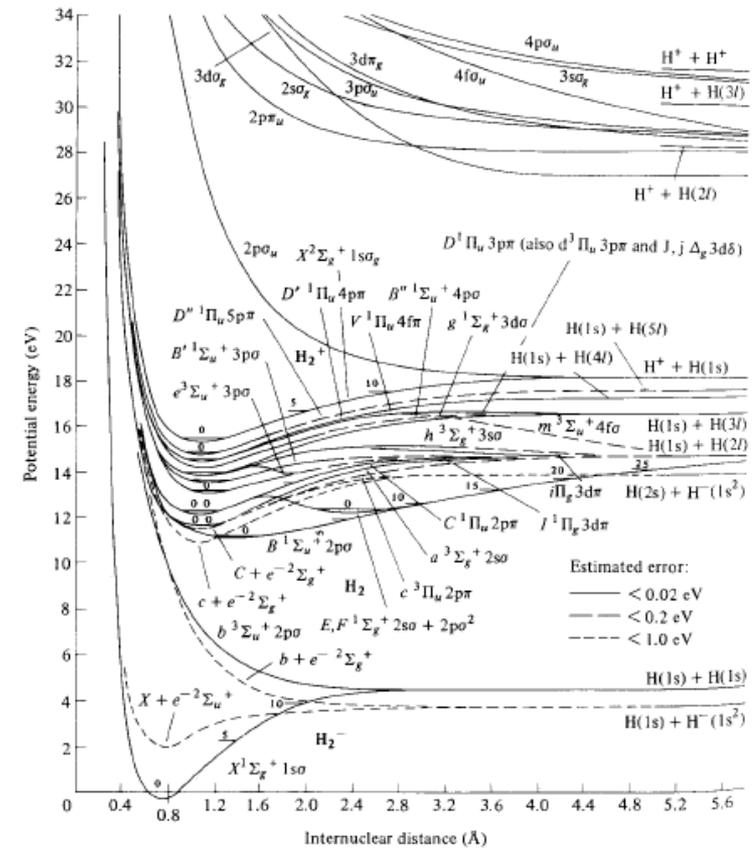
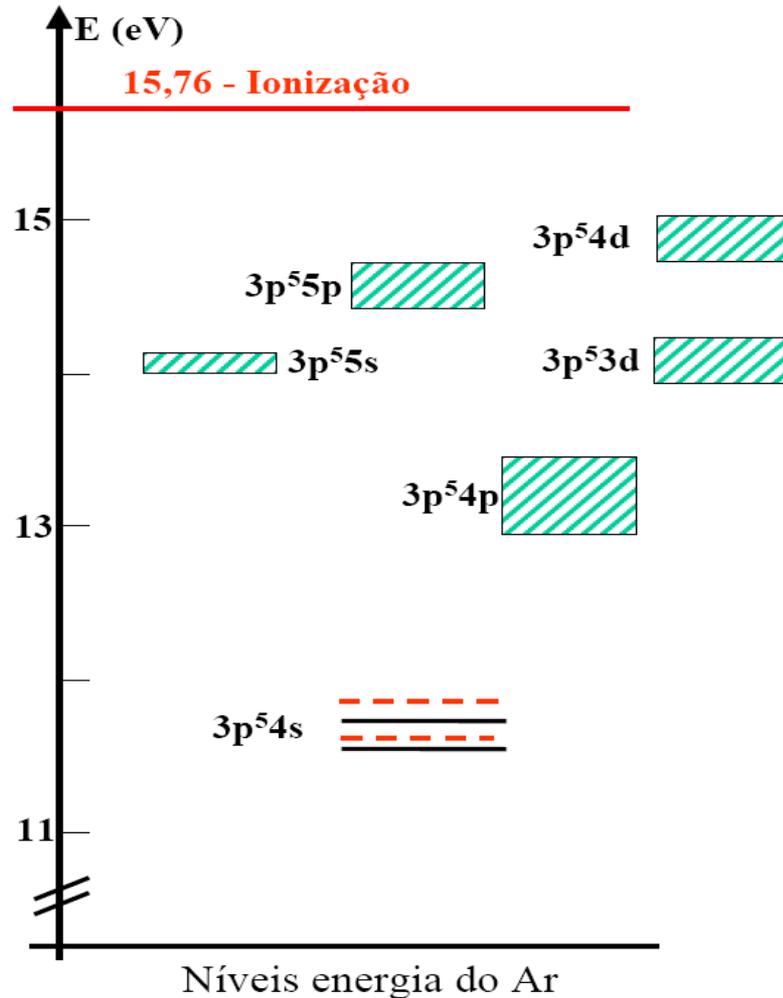
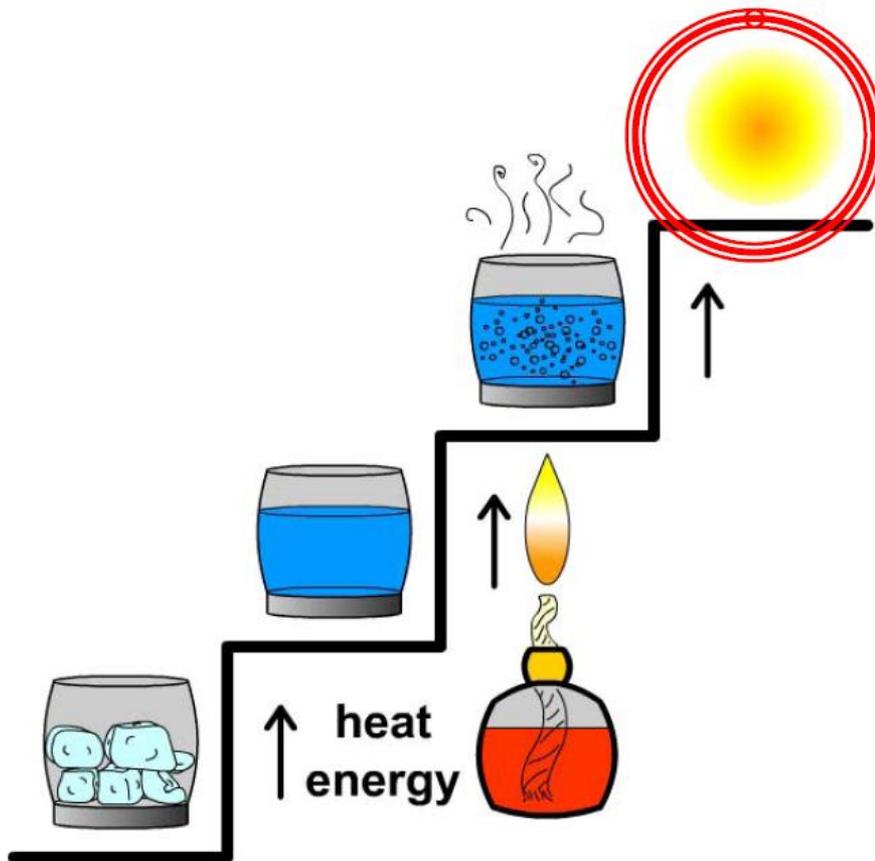


FIGURE 8.3. Potential energy curves for H_2^- , H_2 , and H_2^+ . (From Jeffery I. Steinfeld, *Molecules and Radiation: An Introduction to Modern Molecular Spectroscopy*, 2d ed. © MIT Press, 1985.)

Plasmas térmicos



Solid	Liquid	Gas	Plasma
Example Ice H_2O	Example Water H_2O	Example Steam H_2O	Example Ionized Gas $H_2 \rightarrow H^+ + H^+ + 2e^-$
Cold $T < 0^\circ C$	Warm $0 < T < 100^\circ C$	Hot $T > 100^\circ C$	Hotter $T > 100,000^\circ C$ (> 10 electron Volts)
Molecules Fixed in Lattice	Molecules Free to Move	Molecules Free to Move, Large Spacing	Ions and Electrons Move Independently, Large Spacing

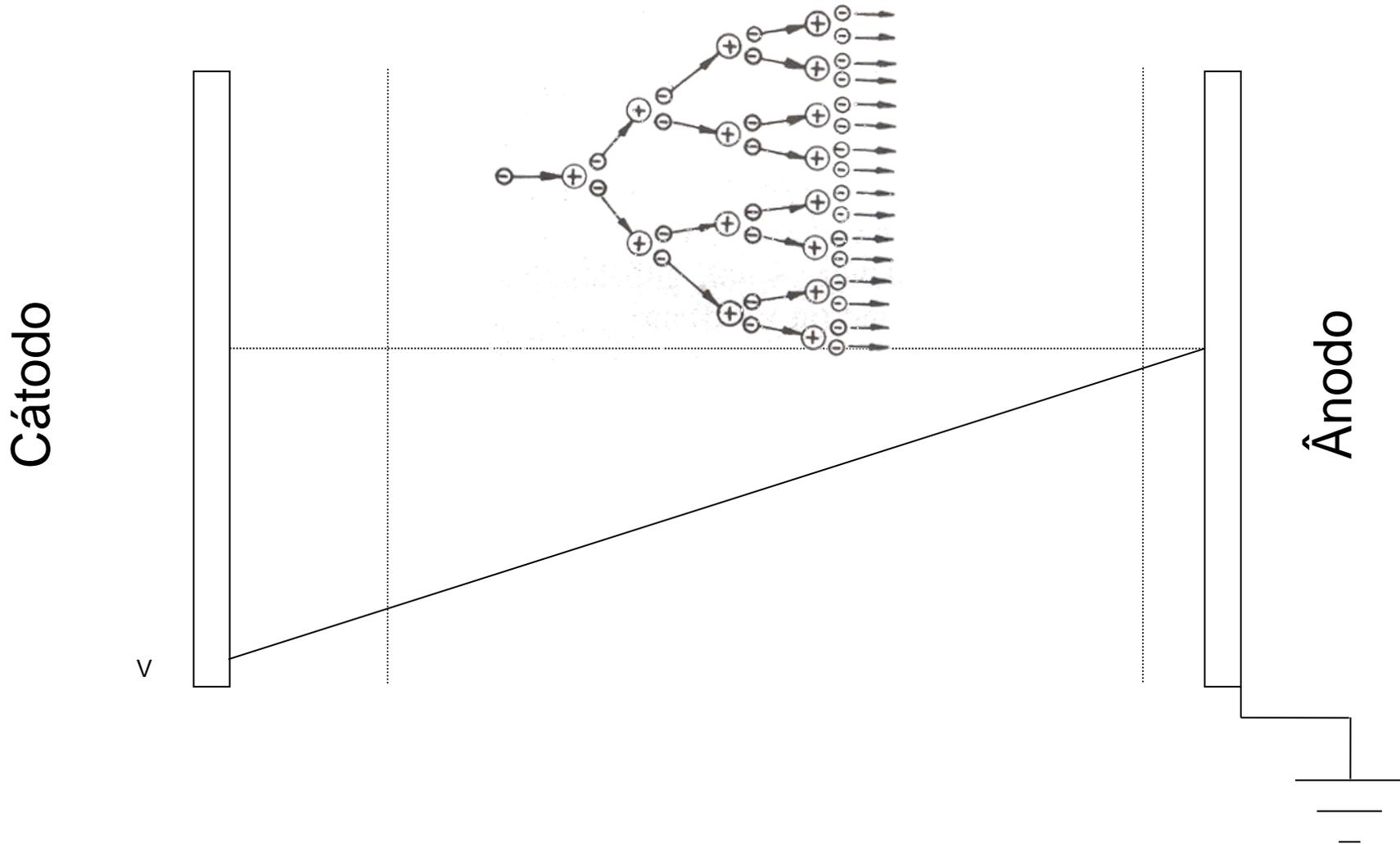
Plasma é frequentemente chamado de 4º estado da matéria

Temperatura elevada -> Difícil aplicação

Plasmas de laboratório

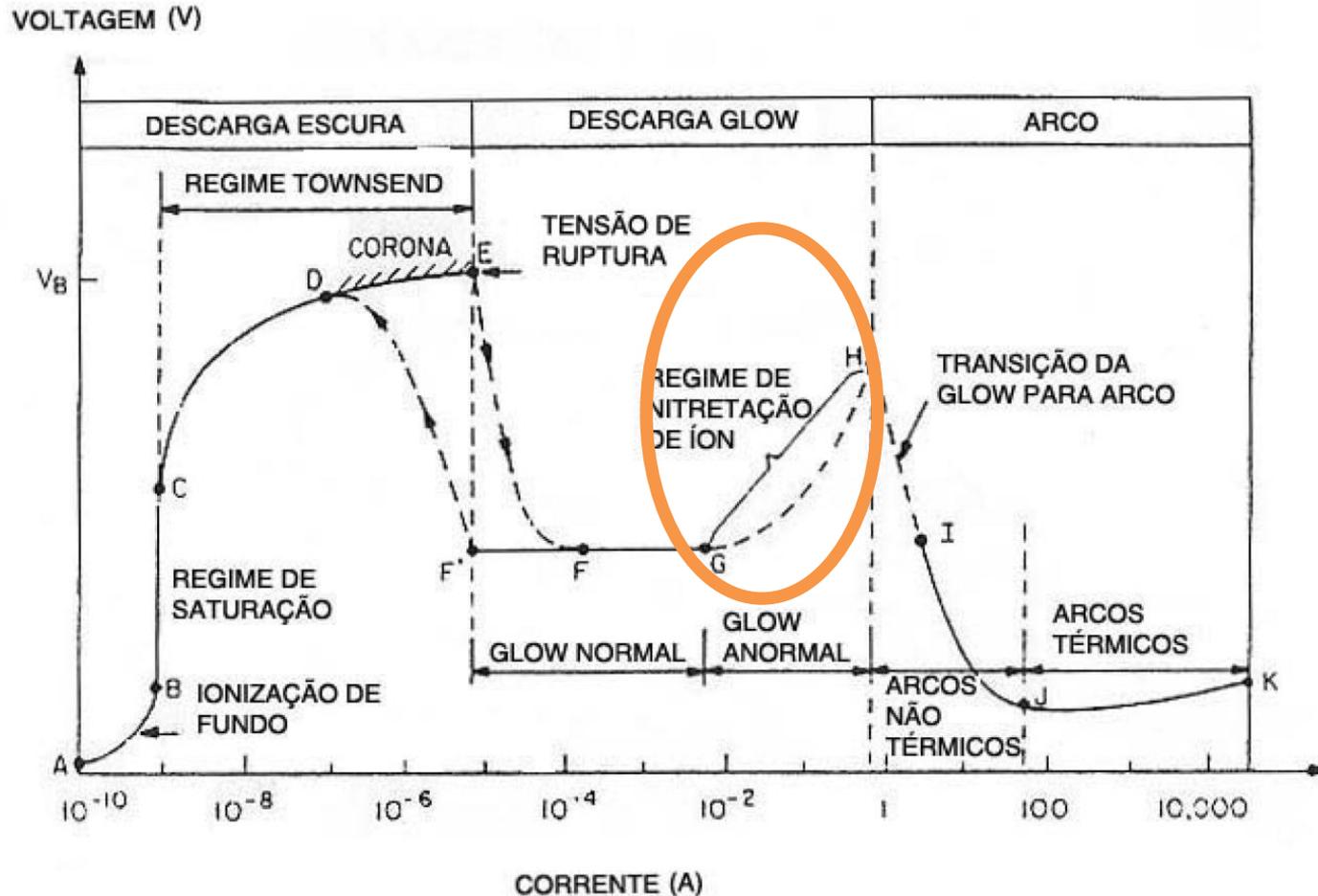
- Aplicação de um campo elétrico para acelerar os elétrons. Alguns exemplos:
 - Laser
 - Micro-ondas
 - Ondas de rádio frequência
 - Plasmas de corrente contínua

Iniciando um plasma DC



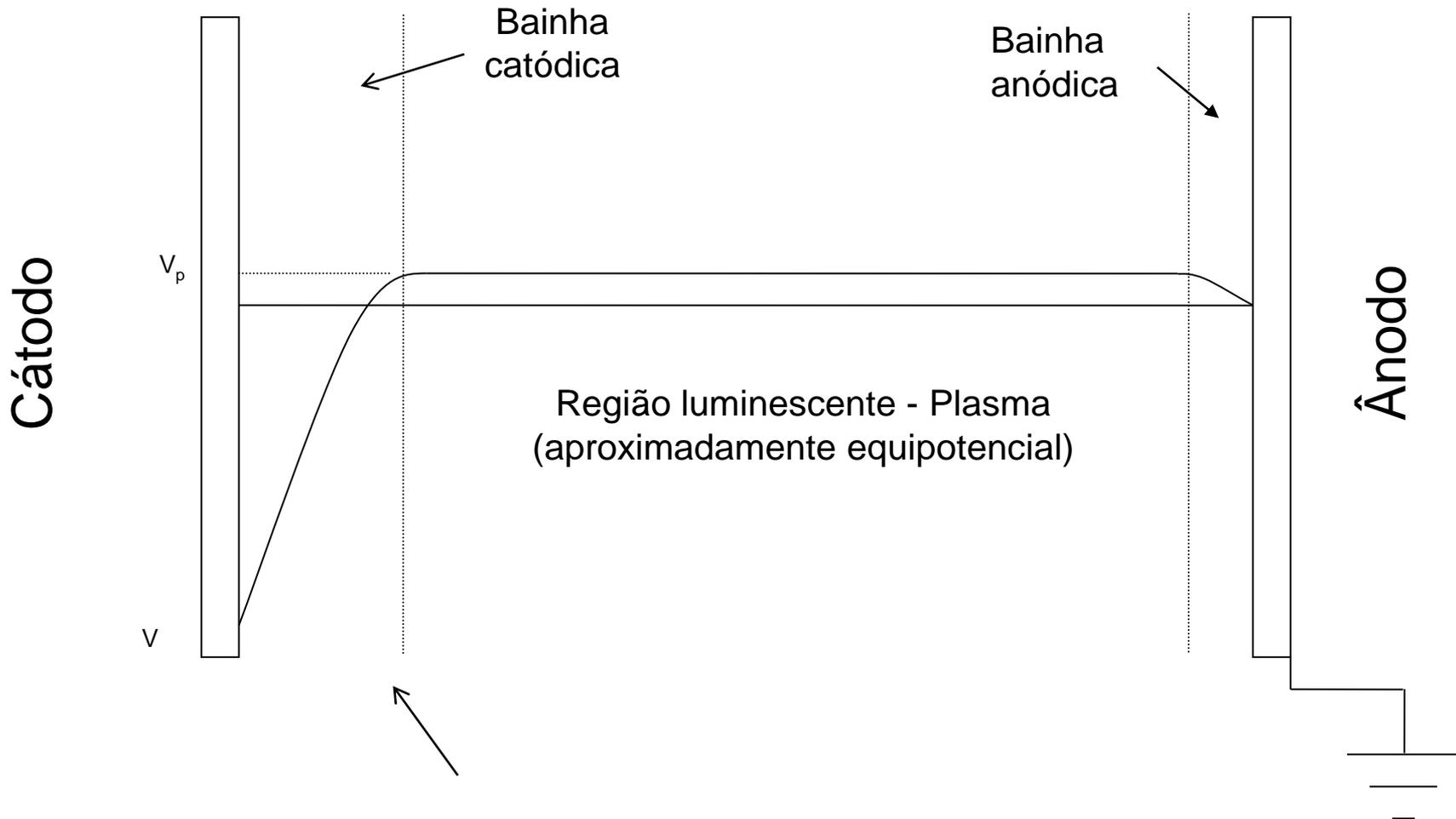
Se a taxa de criação de íons for maior que a taxa de recombinação o plasma é iniciado

Curva característica de uma descarga de corrente contínua



A descarga anormal é a que apresenta maior interesse para o tratamento de materiais

Estrutura da descarga em regime anormal



O Campo elétrico mais intenso fica na região da bainha catódica

Alguns números (Plasmas Frios)

	Pressão Atmosférica	Médio vácuo	Alto vácuo	Ultra alto vácuo	Ultra alto vácuo
Pressão (Torr)	760	10^{-3}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-9}
Número de moléculas por cm^3	2×10^{19}	3×10^{13}	3×10^{10}	3×10^8	3×10^7
Número de moléculas por segundo que bombardeiam as paredes	3×10^{23}	4×10^{17}	4×10^{14}	4×10^{12}	4×10^{11}
Caminho livre médio entre as colisões (cm)	$6,5 \times 10^{-6}$	5	500	5×10^5	5×10^6

Plasma DC típico (1 Torr)

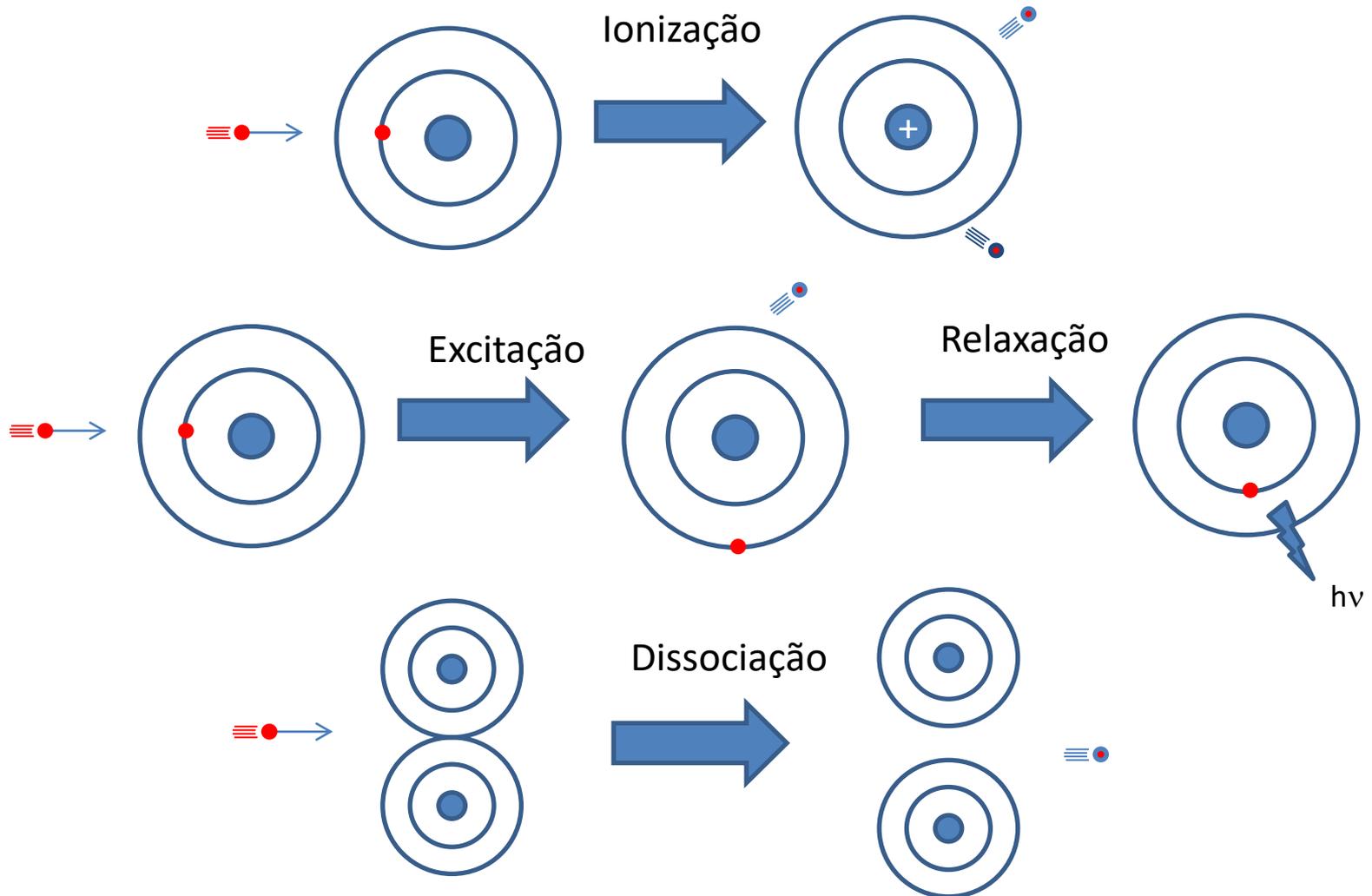
Densidade do gás = 3×10^{16} partículas/ cm^3

Livre caminho médio $\sim 5 \times 10^{-3}$ cm (50 μm)

Densidade do eletrônica $\sim 10^{11}$ elétrons/ cm^3 (energia típica 1eV \approx 11600K)

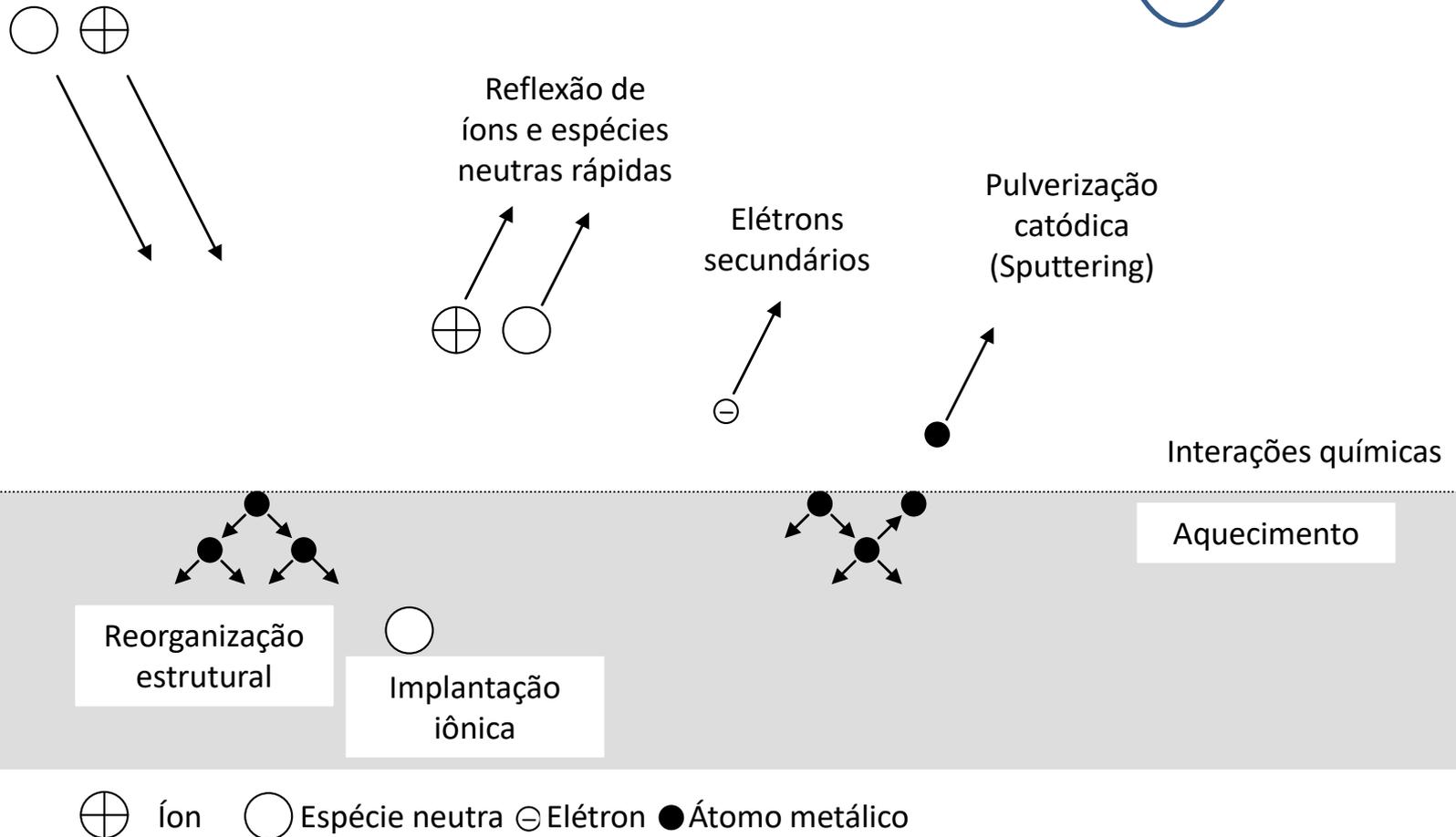
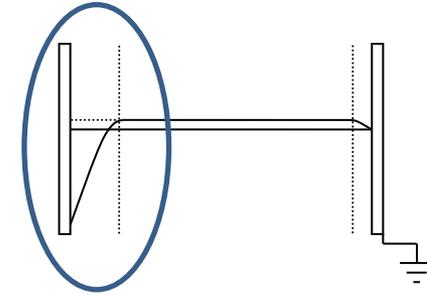
Grau de ionização $\sim 10^{-5}$

Principais Reações

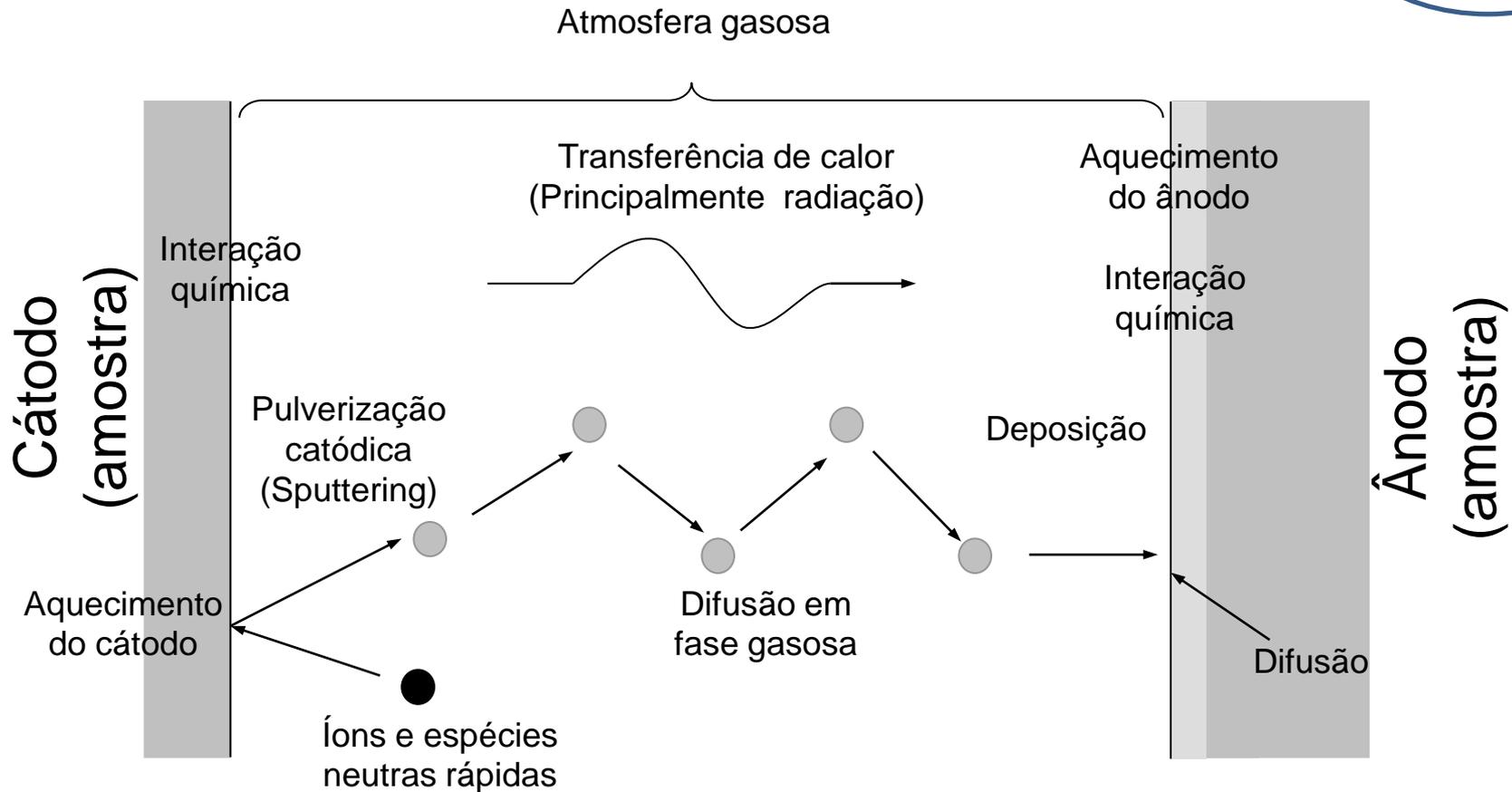
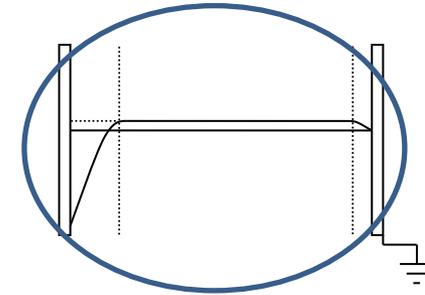


Espécies fora do equilíbrio -> altamente reativas

Interação plasma-superfície



Outras interações



Efeitos químicos e físicos

- Químicos (espécies reativas):
 - Formação de óxidos (ex: O)
 - Redução de óxidos (ex: H)
 - Funcionalização (ex: radicais OH ou NH)
 - Ataque químico (ex: F, Cl, O)
 - Deposição química (ex: CH₄, SiH₄ ou organometálicos)
- Físicos:
 - Emissão de fótons (Luz)
 - Pulverização
 - Aquecimento
 - Implantação
 - Deposição física

A utilização dos diferentes efeitos físicos e químicos levam a diferentes aplicações

Principais razões para aplicar plasma

- Meios altamente reativos a baixa temperatura
- Versatilidade
- Reprodutibilidade

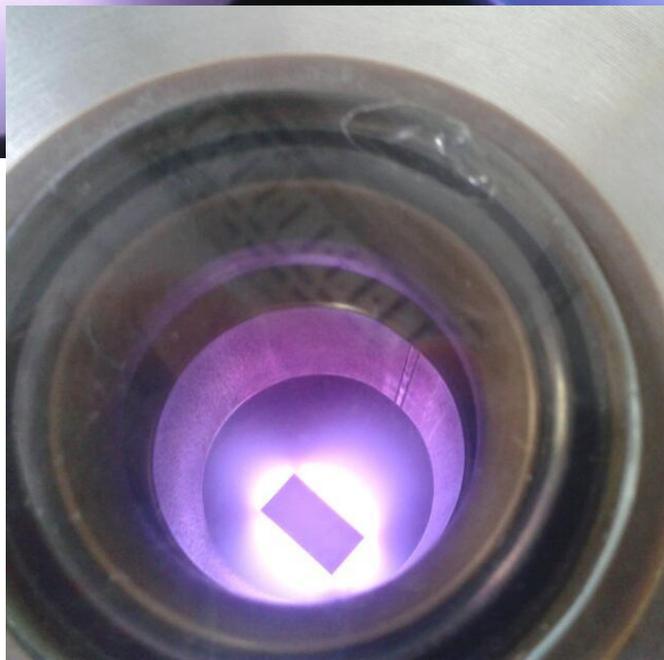
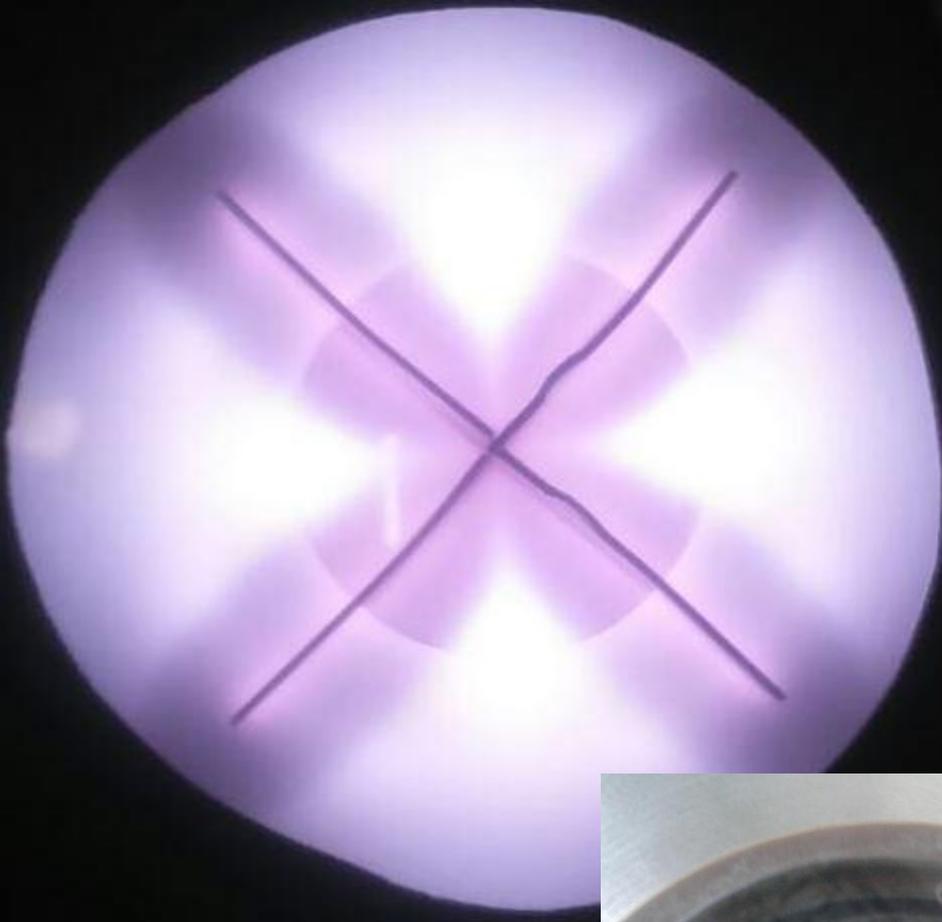
- Pouco poluente
- Baixo consumo de energia

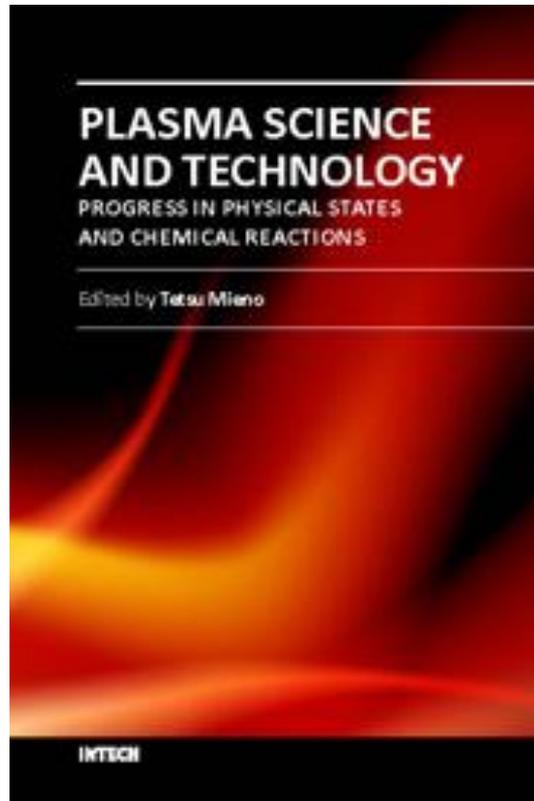
Pesquisa na UFPR

- **Tratamentos termoquímicos** de aços inoxidáveis a baixa temperatura (principal tema atualmente)



Nitretação, cementação e nitrocementação





Low-temperature Thermochemical Treatments of Stainless Steels – An Introduction

Rodrigo P. Cardoso, Marcio Mafra and Silvio F. Brunatto

Additional information is available at the end of the chapter

<http://dx.doi.org/10.5772/61989>

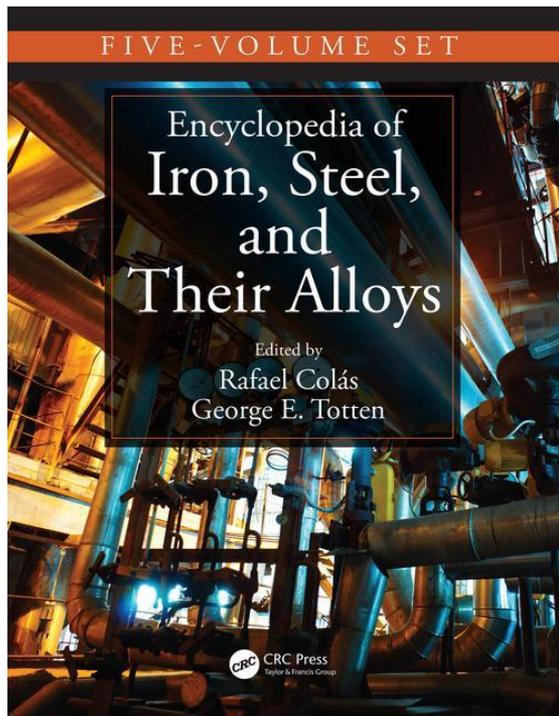
Abstract

Plasma technology used to perform thermochemical treatments is well established for the majority of steels, but it is not the case for the different stainless steel classes. Thus, important scientific and technological achievements can be expected in the coming years regarding plasma-assisted thermochemical treatment of such steels. The metallurgical aspects as well as the application cost-efficiency of stainless steels impose specific requirements for the thermochemical treatment, such as easy native chromium-rich oxide layer removal and surface activation at low temperature, which do not appear for other steel classes (plain, low-alloy, and tool steels). Thus, due to the highly reactive physico-chemical environment created by the plasma, plasma-assisted technology presents advantages over other “conventional” technologies like those performed in gas or liquid environments. Low temperature is needed to avoid the reduction of corrosion resistance of stainless steels, by suppressing chromium carbide/nitride precipitation, and, in this case, good surface properties are achieved by the formation of treated layers containing metastable phases. Such attributes make the low-temperature plasma thermochemical treatments of stainless steels an important R&D field in the domain of plasma technology and surface treatments, and the goal of this chapter is to introduce the reader to this important topic.

Keywords: Nitriding, Carburizing, Low-temperature thermochemical treatments, Stainless steels, Surface treatments

1. Introduction

Stainless steels are iron alloys mainly based on the Fe-Cr-Ni and Fe-Cr-C systems. The main characteristic of this class of alloys is its expressively high corrosion resistance when compared with other iron-based alloys. Thus, the main applications of these materials are related to parts exposed to corrosive operation environments, from cutlery to petroleum and nuclear indus-



FIVE-VOLUME SET

Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys

Edited by
Rafael Colás
George E. Totten

CRC Press
Taylor & Francis Group

DC Plasma-Assisted Parts Manufacturing: Sintering and Surface Texturing

Silvio Francisco Brunatto
Rodrigo Perito Cardoso

Department of Mechanical Engineering, Federal University of Paraná, Curitiba, Brazil

Aloísio Nelmo Klein
Joel Louis Rene Muzart[†]

Department of Mechanical Engineering, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil

Abstract

The purp-
(DC) pla-
achieved
effects, c
abnormal
discharge
copy cha
aiming to
surface te
choice of
surface c
process.

Low-Temperature Nitriding Kinetics of Stainless Steel: Effects of Prior Heat Treatment

Rodrigo Perito Cardoso
Silvio Francisco Brunatto

Plasma Assisted Manufacturing Technology & Powder Metallurgy Group, Department of Mechanical Engineering, Federal University of Paraná, Curitiba, Paraná, Brazil

Cristiano José Scheuer

Industrial Technical College, Federal University of Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil

INTRODUCTION

The use of direct curr-
processing has increa-
possibility of altering
by exposing it to plas
the development of d
(as e.g., nitriding, car
and debinding and si
parts), which have
researchers also in the

In the sintering p
means of DC abnorm
be sintered can act a
case, temperatures su
be reached due to th
plasma species (i.e., i
shown ahead, differ
surface interface. Stu
processed in the catho
tend to present surf
related to the plasm
cleaning, heating, spu
phenomena. It may b

[†] Deceased

Encyclopedia of Iron, Steel
Copyright © 2015 by Taylor

Abstract

Nitriding of stainless steels applying process p
tends to cause chromium nitride precipitation
below 10.5 wt.%. As a consequence, formatio
ble for the high corrosion resistance exhibit
strongly avoided. Low-temperature nitriding
in these steels, without affecting their corrosio
n and 693 K, are sufficiently high to activate c
activate diffusion of substitutional chromi
i is the so-called paraequilibrium state. Beside
t ple, altered by the prior heat treatment, also in
regime. In this entry, the influence of the prior
presenting the theoretic basis, some technolo
heat treatment on the AISI 420 steel low-tempe

INTRODUCTION

Since stainless steels are typically applied in aggress
environments, it is necessary to keep in mind that a
treatment/process applied for the production of stainle
steel parts must not be detrimental to its corrosion resi
tance. Thermochemical treatments, usually carried o
aiming to improve surface hardness, frequently impa
negatively on this important aspect when perform
without special attention. In the particular case of stai
less steels nitriding, it is not different. If it is carried o
applying conditions commonly used for non-stainle
steels; chromium nitride tends to precipitate, reduci
chromium content in solid solution and affecting neg
tively the stainless steel corrosion resistance. To ov
come this limitation, the low-temperature nitridi
process of stainless steels has been developed.

As diffusion of interstitial and substitutional ato
have considerably different activation energy, at lo
temperatures, the diffusion of nitrogen atoms (interstiti
is activated, promoting hardening by solid solution, with
activating significant diffusion of chromium atoms (subs
tutitional), avoiding chromium nitride precipitation. Simi

Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys DOI: 10.1081/E-EISA-1
Copyright © 2015 by Taylor & Francis. All rights reserved.

Martensitic Stainless Steel: Direct Current Low-Temperature Plasma Carburizing

Silvio Francisco Brunatto
Rodrigo Perito Cardoso

Plasma-Assisted Manufacturing Technology and Powder Metallurgy Group, Department of Mechanical Engineering, Federal University of Paraná, Curitiba, Paraná, Brazil

Cristiano José Scheuer

Industrial Technical College, Federal University of Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil

Abstract

This work reports successful results on low-temperature plasma carburizing (LTPC) of martensitic stainless steel carried out in pulsed direct current (DC) abnormal glow discharge. A brief introduction on pulsed DC plasma discharge in abnormal regime and its control parameters is presented. The main metallurgical aspects related to low-temperature carburizing of martensitic stainless steel are discussed. Promising results for LTPC of AISI 420 martensitic stainless steel are evidenced in a study case, where the influence of the treatment temperature, time, gas mixture CH₄ content, and gas flow rate are studied by microstructural analysis, x-ray diffractometry (XRD), and hardness profile measurements of the treated samples. Finally, process kinetics characterization is also conducted. Results confirm that LTPC of martensitic stainless steel carried out in pulsed DC abnormal glow discharge can be successfully used in experimental level, presenting strong potential for industrial applications.

INTRODUCTION

Martensitic stainless steels have been extensively used in the manufacturing of parts for the energy production industry (hydraulic, oil and gas, thermal, and nuclear), surgical instruments, cutlery, gears, and shafts. Some applications also include steam, gas, and jet engine turbine blades operating at relatively low temperatures, large hydraulic turbine rotors, piping, pipelines, and valves. This stainless steel class was developed aiming to combine in a same material good corrosion resistance under ambient atmospheric conditions and high strength. So low-temperature carburizing of martensitic stainless steel is an important issue in the field of thermochemical treatments and presents strong potential for new applications and developments in the mechanical-metallurgical field according to the results presented in this entry. Contrary to the observed for direct current (DC) low-temperature plasma carburizing (LTPC) of austenitic stainless steels, which have been extensively explored in the literature from the past decades, little has been published until now for LTPC of martensitic stainless steels. As it will be shown hereafter, the adequate choice of electrical discharge and treatment parameters in DC LTPC can lead to interesting results for the surface processing of martensitic stainless steels. So, this work opens up a new perspective to the LTPC of martensitic stainless steels, since the results presented here indicate new possibilities on the

discussion of this subject. In next sections, topics comprising the bases of DC abnormal glow discharge, LTPC and different low-temperature thermochemical treatments, and metallurgical aspects for LTPC of martensitic stainless steel are presented, showing by means of a case study typical results for microstructure, hardness profile, characterization of the phases present at the treated surface, and the process kinetics characterization.

BASES OF DC ABNORMAL GLOW DISCHARGE FOR LTPC

DC glow discharge can be easily obtained by applying a potential difference between two electrodes situated in a gas medium under low pressure. Charged particles (mainly free electrons) accelerated by the produced electric field initiate collisions with neutral gas species (atoms/molecules) leading the gas to be ionized. The gas ionization originates a bright-aspect discharge that characterizes the formation of plasma.^[1-3] Ar + H₂ + CH₄ containing gas mixtures are usually used in the plasma carburizing process of steels. Ar is a neutral gas, and it has been used for heating purpose of samples. Hydrogen is an important reductor gas, and it is supposed to play an important role in the interaction with the passive chromium-rich oxide layer of stainless steels.^[6]

Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys DOI: 10.1081/E-EISA-120051667
Copyright © 2015 by Taylor & Francis. All rights reserved.

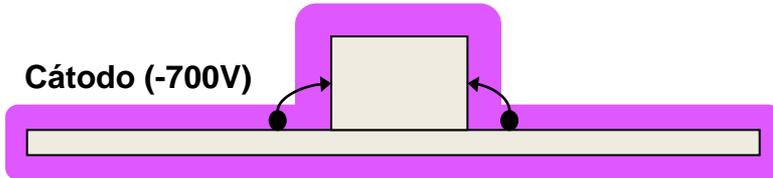
PLASMAS LT2P (DC - PULSADO)

Cátodo

Ânodo (0 V)



Cátodo (-700V)

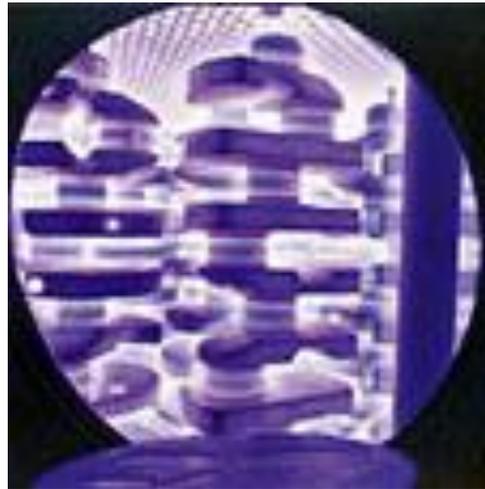
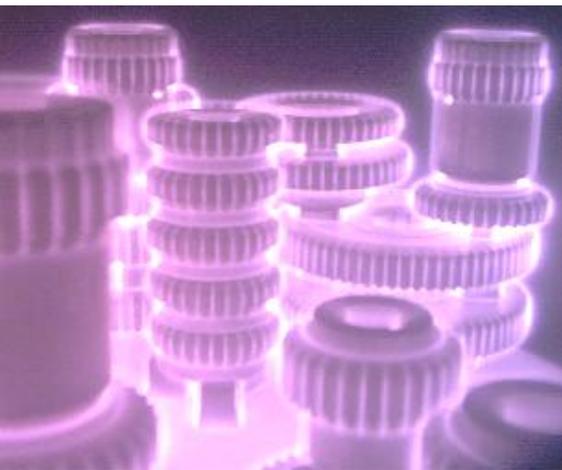


Ânodo

Cátodo (-700V)

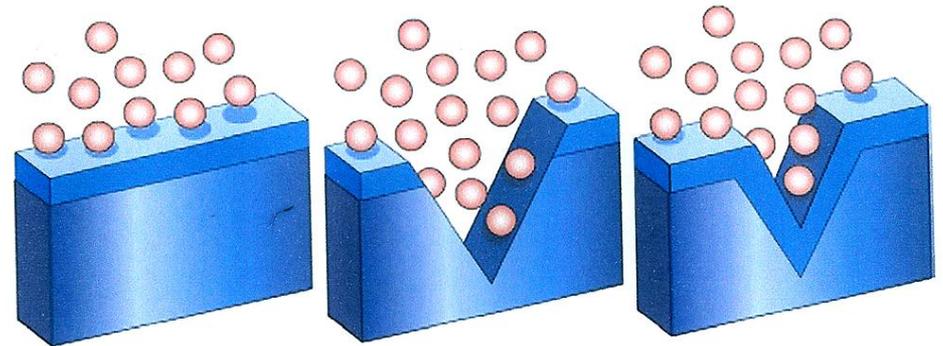


Ânodo (0 V)



Particularidades dos aços inoxidáveis

- Aplicado quando se necessita de elevada resistência a corrosão
- Resistência à corrosão assegurada pela formação e uma camada de óxido passiva



- Necessidade de no mínimo 10,5% em peso de Cr em solução sólida

Objetivo dos tratamentos termoquímicos a baixa temperatura dos aços inoxidáveis

- Aumentar a dureza da superfície dos aços inoxidáveis pela adição de elementos de ligas (C e/ou N) sem reduzir a resistência a corrosão da superfície tratada
 - Introduzir elementos de liga em solução sólida sem permitir que o Cr saia de solução sólida
 - Necessidade de limitar a difusão do Cr (baixa temperatura)

Porque usar plasma para tratar estes materiais

- Necessita de atmosfera reativas a baixa temperatura
 - Geração de atmosferas altamente reativas a baixa temperatura é facilmente obtida por plasma
- Camada de óxido passiva não permite a difusão dos elementos desejados
 - Possibilidade de obter atmosferas fortemente redutoras e pulverização da camada pelo plasma

Estudo de caso:

Cementação a baixa temperatura do aço inoxidável martensítico AISI 420

- Os dados aqui apresentados foram produzidos nos trabalhos de mestrado e doutorado de Cristiano José Scheuer

Artigos já publicados

Materials Science and Engineering A 539 (2012) 369–372

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Materials Science and Engineering A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/msea



Rapid communication

Low temperature plasma carburizing of martensitic stainless steel

C.J. Scheuer^a, R.P. Cardoso^a, R. Pereira^a, M. Mafra^b, S.F. Brunatto^{a,*}

^a Grupo de Tecnologia de Fabricação Assistida por Plasma e Metalurgia do Pó (Plasma Assisted Manufacturing Technology & Powder Metallurgy Group) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, 81531-990, Curitiba, PR, Brazil

^b Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica, UTFPR, 80230-901, Curitiba, PR, Brazil

Surface & Coatings Technology 206 (2012) 5085–5090

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Surface & Coatings Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/surfcoat



Low-temperature plasma carburizing of AISI 420 martensitic stainless steel: Influence of gas mixture and gas flow rate

C.J. Scheuer, R.P. Cardoso, F.I. Zanetti, T. Amaral, S.F. Brunatto^{*}

Grupo de Tecnologia de Fabricação Assistida por Plasma e Metalurgia do Pó (Plasma Assisted Manufacturing Technology & Powder Metallurgy Group), Departamento de Engenharia Mecânica, UFPR, 81531-990, Curitiba, PR, Brazil

Surface & Coatings Technology 214 (2013) 30–37

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Surface & Coatings Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/surfcoat



AISI 420 martensitic stainless steel low-temperature plasma assisted carburizing kinetics

C.J. Scheuer^a, R.P. Cardoso^{a,*}, M. Mafra^{a,b}, S.F. Brunatto^a

^a Grupo de Tecnologia de Fabricação Assistida por Plasma e Metalurgia do Pó (Plasma Assisted Manufacturing Technology & Powder Metallurgy Group), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, 81531-990, Curitiba, PR, Brazil

^b Departamento Acadêmico de Mecânica, UTFPR, 80230-901, Curitiba, PR, Brazil

Tribology International 103 (2016) 555–565

Contents lists available at ScienceDirect

Tribology International

journal homepage: www.elsevier.com/locate/triboint



Dry sliding behavior (block-on-ring tests) of AISI 420 martensitic stainless steel, surface hardened by low temperature plasma-assisted carburizing

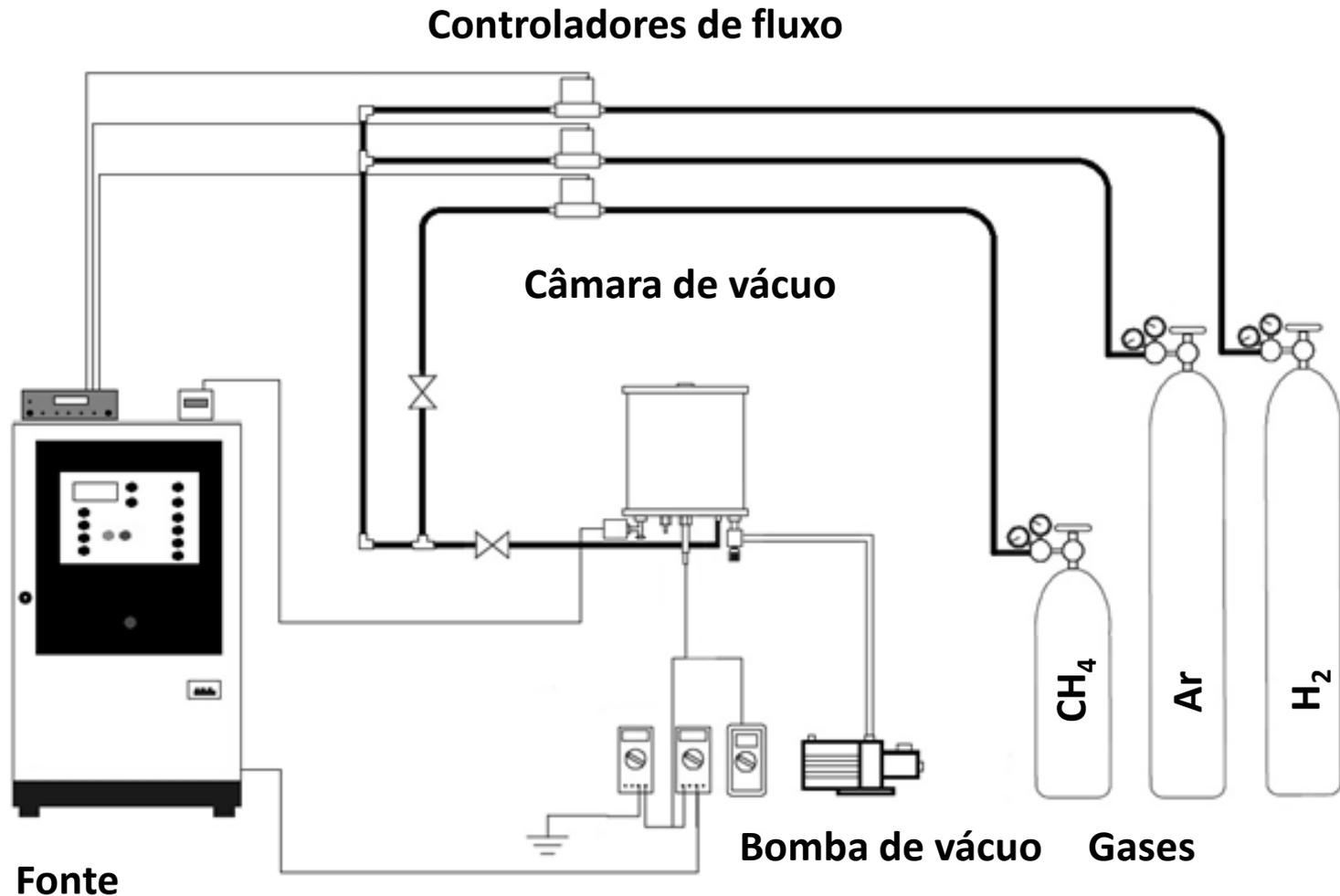
V. Angelini^{a,*}, I. Boromei^a, C. Martini^a, C.J. Scheuer^b, R.P. Cardoso^b, S.F. Brunatto^b, L. Ceschini^a

^a Dipartimento di Ingegneria Industriale (Department of Industrial Engineering), University of Bologna, Viale Risorgimento 4, Bologna, I-40136 Italy

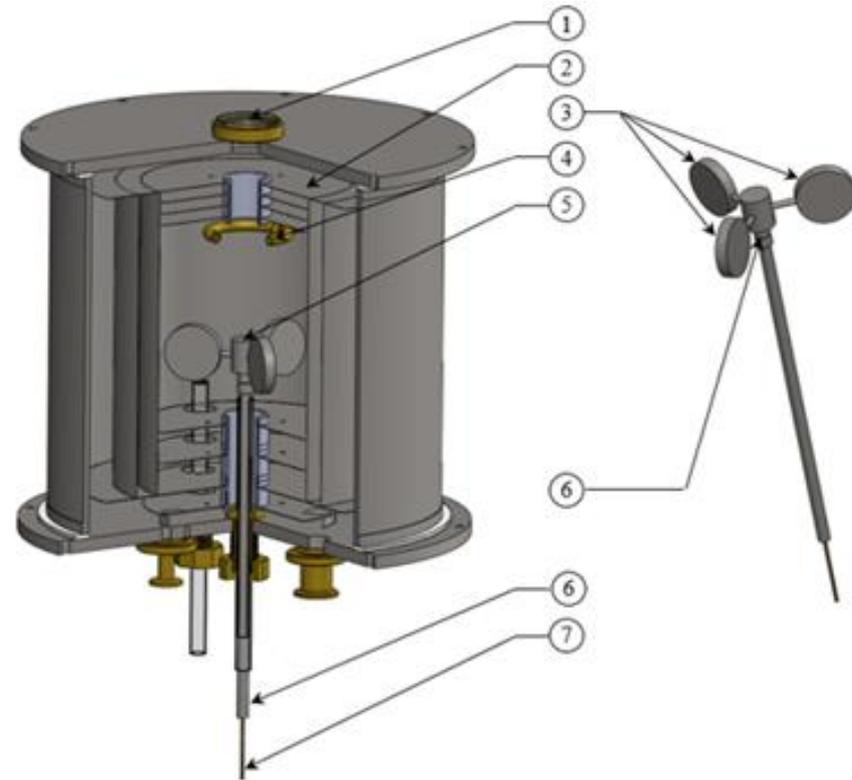
^b Plasma Assisted Manufacturing Technology & Powder Metallurgy Group, Departamento de Engenharia Mecânica (Department of Mechanical Engineering), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, PR, 81531-990 Brazil



Sistema para cementação por plasma



Câmara (reator de plasma) e parâmetros de tratamentos



1. Janela de visualização
2. Blindagem térmica
3. Amostra
4. Entrada de gases
5. Porta amostras
6. Cátodos
7. Termopar

Amostras: discos de AISI 420 (50,8mm diâmetro x 10mm altura), temperadas ao ar após austenitização à 1050 °C

Parâmetros do plasma:

- Frequência: 4,2 kHz
- Voltagem de pico: 700V
- Mistura gasosa: 0,5%CH₄ + (20%Ar+80%H₂)
- Fluxo gasoso: 100 sccm
- Pressão: 3 Torr (400 Pa)

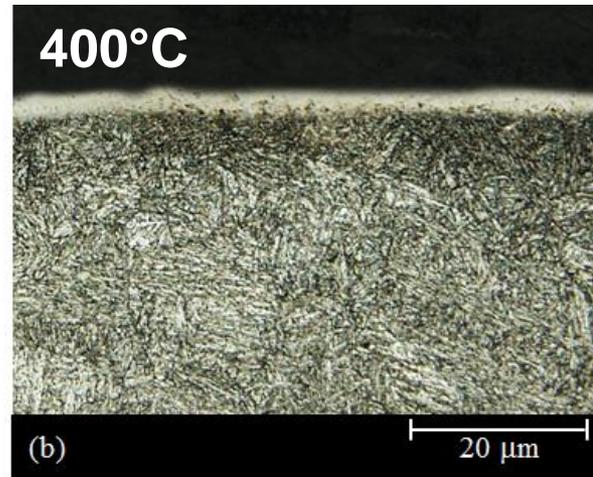
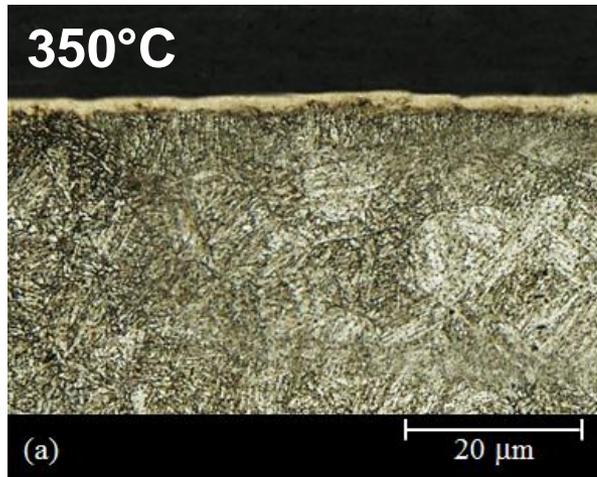
Condições de tratamento:

- Temperatura: 350, 400, 450 e 500°C para tempo de 8h
- Tempos: 4, 8, 12 e 16h para temperatura de 450 °C

Caracterização: análise microestrutural, ensaios de microdureza, DRX

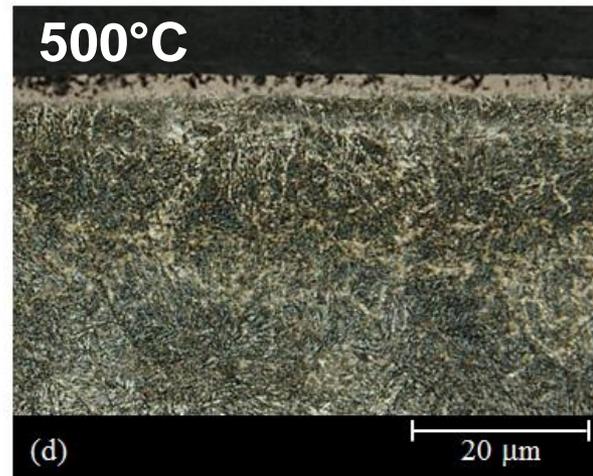
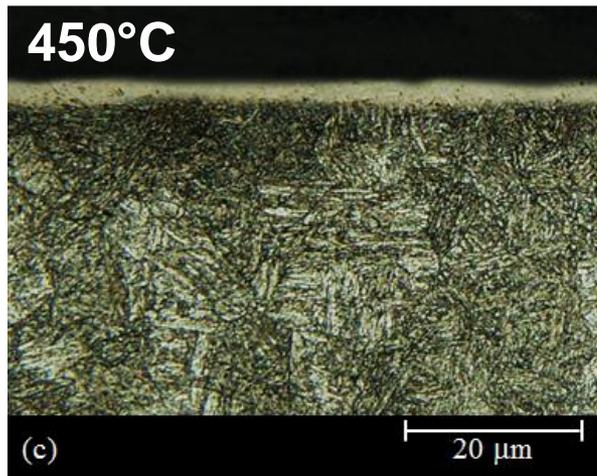
Medidas de desempenho: Desgaste por deslizamento a seco, desgaste microabrasivo e resistência à corrosão

Análise microestrutural (temperatura)



Camada externa

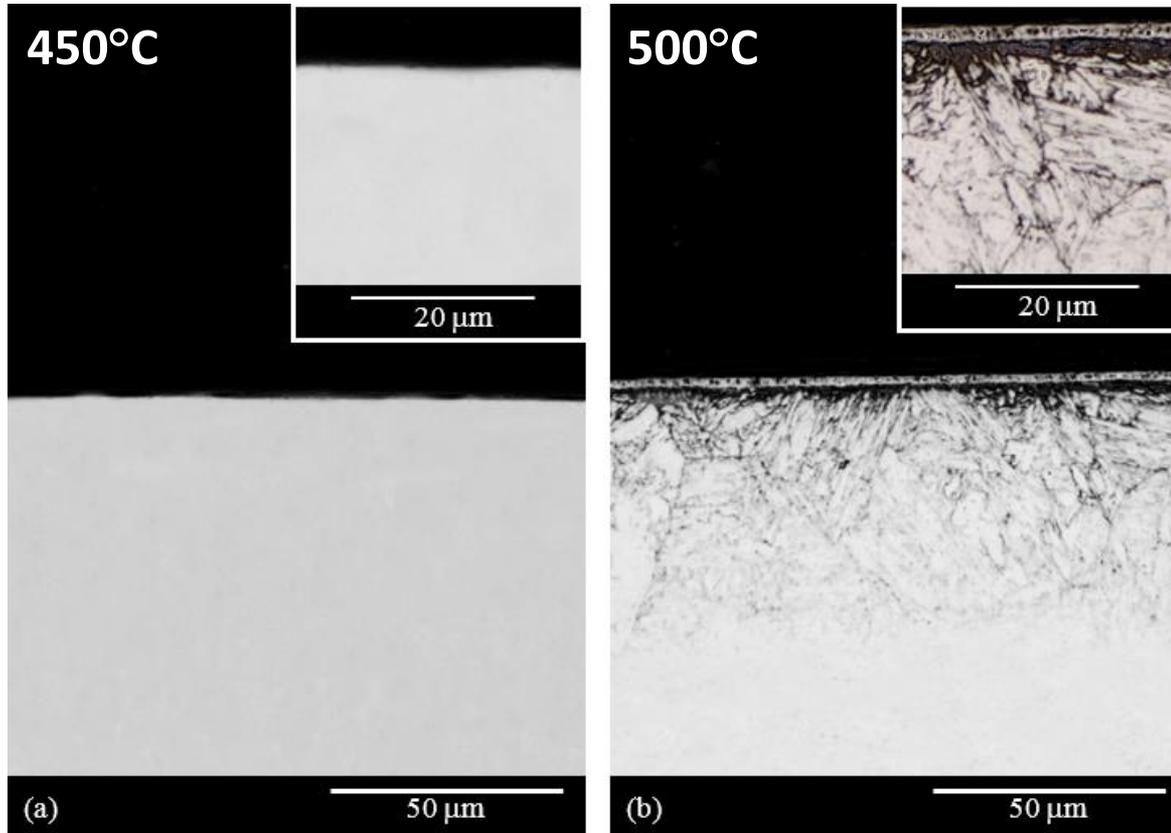
Camada de difusão
(observada somente no perfil
de dureza)



Ocorrência de
sensitização para
temperatura elevada
(500°C)

Micrografias da seção transversal (ataque: Marble)

Análise microestrutural (temperatura)



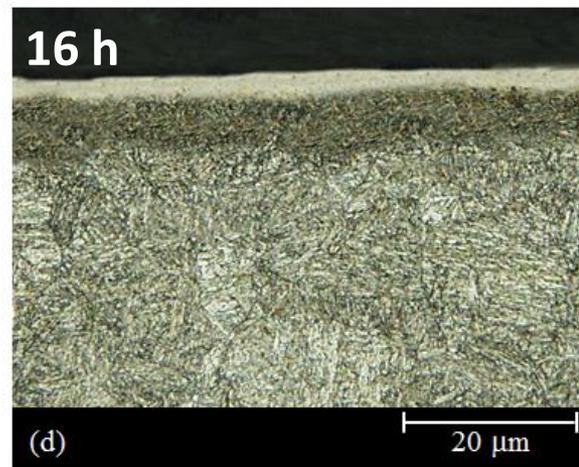
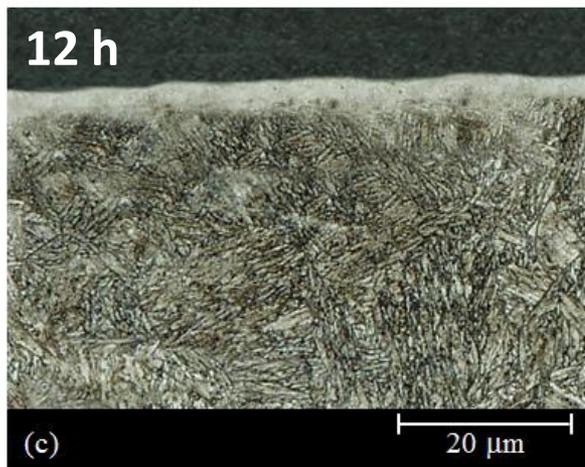
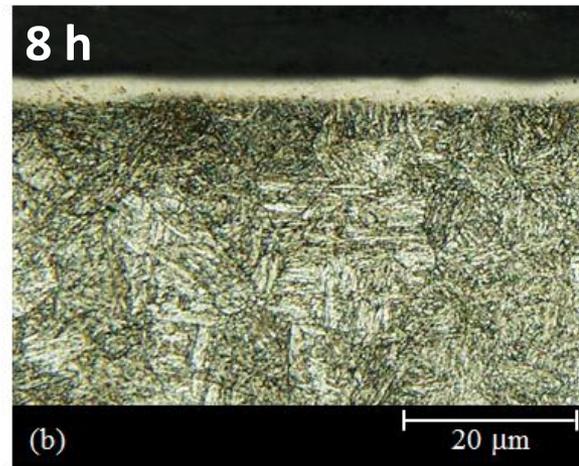
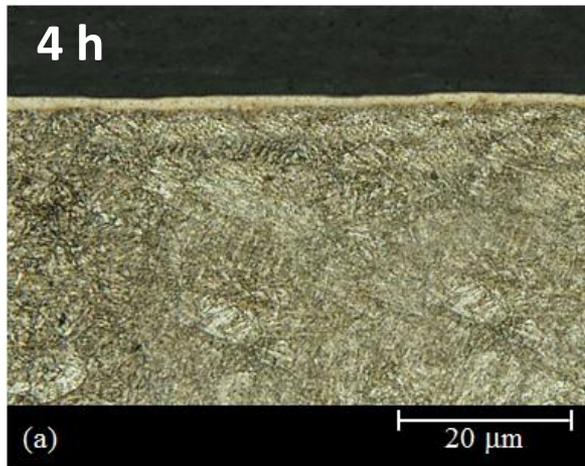
Confirmação da sensitização:

Somente a camada externa e de difusão das amostras tratadas a 500°C foram atacadas.

(núcleo das amostras tratadas a 450°C e 500°C não são atacados)

Micrografias da seção transversal (ataque: Nital 10%)

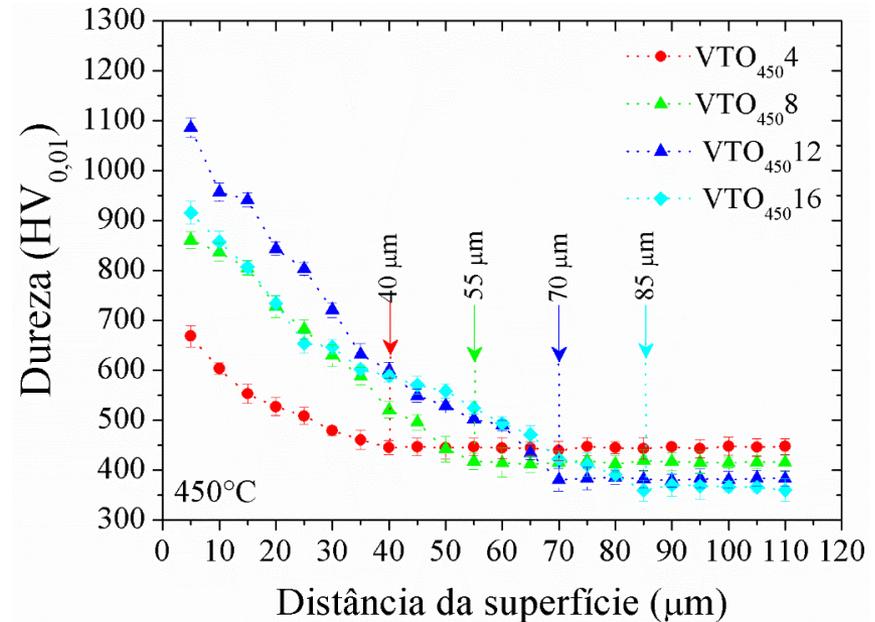
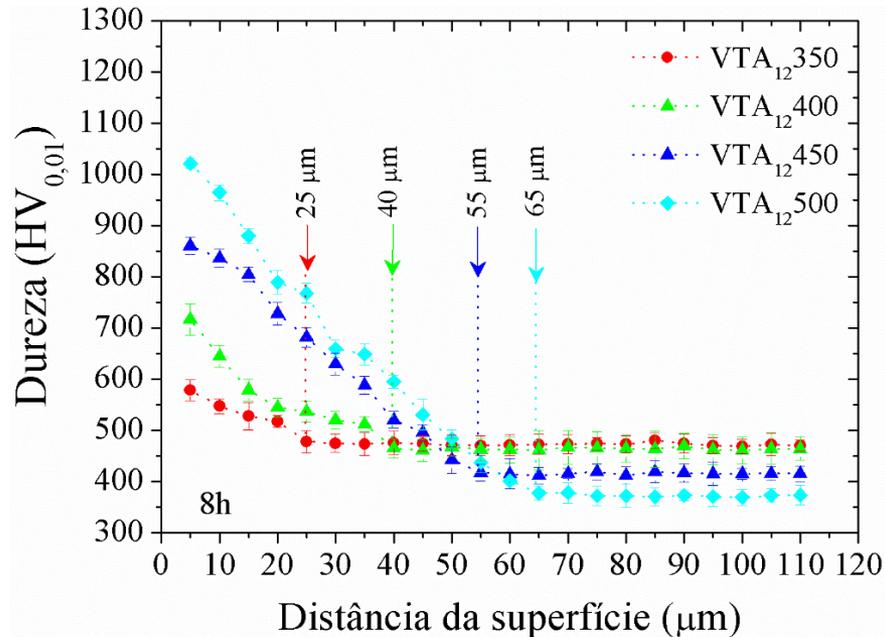
Análise microestrutural (tempo)



Os resultados são similares aos obtidos para a variação da temperatura

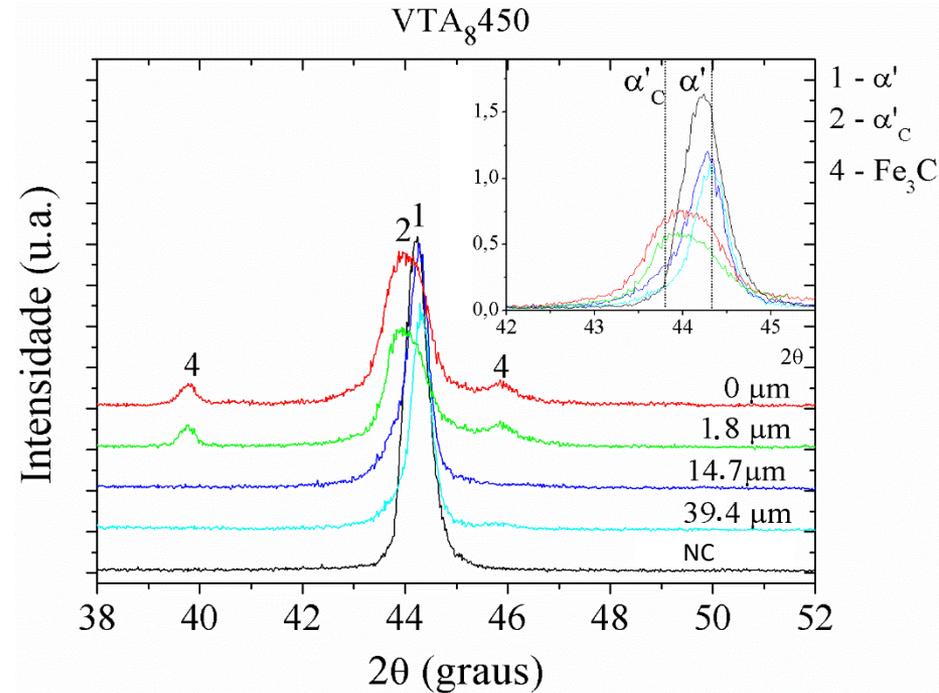
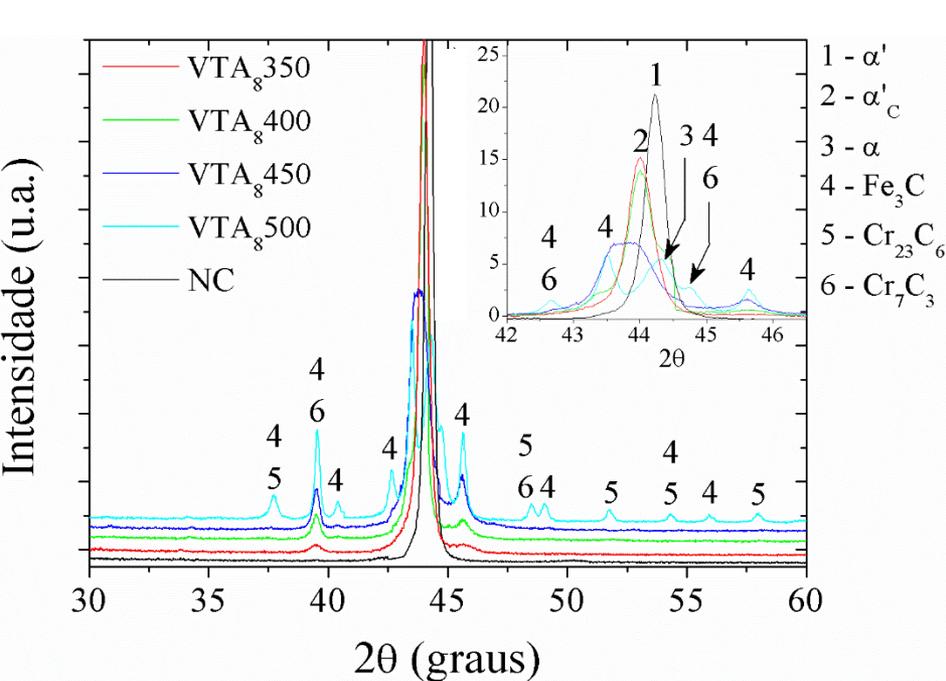
Micrografias da seção transversal (ataque: Marble)

Perfis de dureza



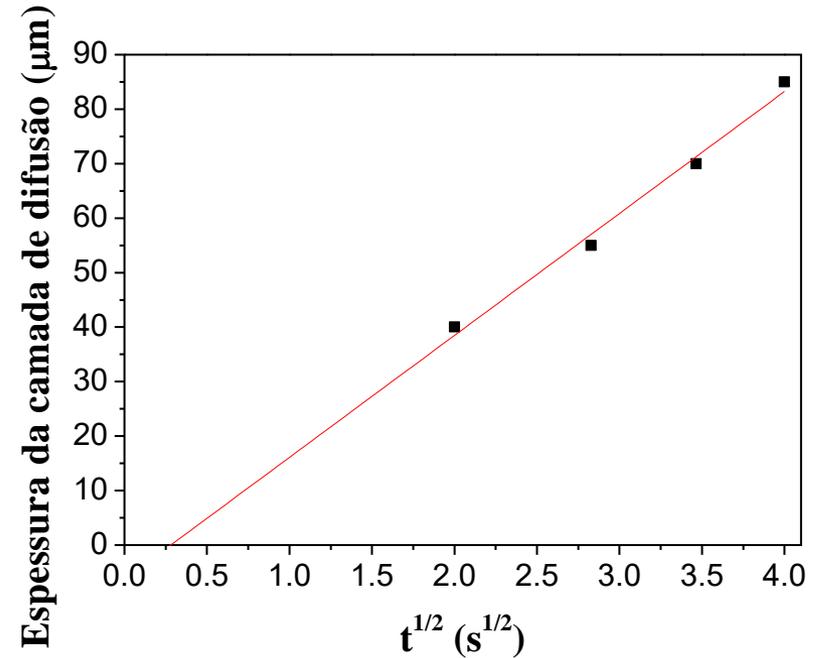
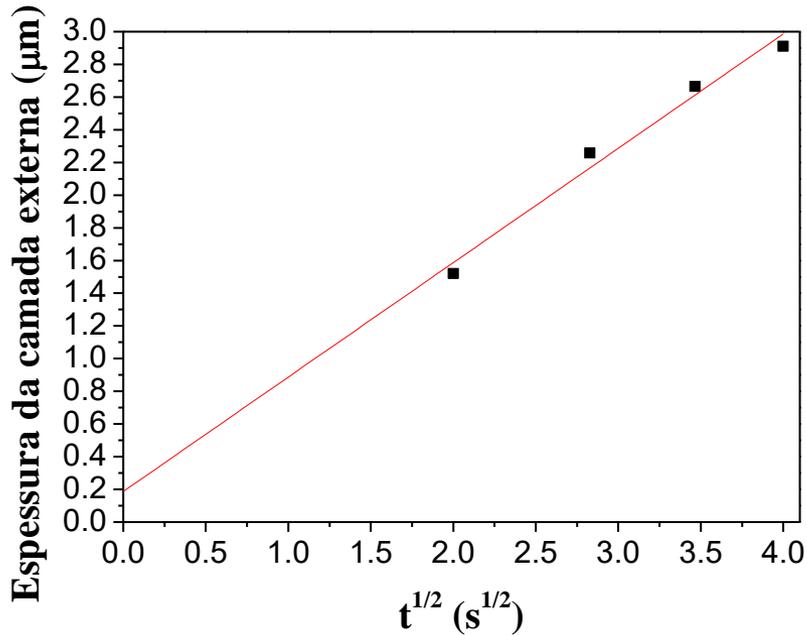
- Perfil suave de dureza da superfície para o núcleo (interessante para aplicações tribológicas)
- Profundidade de difusão/endurecimento aumenta com o tempo e temperatura de tratamento
- Tratamentos de cementação e revenimento ocorrem simultaneamente (observa-se redução da dureza do núcleo)

DRX



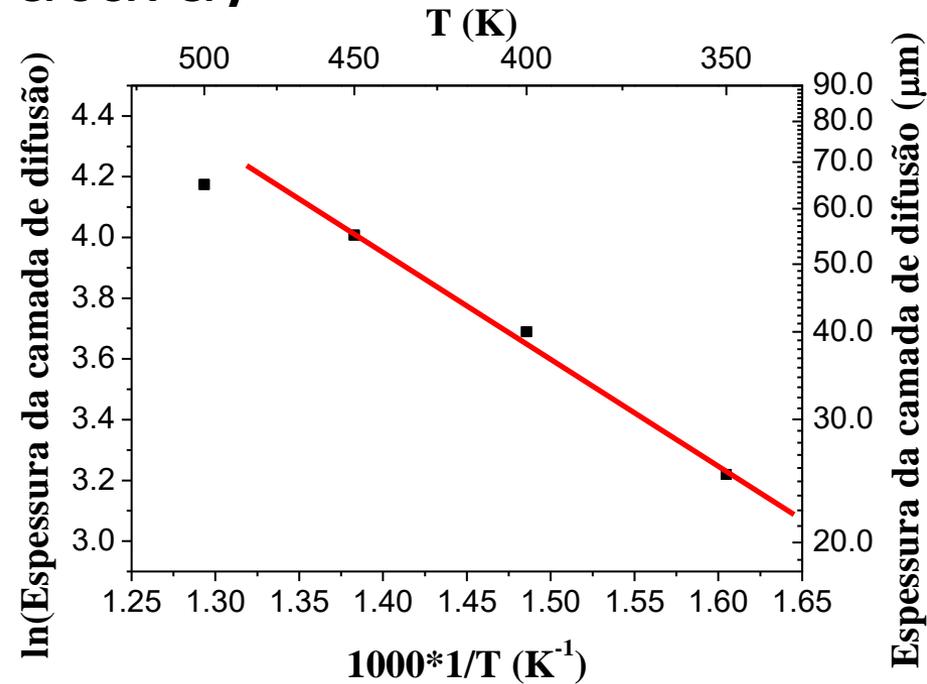
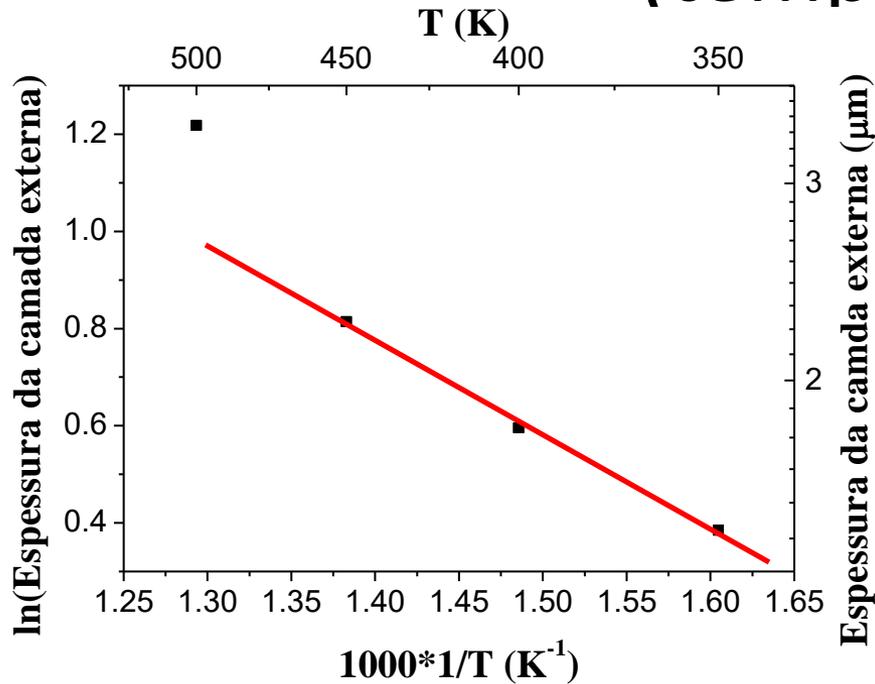
- Deslocamento do pico principal da martensita para menores ângulos (α'_C - martensita expandida)
- Formação de carbonetos M_3C
- Precipitação intensa de carbonetos para 500 °C (confirmando a sensitização e a decomposição da fase α'_C)
- Resultados sugerem que a camada externa contém as fases M_3C e α'_C

Espessura da camada tratada (tempo)



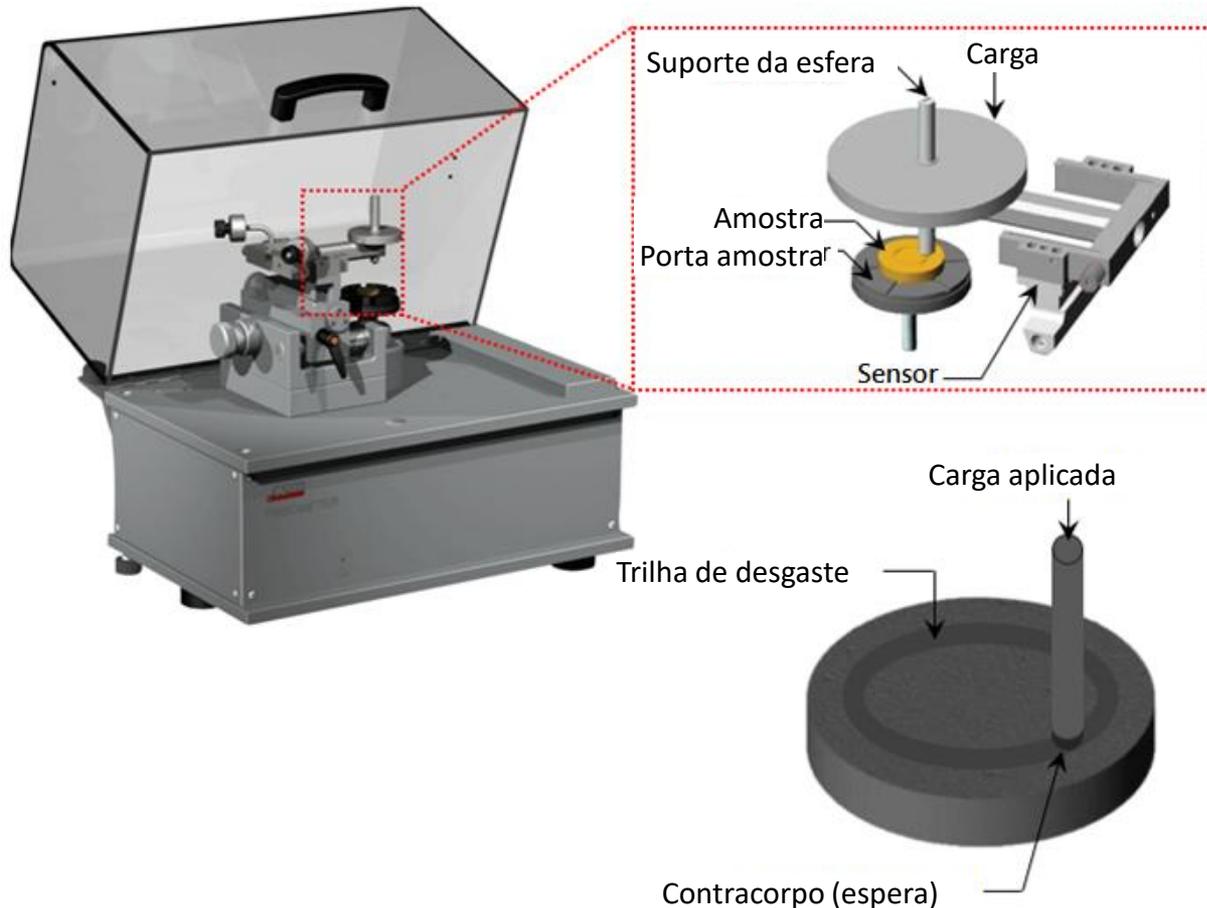
➤ Uma relação linear entre a espessura das camadas com a raiz quadrada do tempo é observada (típico para processos controlados por difusão)

Espessura da camada tratada (temperatura)



- Para tratamentos onde não correu precipitação de carboneto de cromo (baixa temperatura), a espessura das camadas estão alinhadas em um diagrama de Arrhenius (em concordâncias com o processo de difusão)
- Quando a precipitação ocorre, o comportamento se altera, indicando a existência de um fenômeno adicional (precipitação)

Ensaio de deslizamento a seco



Tribômetro esfera sobre disco CSM

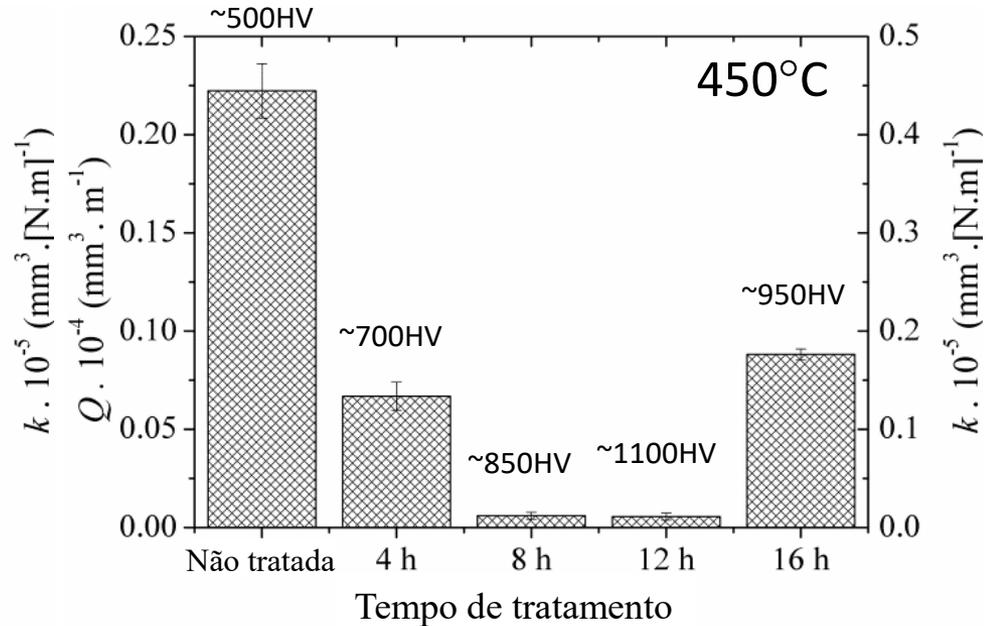
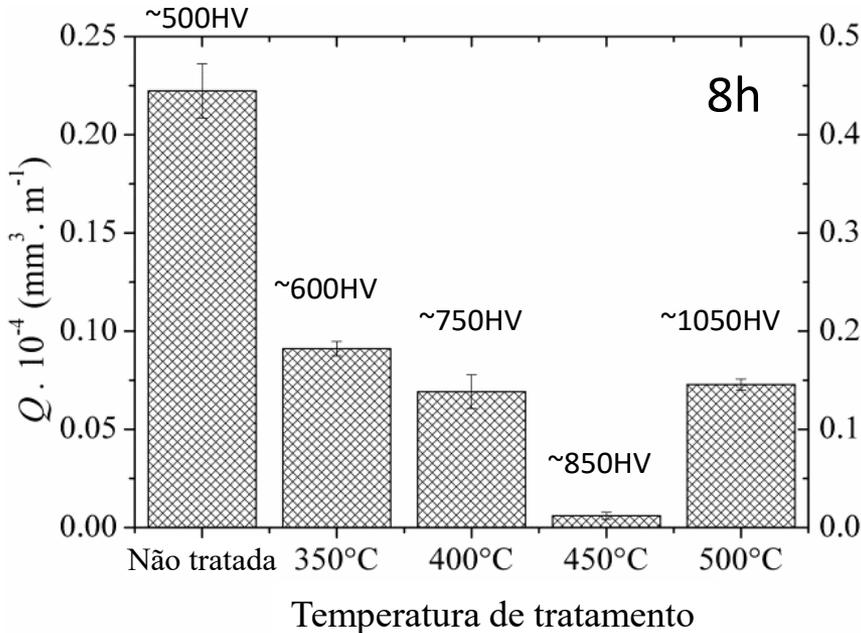
Deslizamento a seco
Parâmetros fixos:

- Esfera: 6 mm Al_2O_3
- Carga: 5 N
- Distância de deslizamento: 1000 m
- Velocidade: 0,05 m/s
- Diâmetro da trilha: 13mm

Trilha de desgaste medida em 10 pontos

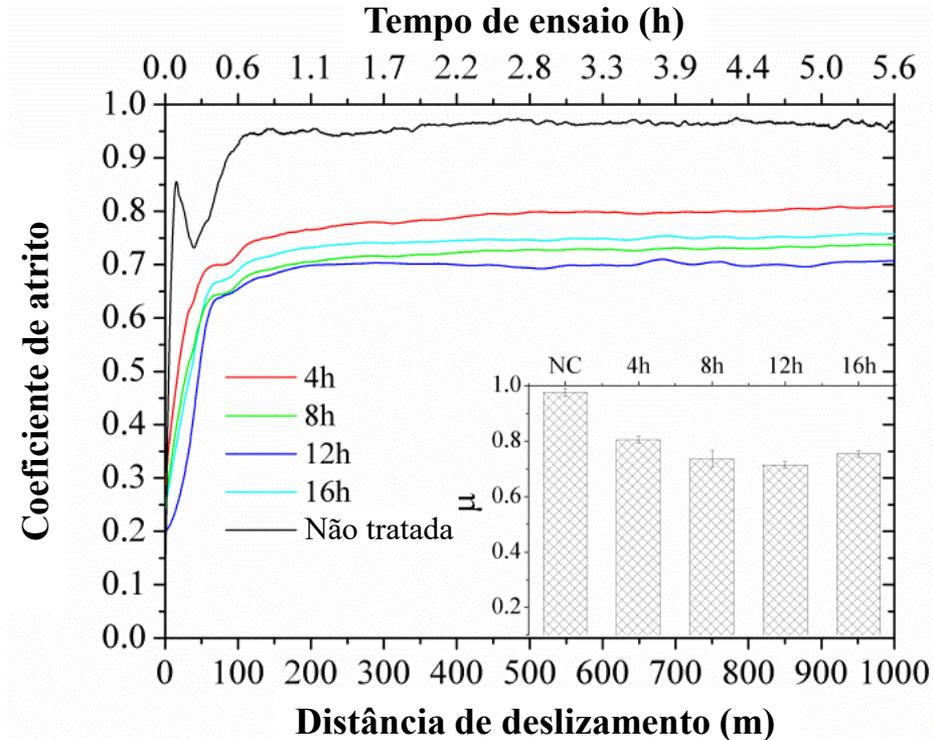
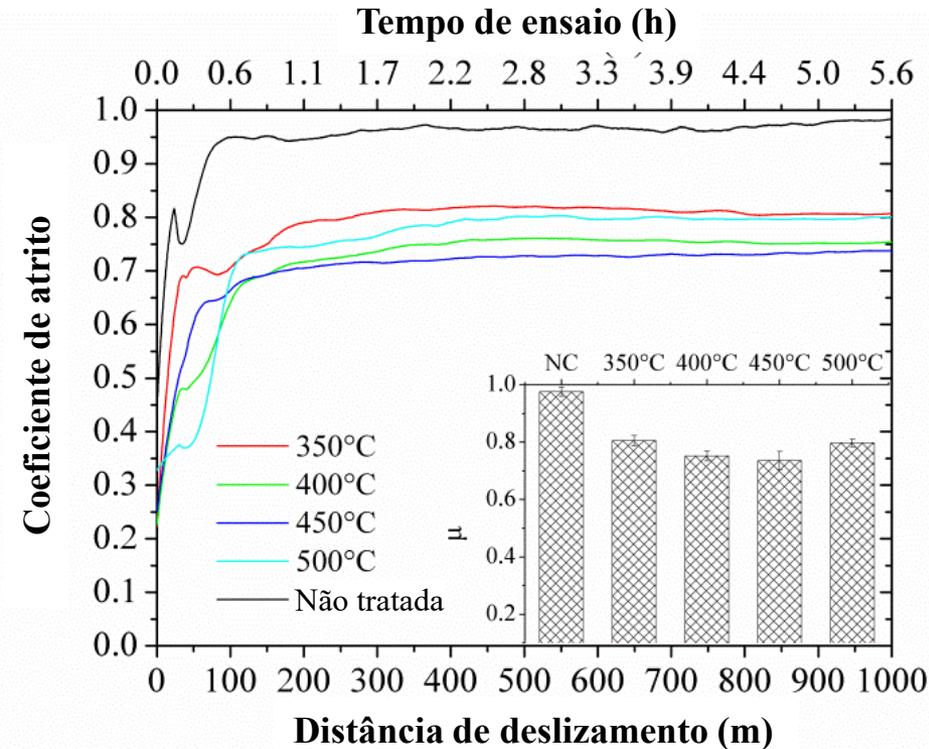
Amostra não tratada é revenida à 300°C por 2 h

Ensaio de deslizamento a seco



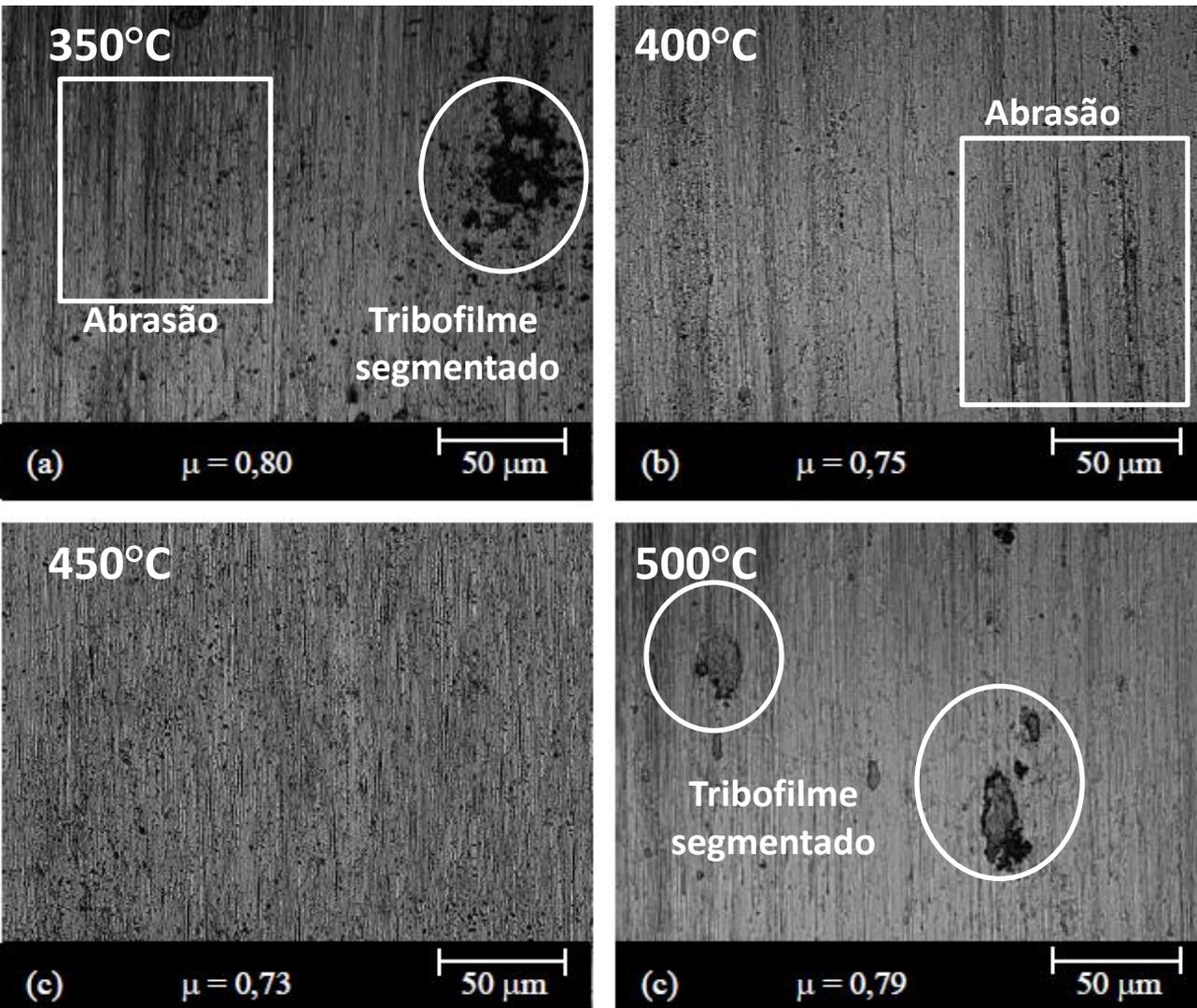
- Para todas condições estudadas a cementação aumentou a resistência ao desgaste da superfície
- Menor coeficiente de desgaste foi encontrado para tratamentos a 450°C por 8 e 12 h (redução de 97% em relação à amostra não tratada)
- O coeficiente de desgaste não é função somente da dureza da superfície, mas também de sua microestrutura (quando a sensitização ocorre o coeficiente de desgaste aumenta)

Ensaio de deslizamento a seco



- *Running-in* é observado para os primeiros 200 m de deslizamento
- Uma redução no coeficiente de atrito é observado para todas as condições de tratamento estudadas
- O menor coeficiente de atrito foi observado para 450°C (8 e 12 h)

Ensaio de deslizamento a seco



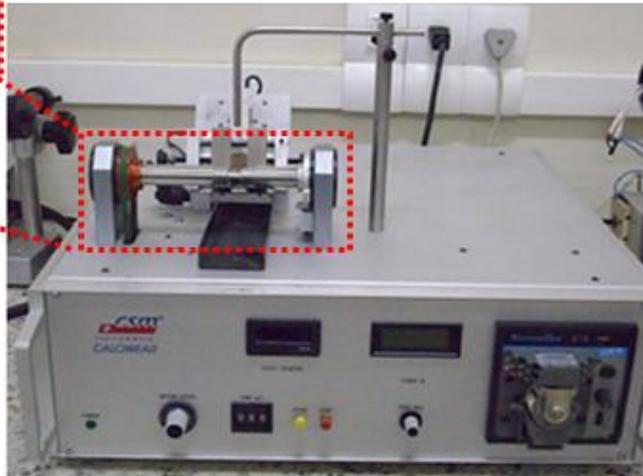
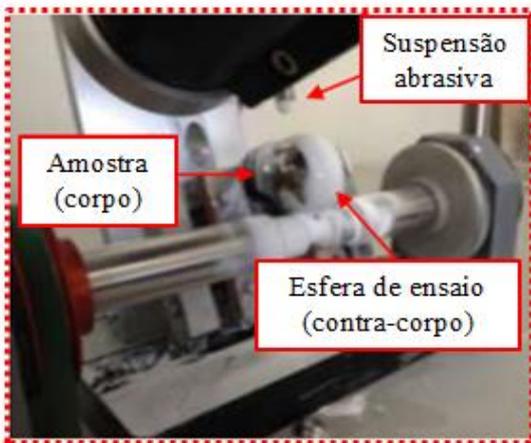
Micrografia da trilha de desgaste

Os mecanismos de desgaste identificados são a abrasão e o desgaste oxidativo

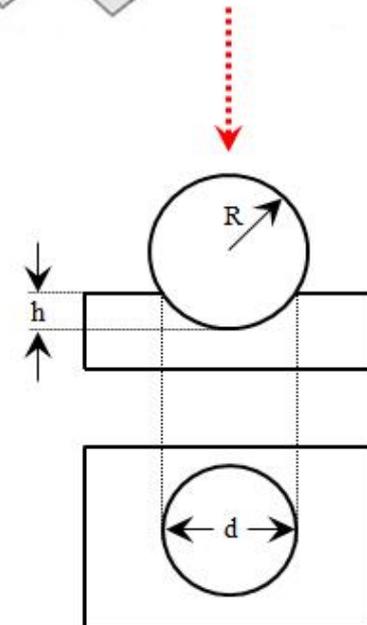
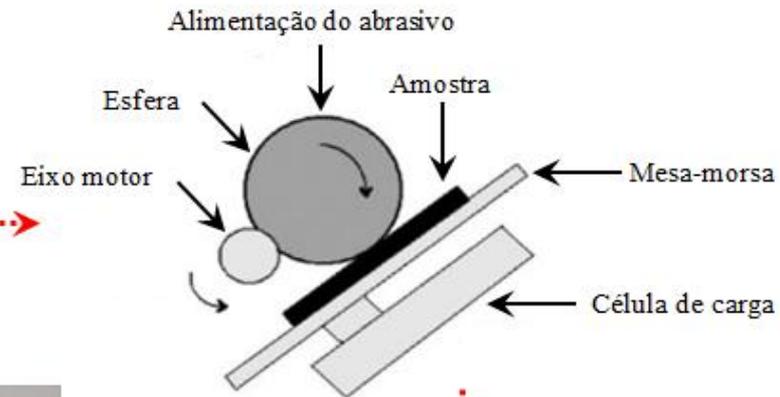
O desgaste das amostras tratadas a 450°C é claramente menos intenso

Resultados similares foram obtidos para os diferentes tempos de tratamento

Ensaio de desgaste microabrasivo



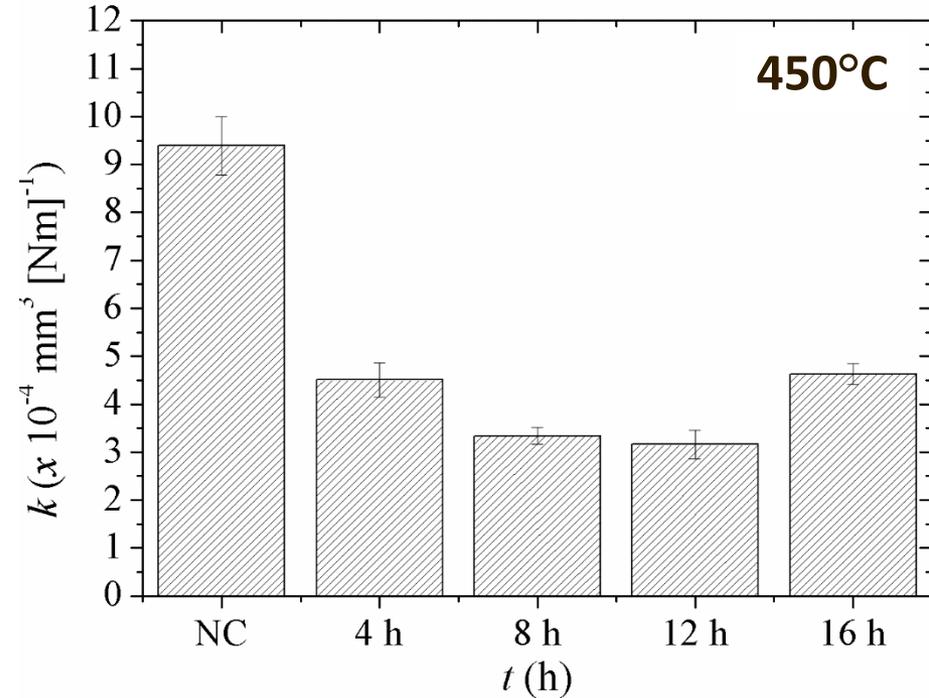
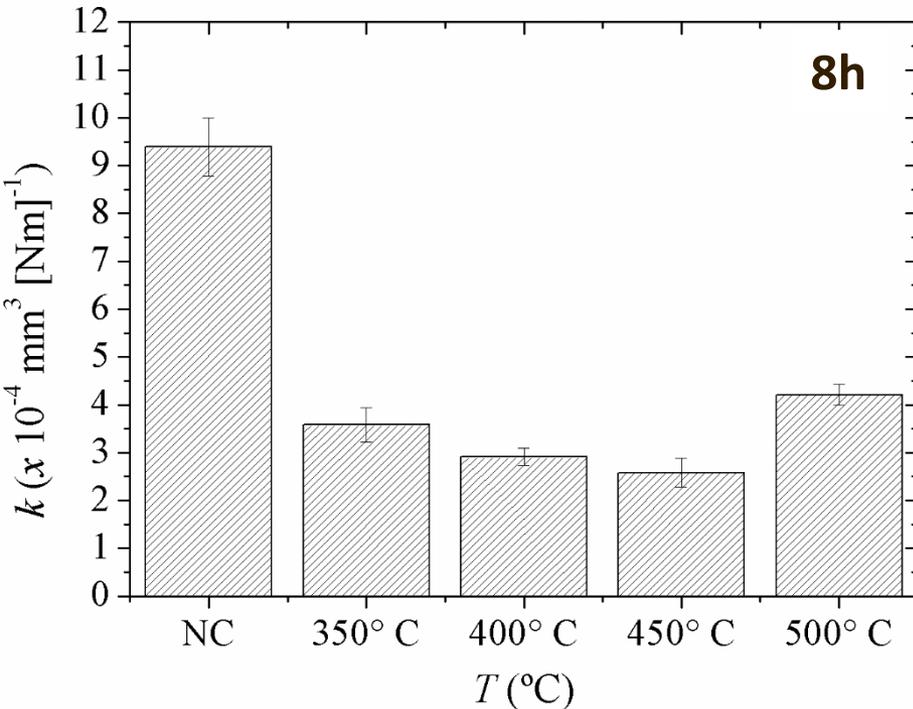
Tribômetro CSM (CaloWear®)



Parâmetros fixos:

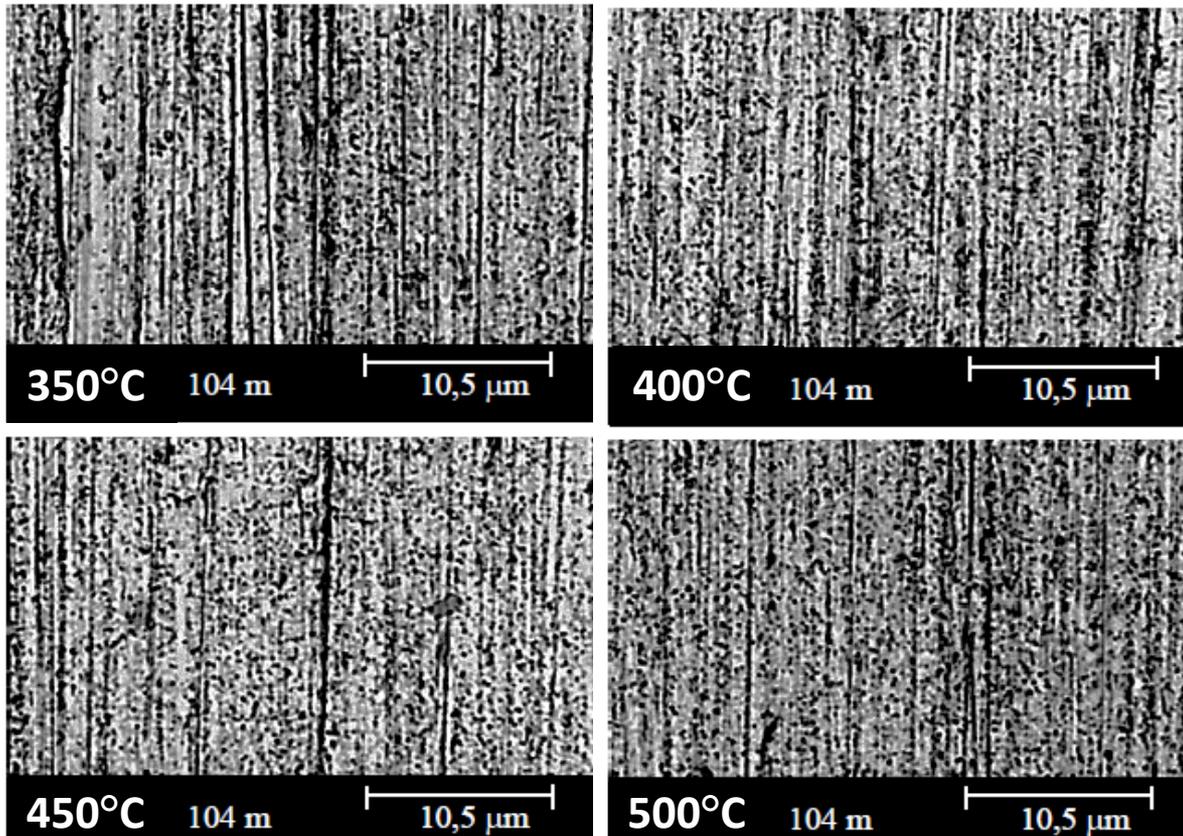
- Esfera: 2" (aços AISI 52100)
- Carga: 0,5 N
- Suspensão abrasiva: $1\mu\text{m Al}_2\text{O}_3$ ($0,11\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
- Distancia de deslizamento: 104 m
- Rotação do eixo: 120 rpm

Ensaio de desgaste microabrasivo



- Para todas as condições estudadas a cementação aumenta a resistência ao desgaste microabrasivo da superfície
- O mínimo coeficiente de desgaste foi obtido para amostras tratadas à 450°C por 8 e 12 h
- Uma redução na resistência ao desgaste é observada quando a precipitação de carbonetos de cromo ocorre

Ensaio de desgaste microabrasivo

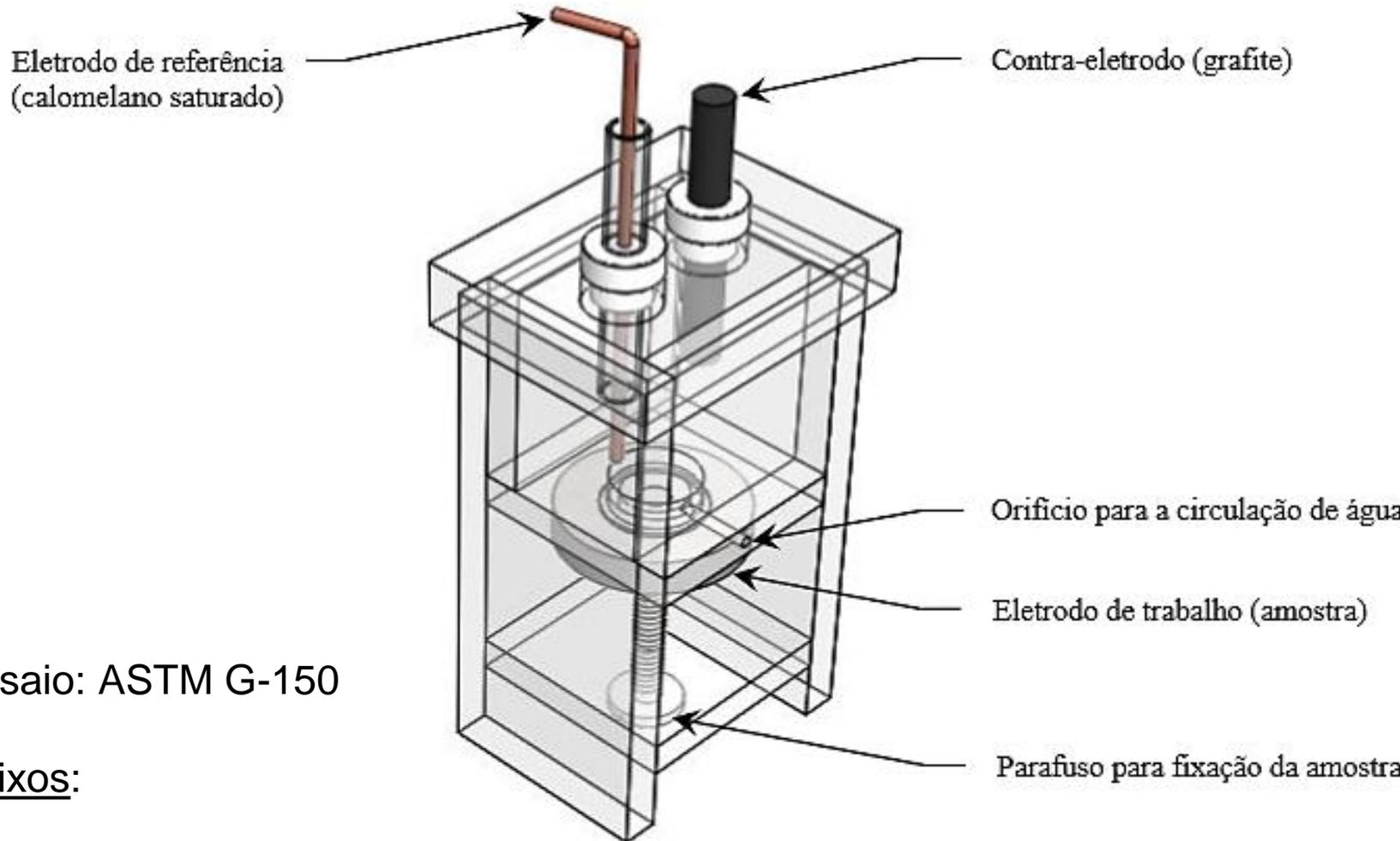


Os mecanismos de desgaste observados são:

- Abrasão por sulcamento
- Abrasão por microrolamento

Micrografia da trilha de desgaste

Ensaio de resistência à corrosão

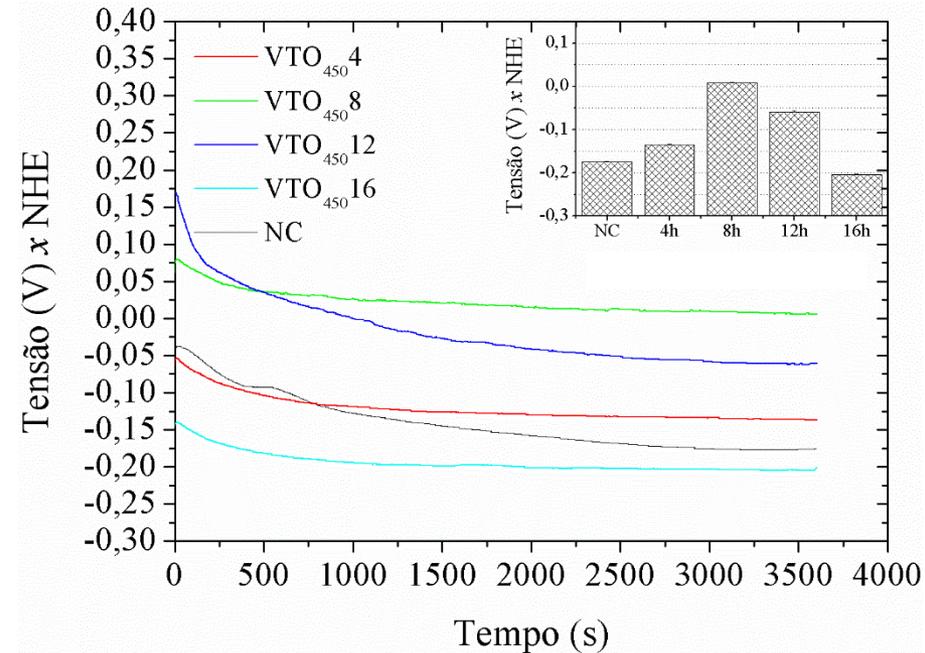
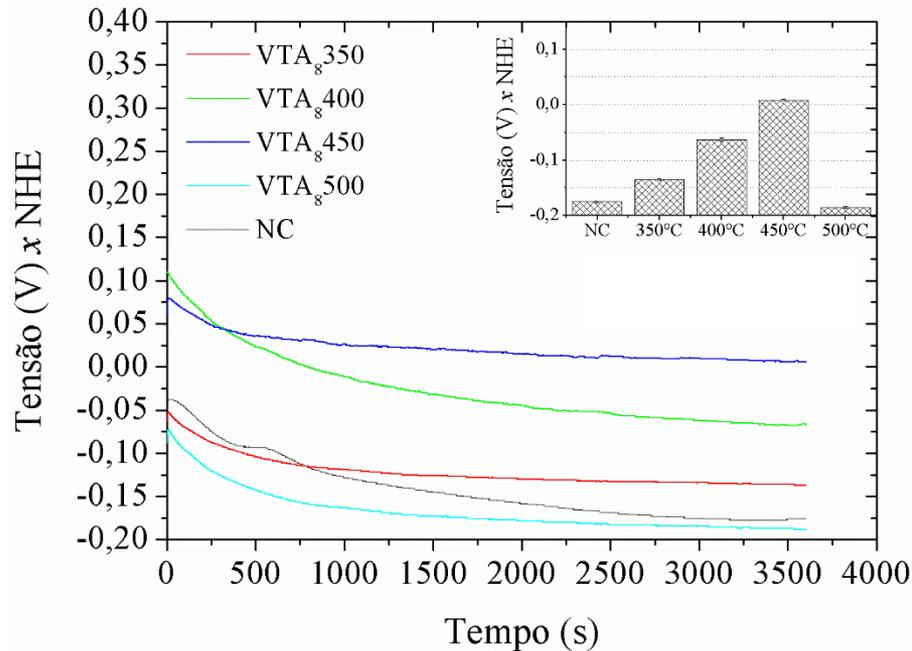


Norma de ensaio: ASTM G-150

Parâmetros fixos:

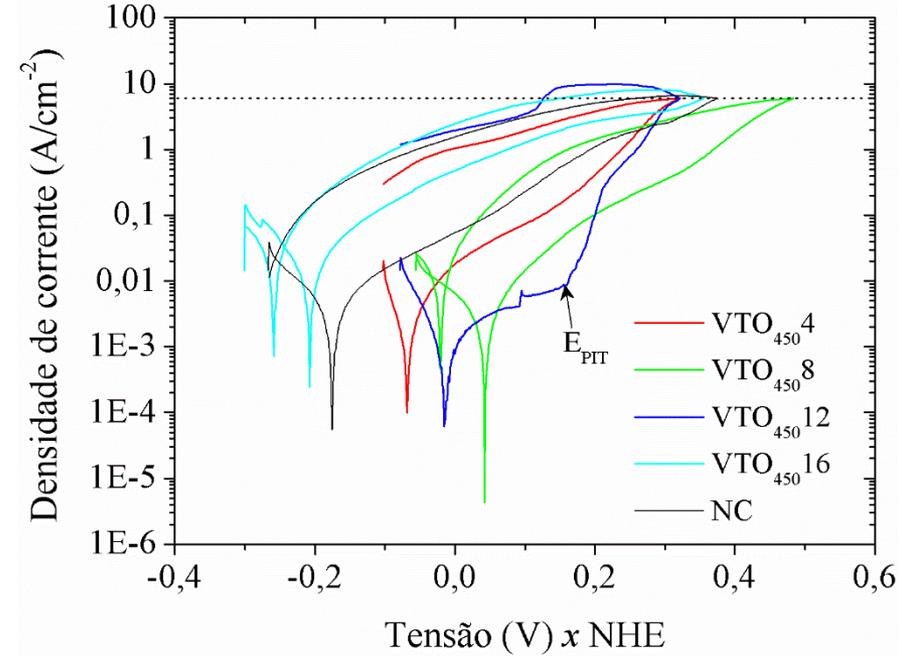
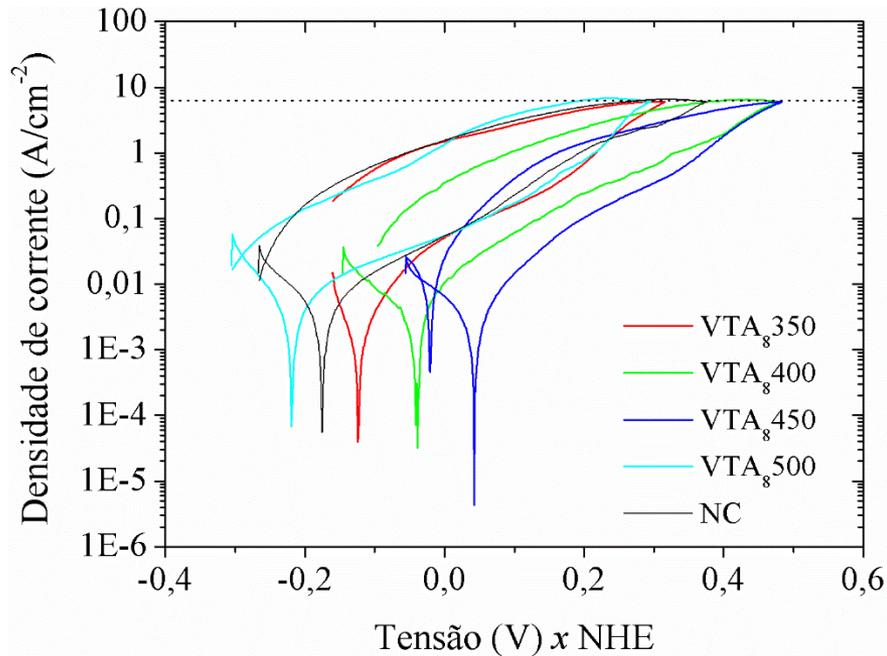
- Eletrólito: 3,0% NaCl
- Início da varredura: OCP-100mV
- Taxa de varredura: 1 mV/s

Teste potencial de circuito aberto (OCP – *open circuit potential*)



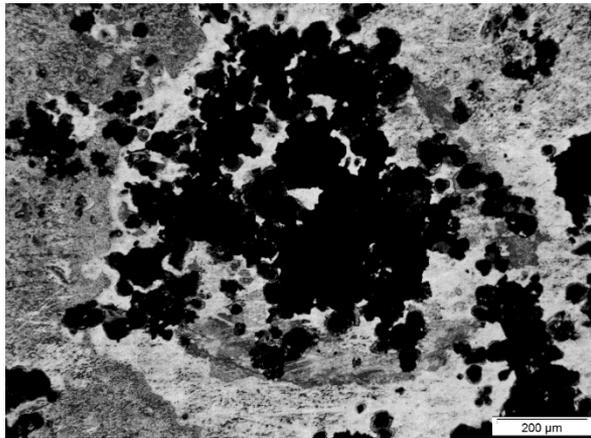
- Comparativamente à amostra não tratada, o OCP das amostras tratadas até 450°C e para tempos de até 12h indicam que as superfícies tratadas são mais nobres
- Quando a precipitação de carbonetos de cromo ocorre (8h-500°C e 16h-450°C) o OCP das superfícies tratadas indica que estas superfícies são menos nobres que a superfície não tratadas (sensitização)

Voltametria cíclica

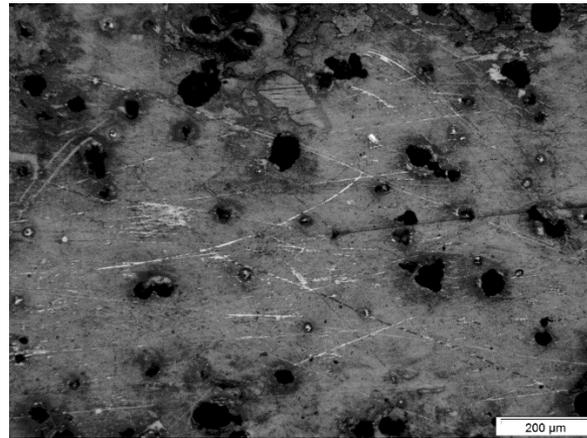


➤ Como regra geral, quando o OCP indica uma superfície mais nobre, as curvas de voltametria cíclica apresentam-se deslocadas para menores densidades de corrente e maiores potenciais (sugerindo maior resistência à corrosão)

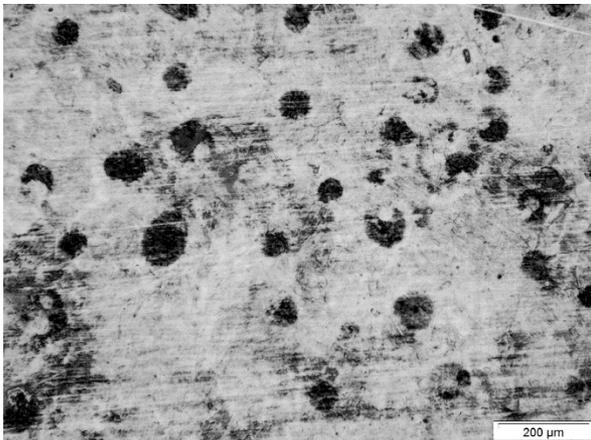
Caracterização da região corroída



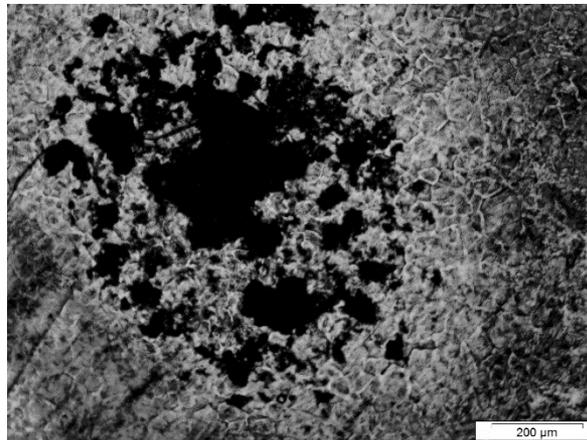
350°C



400°C



450°C

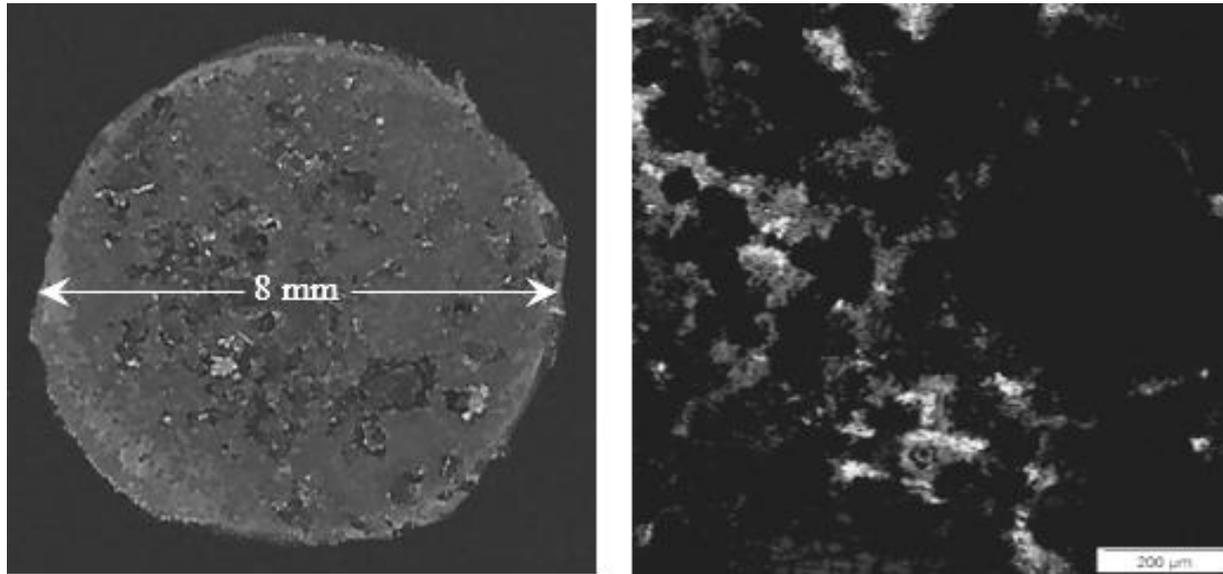


500°C

Micrografias da região corroída

- O principal mecanismo de corrosão é por pitting
- A menor densidade de pitting é observado para a amostra tratada à 450°C

Caracterização da região corroída



Micrografia da região corrída para a amostra não tratada

- Comparativamente às superfícies tratadas, a superfície não tratada está completamente degradada

Conclusões do estudo de caso

- Microestrutura e propriedades:
 - A camada cementada apresenta uma camada externa e uma camada de difusão
 - Para tempos suficientemente curtos ($\leq 12\text{h}$) e temperatura baixas ($\leq 450^\circ\text{C}$) não observou-se a precipitação de carbonetos de cromo
 - Foi possível obter aumento significativo de dureza sem precipitação de carbonetos de cromo
 - Um perfil de dureza suave foi observado na camada de difusão
- Ensaio de deslizamento a seco (esfera sobre disco):
 - Obteve-se uma redução de até 97% no coeficiente de desgaste em relação à amostra não tratada, sendo a melhor performance obtida para tratamentos à 450°C por 8 e 12h
 - Os principais mecanismos de desgaste foram a abrasão e desgaste oxidativo (formação de tribofilme segmentado)
 - Para as condições testadas, a precipitação de carbonetos de cromo reduz a resistência ao desgaste da superfície tratada

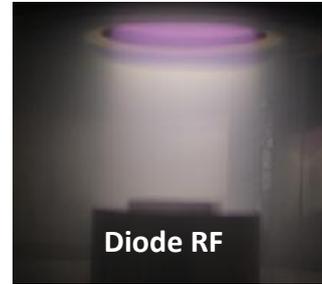
Conclusões do estudo de caso

- Ensaio de desgaste microabrasivo:
 - Uma redução de até 68% no coeficiente de desgaste foi observado, sendo a melhor performance obtida para tratamentos à 450 °C por 8 e 12h
 - Os principais mecanismos de desgaste observados foram a abrasão por sulcamento e abrasão por micro-rolamento
 - A precipitação de carbonetos de cromo reduz a resistência ao desgaste da superfície tratada
- Ensaio de resistência à corrosão
 - As medidas de OCP mostraram que quando a precipitação de carbonetos de cromo é evitada a superfície da amostra tratada é mais nobre que a da amostra não tratada
 - Ensaio de voltametria cíclica indicam que as superfícies mais nobres tendem a apresentar maior resistência à corrosão (deslocamentos das curvas para maiores potenciais e menores correntes)
 - O principal mecanismo de corrosão observado foi a corrosão por *pitting*

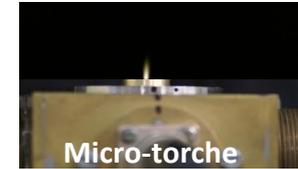
Outros plasmas Ex. IJL - França



Diode DC



Diode RF



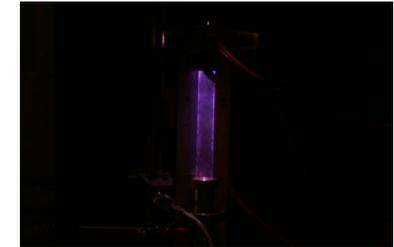
Micro-torche



μO PA



μO afterglow



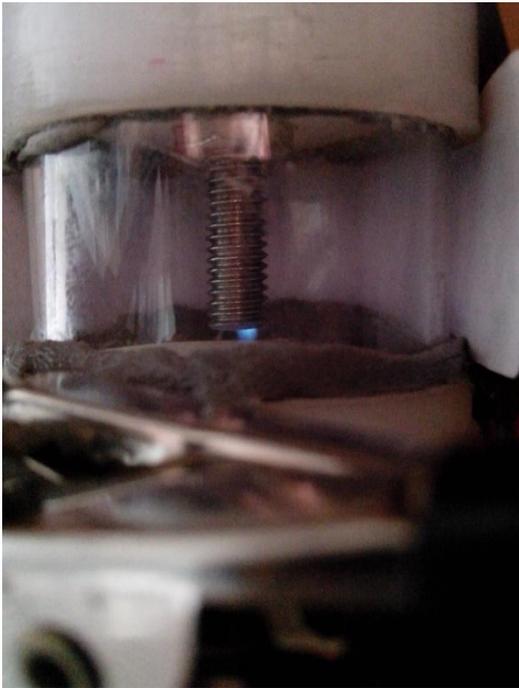
Haute pression
micro-arc



RF Cathodes creuses

Futuros desenvolvimentos no LT2P

Microplasmas à pressão atmosférica



Novas aplicações de plasma DC

Estruturação de superfícies

Novos ensaios de desempenho:

Cavitação

Tempo para perguntas relacionadas
ou não à apresentação

Vídeo

Prof. Rodrigo Perito Cardoso

Agradecimentos

- Prof. Sílvio Francisco Brunatto
- A todos alunos de Iniciação científica, mestrado e doutorado
- Ao CNPQ, Capes, PRH24 e à UFPR

Obrigado!

rodrigo.perito@ufpr.br