

## CEMENTAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 316

\*

*Henrique Gobbi Soares<sup>1</sup>  
Adonias Ribeiro Franco Jr<sup>2</sup>*

### Resumo

Peças fabricadas em aços inoxidáveis austeníticos permanecem íntegras em ambientes corrosivos severos, ambientes industriais, marítimos, na presença de ácidos e gases oxidantes. Entretanto, quando a sua aplicação além de requerer resistência à corrosão relativamente alta, necessita de boas propriedades em termos de resistência ao desgaste sua utilização se torna restringida. Este trabalho teve como objetivo o estudo da melhoria dessas propriedades restritivas e o aprimoramento da técnica, através do aumento da dureza superficial dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 316, utilizando cementação a plasma frio. Para tanto foram propostos tratamentos na temperatura de 350°C, 5hrs, 340 Pa, variando a composição do gás de tratamento. As análises dos produtos de cementação foram feitas utilizando técnicas de caracterização estrutural, difração de raios-X, medidas de perfis de dureza e ensaios microabrasivos. Todas as condições apresentaram melhorias na resistência ao desgaste e na dureza, entretanto o aumento da concentração de metano na atmosfera de trabalho promoveu a formação de fuligem, promovendo regressão das propriedades conforme se elevava a concentração de metano nos processos.

**Palavras-chave:** Cementação a plasma; aço AISI 316; desgaste microabrasivo.

### CARBURIZING OF AISI 316 STEEL

#### Abstract

Parts manufactured from austenitic stainless remain permanent for corrosive environments, for industrial, marine, gas and oxidizing gases. However, when its application is required relatively high corrosion resistance, associate wear resistance its application becomes restricted. The objective of this work was to study the improvement of restrictive properties and the improvement of the technique by increasing the surface hardness of AISI 316 austenitic stainless steels using cold plasma cementation. In this way, it has proposed treatments at a temperature of 350°C, 5 hours, 340 Pa, varying the composition of the treatment gas. Structural characterization techniques, X-ray diffraction, hardness profile measurements and microabrasive tests were performed as cement product analyzes. All the conditions presented improvements in the resistance to wear and hardness, however the increase of the methane concentration in the working atmosphere promoted soot formation, regressing properties according to the elevation of methane concentration in the processes.

**Keywords:** Plasma carburizing; AISI 316 steel; microabrasive wear.

<sup>1</sup> Engenheiro, Mestrando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro, Dr., Professor, PROPEMM, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

<sup>3</sup> .

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a aplicação dos aços inoxidáveis vem se tornando uma realidade e importantes setores industriais brasileiros. Os segmentos de Açúcar & Alcool, Petróleo & Gás, Papel & Celulose, Mineração, Metal-mecânica, entre outros, empregam ligas de aços inoxidáveis em equipamentos industriais. Alguns resultados laboratoriais e industriais vêm comprovando que aços inoxidáveis apresentam um menor custo/benefício para diversas aplicações [1-3].

A classe que evolue os aços austeníticos apresenta ótimo desempenho sob atmosferas corrosivas. No entanto, quando a aplicação demanda todas as características em termos de resistência à corrosão e ao mesmo tempo necessita de boa resistência ao desgaste os materiais em questão não apresentam comportamento adequado [3-4].

Diante da configuração apresentada, se faz necessário o uso de técnicas de engenharia de materiais, enquadradas na subárea de engenharia de superfícies. Assim pode-se corrigir tal empecilho passando o material a apresentar comportamento satisfatório quando sujeito a solicitações dessa natureza [5-6].

Para aços carbonos, a resistência ao desgaste é aumentada com a utilização, por exemplo, da cementação convencional, que é bastante eficaz para atmosferas enriquecidas em carbono, realizadas sob temperaturas da ordem de 900°C. O que impossibilitaria a realização de tal tratamento para aços inoxidáveis, visto que tal temperatura acarretaria na degradação do material, precipitando carbonetos de cromo, perdendo sua resistência à corrosão, isto é sensitizando-o. [6].

Por isso, vem sendo estudado a cementação a plasma frio para aços austeníticos, que possibilita a execução de tratamentos a temperaturas inferiores a 500°C, evitando a degradação do material por meio da formação de compostos de cromo, melhorando o comportamento em desgaste. A utilização da técnica assistida por plasma apresenta vantagens significativas. Como benefício se pode obter produtos com superfícies endurecidas, resistentes ao desgaste permanecendo o núcleo tenaz e com capacidade do material absorver impactos [6-9].

Em relação às características dos tratamentos termoquímicos convencionais, a técnica apresenta diversos benefícios dentre eles podem ser citados a maior eficiência energética, baixo consumo de gás, menor tempo de ciclo, ausência de problemas ambientais pela inexistência de produtos poluentes ou tóxicos, obtenção de superfícies sem a necessidade de acabamentos posteriores [8-11].

Assim, o presente trabalho busca aprimorar a técnica ainda pouco utilizada para aços austeníticos colaborando para o desenvolvimento de materiais e componentes de qualidade superiores, além de verificar e quantificar mediante a utilização de ensaios práticos o desempenho dos produtos e da cementação a plasma frio para o aço austenítico AISI 316, quando se tem a composição do gás de trabalho variando.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

Foram comparadas amostras de aço inoxidáveis AISI 316 sem tratamento e tratadas com cementação plasma a temperatura de 350°C e 340 Pa, durante 5 hrs, variando a composição da mistura de 5% CH<sub>4</sub>/95% H<sub>2</sub>, 10% CH<sub>4</sub>/90% H<sub>2</sub>, 20% CH<sub>4</sub>/80% H<sub>2</sub> e 30%CH<sub>4</sub> /70% H<sub>2</sub>. A Tabela 1 apresenta a composição do aço inoxidável utilizado.

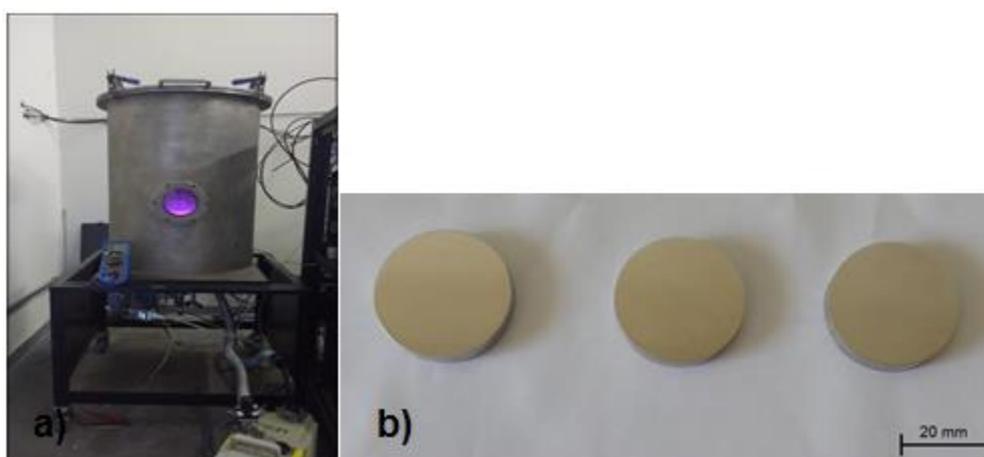
**Tabela 1.** Composição química aço AISI 316 em % massa

Aço	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Mo
AISI 316	máx 0,08	máx 2,0	máx 0,3	16-18	10-14	máx 0,045	máx 0,03	2-3
Medida	0,045	1,3	0,3	16,7	10,4	0,02	0,02	2

### 2.2 Procedimentos Experimentais

#### 2.2.1 Cementação a plasma

Utilizou-se uma barra de aço inoxidável de composição descrita na Tabela 1, com comprimento de 1 m por 32 mm de diâmetro, esta foi seccionada por meio operações de cortes em pastilhas redondas, com espessura de 5 mm por 32mm de diâmetro, conforme mostrado na Figura 1 b, as amostras foram lixadas e polidas. Utilizou-se o reator Reator Thor NP 5000, da fabricante SDS, para execução dos tratamentos de cementação a plasma em baixa temperatura, ilustrado a Figura 1 a.



**Figura 1.** (a) Reator Thor NP 5000 (b) Amostras preparadas para tratamento.

Os tratamentos de cementação foram realizados utilizando duas amostras por condição, foi realizado um pré-tratamento de *sputtering* a temperatura de 300°C por 30 minutos a pressão de 200 Pa, com a finalidade de remover a camada de óxido na superfície das amostras e viabilizando a difusão do carbono nas condições estabelecidas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Condições de cementação a plasma utilizado

TEMPERATURA(°C)	CONDIÇÃO	MISTURA GASOSA	TEMPO(h)	PRESSÃO (Pa)	
				Sputtering	Tratamento
350	a)	5%CH <sub>4</sub>	5	200	340
		95%H <sub>2</sub>			
	b)	10%CH <sub>4</sub>			
		90%H <sub>2</sub>			
	c)	20%CH <sub>4</sub>			
		80%H <sub>2</sub>			
	d)	30%CH <sub>4</sub>			
		70%H <sub>2</sub>			

### 2.2.2 Caracterização estrutural

As camadas formadas pela austenita expandida ou Fase S, foram medidas com o microscópio eletrônico Inspect 55 na direção transversal ao tratamento, após ataque químico revelador com água régia. Para determinar as fases presentes utilizou-se difratômetro (DRX) modelo D8 Phaser, foi realizado lixamento prévio das amostras a 800# de modo a remover a camada de sujeira nas superfícies, seguido de limpeza das superfícies com acetona, para evitar interferências da medição.

### 2.2.3 Caracterização tribológica

Os ensaios de ultra microdureza Vickers destinados à determinação dos perfis de dureza das amostras cementadas, cortadas e embutidas de forma que se pode analisar a direção transversal, os ensaios foram conduzidos no equipamento DUH-211S/SHIMADSU, utilizando-se como carga de indentação 50 mN, sendo, estas realizadas na superfície transversal em relação a camada cementada, direcionadas do topo (superfície cementada) para o centro da amostra com espaçamentos de indentação de 0,1 mm, até que alcançar dureza equivalente a amostra de referência (não cementada). Os ensaios foram repetidos por três vezes, de modo, que os resultados apresentados correspondem a médias aritméticas dessas medidas.

Os ensaios referentes ao estudo da resistência desgaste foram realizados no equipamento de microabrasão do tipo “esfera livre” da marca CSM Instruments em que consiste no desgaste ocorrido em um corpo de prova, pela ação de uma esfera e partículas abrasivas, havendo ação de uma pressão e presença de um abrasivo, contra uma superfície plana da amostra, produzido assim uma calota, denominada como cratera de desgaste, a qual foi fotografada com auxílio de uma luneta com aumento de 100X.

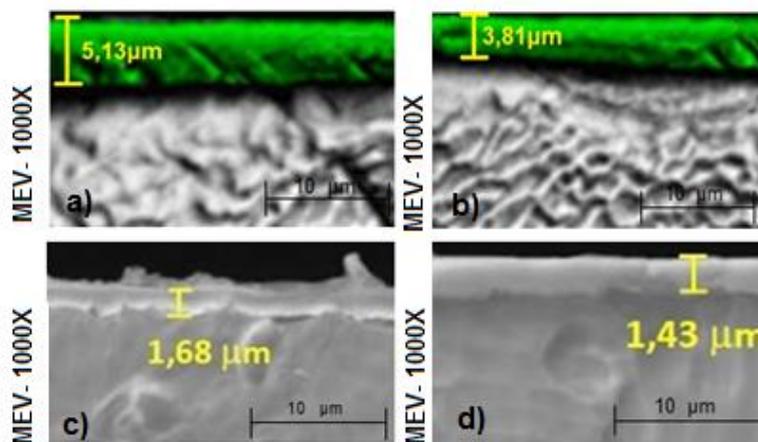
Os diâmetros das calotas foram medidos a cada 750 rotações da esfera para cálculo do coeficiente de desgaste correspondente a cada tratamento.

As condições de desgaste foram utilizadas com a uma solução abrasiva preparada com 100 ml de água destilada e 75g de carbeto de silício que gotejava três gotas por segundo sobre o contato da esfera com a superfície da amostra, por sua vez a esfera de aço inoxidável de diâmetro 25,4mm; foi exercida uma pressão através de seu peso sobre a amostra enquanto girava, esta pressão foi regulada pela inclinação do ponto de contato em relação à esfera, até ser obtida uma medida de força correspondente a 0,3N pela célula de carga do equipamento, a velocidade de rotação do eixo do motor utilizada foi de 150RPM, os dados eram indicados no painel de controle do equipamento.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Espessuras das Camadas

As imagens obtidas através de microscopia eletrônica indicam, como se observa na Figura 2 que os tratamentos realizados apresentaram espessura medida de 5,13  $\mu\text{m}$ ; 3,81  $\mu\text{m}$ ; 1,68  $\mu\text{m}$  e 1,43  $\mu\text{m}$  para os tratamentos realizados com 5% CH<sub>4</sub>, 10%CH<sub>4</sub>, 20%CH<sub>4</sub> e 30%CH<sub>4</sub>, respectivamente, as regiões das camadas não sofreram ataque químico revelador por água régia, indicando aumento da resistência à corrosão.



**Figura 2.** (a) Cementação a 5%. (b) Cementação a 10%. (c) Cementação a 20%. (d) Cementação a 30%.

A Figura 3 compara as espessuras das amostras tratadas, mostrando que apresentaram restrições nos desenvolvimentos conforme se elevou as composições de metano utilizadas, acredita-se que essa relação é devida ao fato de que à medida que foi elevada a composição de metano, ocorreu saturação da superfície, favorecendo a formação de fuligem aderida as superfícies tratadas, essa fuligem é uma matéria preta, de natureza orgânica, gordurosa, na forma de diminutas partículas que provavelmente tem papel de bloqueio no processo deposição e difusão das espécies em questão.

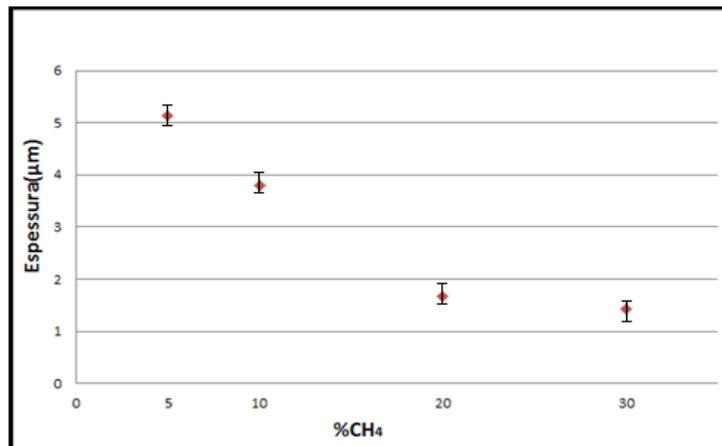


Figura 3. Espessuras das camadas cementadas.

### 3.2 Determinações das Fases

Observou-se o deslocamento dos picos de difração das amostras tratadas para ângulos menores, ou seja, retículos cristalinos de comprimentos maiores (austenita expandida) para todas as amostras tratadas. O difratograma das amostras tratadas apresentou-se com a base do pico de difração com espessuras maiores em relação à amostra sem tratamento, vide difratograma apresentado na Figura 4, em função do desordenamento desse tipo de estrutura [8] além de picos relacionados à presença de carboneto de cromo as amostras tratadas utilizando 5% e 10%CH<sub>4</sub>.

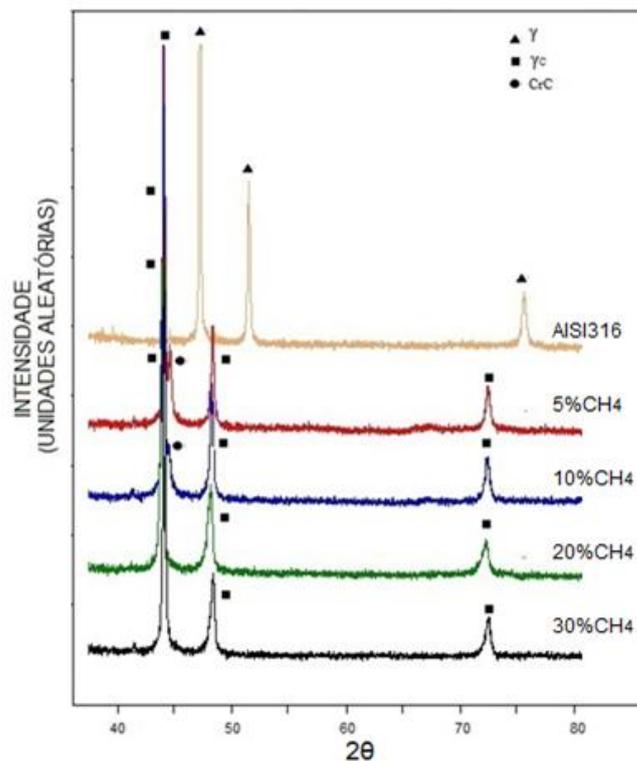


Figura 4. Difratograma das amostras cementadas a plasma.

### 3.3 Perfis de Dureza

Na Figura 5 estão apresentadas os perfis de dureza obtidos nas amostras tratadas, lembrando que a amostra de controle apresentou dureza de 220 Hv<sub>0,01</sub>, então realizou-se as medidas de dureza a partir da superfície, até ser obtido o valor de 220 Hv<sub>0,01</sub> nas amostras tratadas, observou-se que a amostra trata com 5%CH<sub>4</sub> apresentou uma dureza de topo na faixa de 335 , enquanto as dureza das demais ficaram na faixa de 305 Hv<sub>0,01</sub>. Acredita-se que a ausência de barreira de difusão favoreceu uma maior penetração no material tratado com 5% CH<sub>4</sub>, dessa forma foi possível uma saturação mais efetiva da rede da austenita, medindo uma dureza mais elevada às demais condições, assim como um perfil localizado na faixa superior do gráfico apresentado na Figura 5.

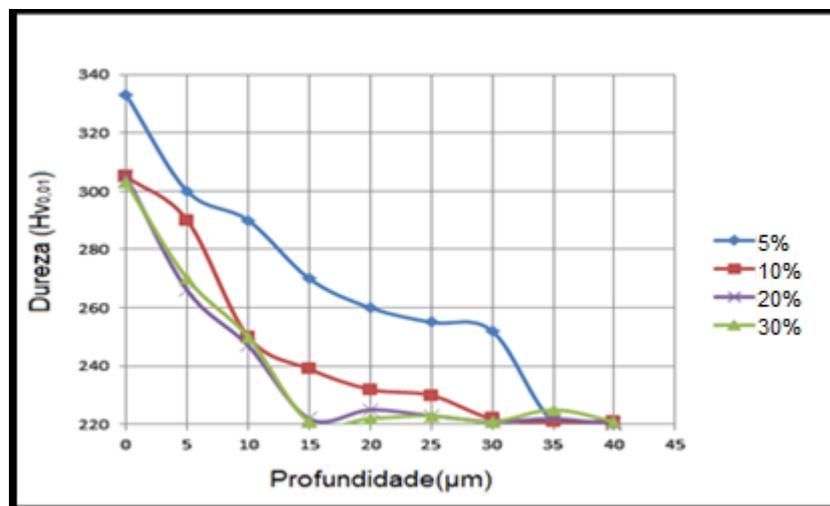


Figura 5. Perfis de dureza obtidos para amostras cementadas a plasma.

### 3.4 Resistências ao Desgaste Microabrasivo

Para encontrar o coeficiente de desgaste foram necessários cálculos que seguem a Equação 1, os termos contemplados são coeficiente de desgaste(K), volume desgastado (V), Força Normal aplicada a superfície(Fn) e Distância de deslizamento(S).

$$K = \frac{V}{Fn.S} \quad (1)$$

Realizando as devidas manipulações para encontrar o coeficiente de desgaste em função dos parâmetros controlados, temos a Equação 2, onde tem-se termos da equação anterior, acrescidos do diâmetro da calota(d), tempo (t), rotação da esfera(n<sub>esf</sub>) e raio da esfera de desgaste(R) que no presente trabalho possui valor de 12,7mm:

$$K = \frac{d^4}{128.t.n_{esf}.Fn.R^2} \quad (2)$$

As medidas dos diâmetros das calotas retornaram valores de coeficiente de desgaste correspondente a ( $10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ ) 1,65; 1,36; 1,4; 1,5 e 1,5; para a matriz, amostras tratadas com 5%  $\text{CH}_4$ , 10%  $\text{CH}_4$ , 20%  $\text{CH}_4$ , 30%  $\text{CH}_4$ , respectivamente, conforme o gráfico na Figura 6.

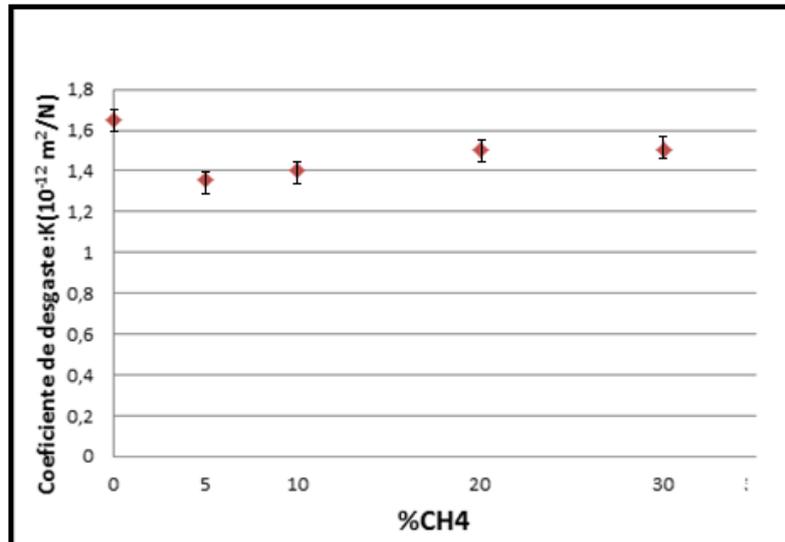


Figura 6. Coeficiente de desgaste em função da composição de tratamento.

Assim utilizando as mesmas medidas de diâmetros das calotas foram utilizados para encontrar os volumes desgastados em função com a distância deslizada (calculada com número de rotações do eixo-motor e diâmetro da esfera de desgaste), foi possível correlacionar o volume desgastado em função da distancia deslizada, atribuindo a curva característica de cada composição de metano utilizada, ilustrada no gráfico da Figura 7. O cálculo do volume desgastado(V) é alcançado com a relação do diâmetro da calota(d) e do raio da esfera(R) apresentado na Equação 3.

$$V = \pi \cdot d^4 / 64R \quad (3)$$

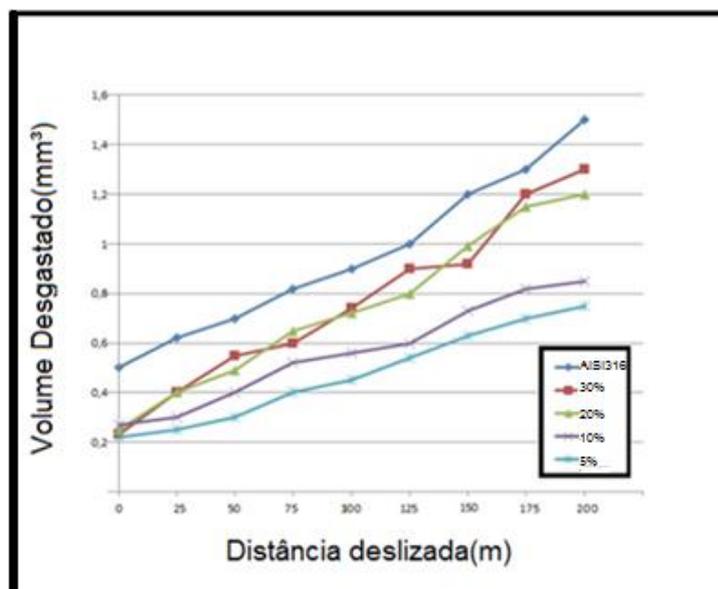
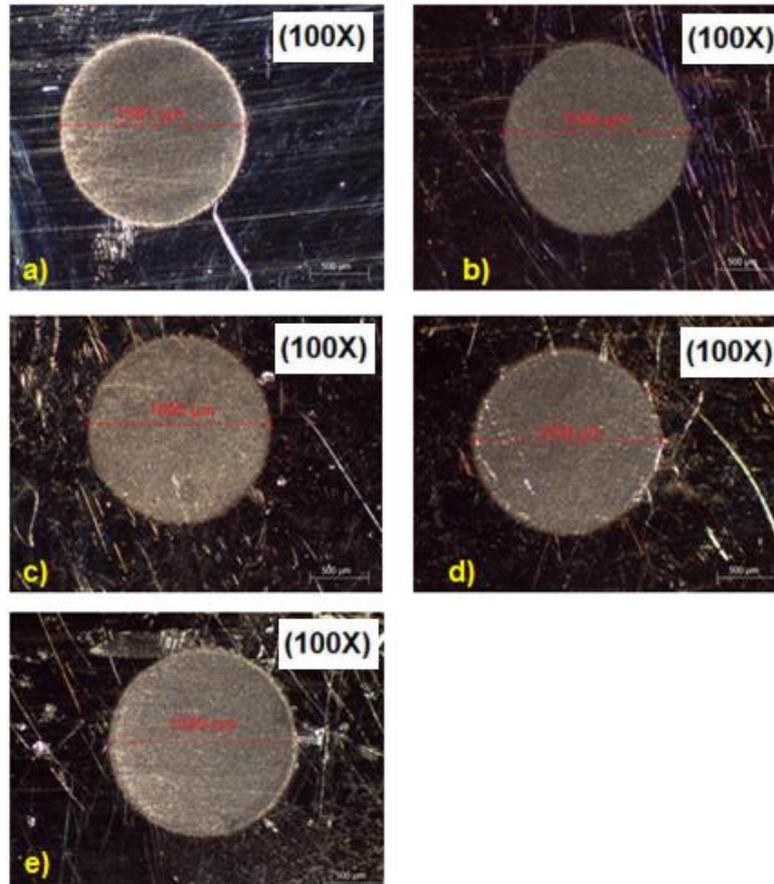


Figura 7. Relação de volume desgastado ( $\text{mm}^3$ ) por distância deslizada(m).

As imagens e medidas das calotas utilizadas para o cálculo do volume de deslizamento a 150m estão representadas na Figura 8.



**Figura 8.** Calotas de desgaste, à distância deslizada de 150m das superfícies (a) matriz (b) tratada a 5%CH<sub>4</sub> (c) tratada a 10%CH<sub>4</sub> (d) tratada a 20%CH<sub>4</sub> (e) tratada a 30%CH<sub>4</sub>.

#### 4 CONCLUSÃO

A aplicação da cementação a plasma a temperatura de 350°C e 340 Pa durante 5 horas tende a ser benéfica para todas as condições analisadas, através da melhoria da resistência ao desgaste, aumento de dureza e formação da camada endurecida, a região das amostras reagidas foram o substrato, permanecendo a camada sem sofrer ataque o que indica melhoria na resistência a corrosão.

Nas condições ensaiadas, a mistura de 5%de CH<sub>4</sub> e 95%H<sub>2</sub> apresentou-se capacidade superior em prover melhorias em relação às propriedades tribológicas do aço AISI 316, formando uma camada com espessura de 5,13µm; 335 Hv<sub>0,01</sub> de dureza superficial e coeficiente de desgaste de 1,36. 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/N.

O difratograma-DRX mostrou a presença de austenita expandida ou Fase S em todas as condições estudadas e picos de carboneto de cromo para as amostras de 5% CH<sub>4</sub> e 10% CH<sub>4</sub>.

Observou-se que à medida que se elevou quantidade de metano na mistura, o mecanismo de formação de fuligem na superfície das amostras era favorecido em detrimento da penetração de carbono no material, essa matéria preta, de origem orgânica, gordurosa, na forma de diminutas partículas atuou como possível bloqueador dos mecanismos que promovem o endurecimento por meio da adesão, deposição e difusão das espécies.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santos-FAPES pelo financiamento e o apoio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais PROPEMM/IFES.

## REFERÊNCIAS

- 1 Carbó HM. Aço inoxidável desenvolvimento e aplicação. Belo Horizonte: Acesita; 2001.
- 2 Carbó HM. Aços inoxidáveis: aplicações e especificações. Belo Horizonte: ArcelorMittal Inox; 2008..
- 3 Carvalho JAN. Aços inox: características e propriedades de uso. In: Seminário Inox 2000; 2000; Timóteo, Brasil. Belo Horizonte: Acesita; 2000.
- 4 De Moraes VL. Estudo Comparativo da Deformação a Frio e da Resistência à Corrosão nos Aços Inoxidáveis Austeníticos AISI 201 e AISI 304. Dissertação (Mestrado). USP, São Paulo, SP, 2010.
- 5 Adachi S, Ueda N. Surface Hardness Improvement of Plasma Sprayed AISI 316L Stainless Steel Coating by Low-temperature Plasma Carburizing. *Advanced Powder Technology*, 24, 818-823, 2013.
- 6 Gobbi SJ, Santos CB., Jacques R, Teischmann L, Strohecker, TRJ Ferreira, JZ. Endurecimento superficial dos aços AISI 316L e AISI 304 por cementação a plasma em baixas temperaturas. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, Paraná, 2006.
- 7 Souza, RM, Ignat M, Pinedo CE, Tschiptschin AP. Structure and Properties of Low Temperature Plasma Carburized Austenitic Stainless Steels. *Surface & Coatings Technology*, v. 204, p. 1102-1105, 2009.
- 8 Bell, T. Surface Engineering of Austenitic Stainless Steel. *Surface Engineering*, v. 18, n. 6, p. 415-422, 2002.
- 9 Dong, H. S-Phase Surface Engineering of Fe-Cr, Co-Cr and Ni-Cr Alloys. *International Materials Reviews*, vol. 55, p. 65-98, 2010
- 10 Bell T. Environmental and Technical Aspects of Plasma Nitrocarburising. *The Second International Symposium on Applied Plasma Science*. *Vacuum*, v.59, n.1, p.14–23, October, 2000.
- 11 Sun Y. Response of Cast Austenitic Stainless Steel to Low temperature Plasma Carburizing. *Materials and Design*, 30, 1377-1380, 2009.