

## Estudo do desgaste abrasivo na camada martensítica de nitrogênio formada sobre o aço inoxidável ferrítico AISI409 através dos processos SHTPN e têmpera

### Study of the abrasive wear on the Nitrogen martensitic layer formed on the AIS409 ferritic stainless steel through the SHTPN and quenching process

#### RESUMO

Processos a plasma vem sendo empregados com o objetivo de melhorar as características superficiais e aumentar o desempenho dos aços inoxidáveis. Resultados significativos têm sido obtidos pelo processo SHTPN (*Solution Heat Treatment after Plasma Nitriding*), devido ao aumento da dureza sem perda de resistência à corrosão. O SHTPN consiste na adição de nitrogênio por meio de uma nitretação por plasma seguido de um tratamento térmico de solubilização, que permite a difusão do nitrogênio para o substrato, possibilitando a formação de martensita de nitrogênio na profundidade de 600µm. Este trabalho tem como objetivo avaliar a resistência ao riscamento da camada martensítica após o processo de SHTPN, têmpera e revenimento em diferentes temperaturas: 200, 400 e 600°C. A resistência ao risco foi analisada por teste linear de riscamento com carga progressiva variando de 15 a 20N, usando um indentador de diamante tipo Rockwell C. As superfícies riscadas foram avaliadas com microscopia ótica e eletrônica de varredura.

**PALAVRAS-CHAVE:** AISI 409. SHTPN. Riscamento. Martensita de nitrogênio.

João Humberto Coelho  
[jcoelho@alunos.utfpr.edu.br](mailto:jcoelho@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Paulo César Borges  
[pborges@utfpr.edu.br](mailto:pborges@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Elisiane Maria Berton  
[saneberton@yahoo.com.br](mailto:saneberton@yahoo.com.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



#### ABSTRACT

Plasma assisted processes have been widely employed aiming to enhance the surface characteristics of stainless steels. Notable results have been obtained by the SHTPN (*Solution Heat Treatment after Plasma Nitriding*), due to the gain of hardness without sacrificing the corrosion resistance. The SHTPN consists in adding Nitrogen through plasma nitriding followed by solution heat treatment, which allows the diffusion of Nitrogen into the base material, making it possible to obtain the Nitrogen Martensite phase 600µm deep. This paper objectives to evaluate the scratch resistance of the SHTPN layer after quenching with different tempering temperatures of 200, 400 and 600°C. The wear resistance was analyzed by linear scratch tests with progressive load, ranging from 15 to 20N, using a Rockwell type C diamond indenter. Scratched surfaces were evaluated by OM and SEM.

**KEYWORDS:** AISI 409. SHTPN. Wear. Nitrogen martensite.

## INTRODUÇÃO

Pode-se classificar os aços inoxidáveis tanto pela sua composição química quanto pela sua microestrutura à temperatura ambiente. Quanto à microestrutura podem ser ferríticos, austeníticos, martensíticos, endurecíveis por precipitação e duplex. Enquanto os aços inoxidáveis ferríticos possuem uma boa resistência à corrosão, seu uso é limitado pela característica baixa resistência mecânica que apresentam – em função do baixo teor de carbono (GENTIL, 1982).

O material usado nesse trabalho, aço inoxidável AISI 409 é classificado como ferrítico. Devido ao seu baixo teor de carbono não é passível de têmpera. Possui uma excelente resistência à corrosão atmosférica e corrosão por gases de combustão de motores, sendo por isso muito aplicado na fabricação de escapamentos na indústria automotiva (CHIAVERINI, 1984).

A resistência ao desgaste é uma característica muito importante quando se trata da aplicação comercial dos aços inoxidáveis. Seja na indústria alimentícia, componentes automobilísticos ou em ambiente de mineração. Aumentar a resistência ao desgaste significa prolongar a vida útil dos componentes e reduzir custos de operação. Para contornar a baixa resistência mecânica, há vários tratamentos termoquímicos de modificação superficial, como nitretação, carbonetação, cementação e HTGN. O Grupo de Materiais, Tribologia e Superfícies (GrMaTS) da UTFPR desenvolveu uma alternativa, o processo SHTPN (*Solution Heat Treatment after Plasma Nitriding*) no qual o nitrogênio se mantém em solução sólida, na fase estável gama, assim impedindo a precipitação de nitretos de cromo e portanto não havendo perda da resistência à corrosão. O SHTPN consiste em uma nitretação a plasma seguida de um tratamento térmico de solubilização da camada nitretada. Para o alívio de tensões é realizado em seguida o revenimento (BORGES, 2011).

O nitrogênio em solução sólida melhora a resistência à corrosão por pite e intergranular – por agir na área anódica formando  $\text{NH}_4^+$  neutralizando a acidez no interior do pite. Além disso, retarda a precipitação de fases intermetálicas. E caso haja precipitação do cromo, ocorre na forma de nitretos, a matriz tem menos perda de cromo do que na forma de carbonetos (REIS; PANDOLFO, 2015).

Ao inserir nitrogênio na composição do aço há vantagem sobre aqueles que possuem somente o carbono na liga, uma vez que o nitrogênio tem uma maior tendência de formar solução sólida intersticial e portanto sua solubilidade no estado sólido aumenta, o que é desejável pois favorece o aumento da resistência mecânica por refino de grão (SIMMONS, 1996).

A resistência ao desgaste é consequência da elevada dureza superficial e das altas tensões residuais compressivas na camada nitretada. Enquanto a alta dureza faz o material resistir à deformação plástica, as tensões compressivas fazem fechar ou mesmo impedir a formação de micro trincas durante o desgaste (Xi *et al.*, 2007).

Nos materiais com baixa dureza, quando submetidos a situações de desgaste, prevalece o mecanismo de desgaste adesivo. Nos materiais com elevada dureza impera o desgaste abrasivo. Conforme Writzl (2018) atestou, os coeficientes de atrito nas condições de riscamento a seco são mais baixos para as superfícies com maior dureza.

Esse trabalho tem por objetivo avaliar o desgaste causado por teste de riscamento *scratch* nas condições de tratamento termoquímico SHTPN, SHTPN+têmpera, SHTPN+têmpera+revenimento a 200, 400 e 600°C.

## MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de AIS 409 utilizadas nesse trabalho foram retiradas de chapas laminadas a frio, de espessura 5mm. Foram cortadas a laser em perfis quadrados, e retificadas, tendo cada amostra a geometria final de 30x30x5mm.

Quadro 1 – Composição química do aço AISI 409

Elementos									
Elemento	C	Cr	Co	Cu	Mn	Mo	Ni	P	Ti
% ( massa)	0,001	10,8	0,041	0,20	0,20	0,053	0,32	0,033	0,215

Fonte: Berton et al. (2017).

Nesse trabalho as amostras foram submetidas ao SHTPN, que consiste no tratamento termoquímico de nitretação, seguida de solubilização do conteúdo de nitrogênio camada nitretada para o interior do material. As amostras foram nitretadas por plasma DC para introduzir o nitrogênio no material. Os parâmetros utilizados na nitretação são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 1 – Parâmetros usados na nitretação

Parâmetro	Valor
Temperatura(°C)	510 ± 10
Tensão(V)	600
Pressão(Torr)	3,0 ± 0,2
Tempo(Horas)	2
Composição da atmosfera	80% N <sub>2</sub> 20%H <sub>2</sub>
T <sub>on</sub> (μs)	95 - 125
T <sub>off</sub> (μs)	250

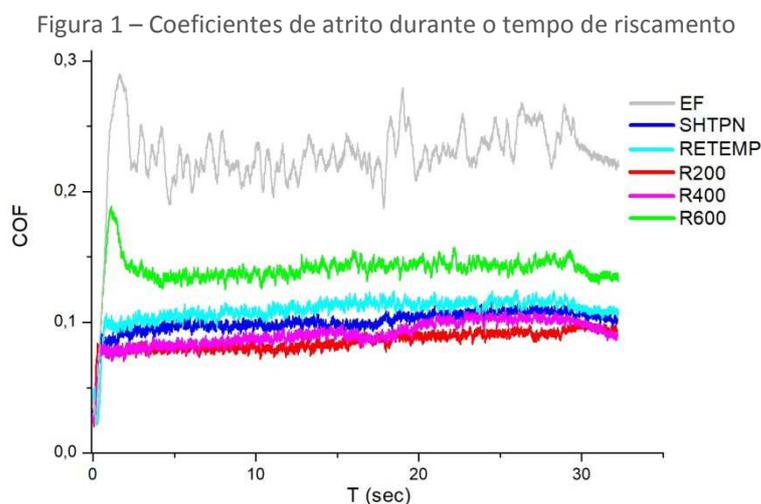
Fonte: Berton et al (2017).

Em seguida, para realizar a solubilização do nitrogênio, as amostras foram levadas ao forno a vácuo com atmosfera controlada de argônio à temperatura de 1050°C por 1 hora para propiciar a difusão atômica. O resfriamento foi feito em óleo, para aprisionar o nitrogênio nos interstícios e formar a martensita. As amostras foram novamente levadas ao forno a 1050°C por 30 minutos e resfriadas em óleo, deu-se se a segunda têmpera em óleo. Os revenimentos foram realizados a 200, 400 e 600°C.

Os coeficientes de atrito foram avaliados com teste de riscamento linear *scratch* em um tribômetro CETR usando carga variável de 15 a 20N, com um indentador de diamante tipo Rockwell C. Todas as amostras foram testadas com suas superfícies polidas com pasta de diamante de 1 μm.

## RESULTADOS

Constatou-se, conforme mostrado no gráfico a seguir, que as condições ótimas para redução do atrito e desgaste são SHTPN, Retemperado, revenido a 200°C (R200) e revenido a 400°C (R400) – virtualmente não havendo diferença entre os valores de coeficiente de atrito. A condição revenida a 600°C (R600) se mostrou muito parecida com o estado de fornecimento(EF).



Fonte: Autoria própria.

O tratamento de SHTPN permitiu formar, sobre o aço inoxidável ferrítico, uma camada martensítica de nitrogênio com espessura de 600µm e dureza superior a 550HV. A têmpera realizada em sequência favoreceu o refino da microestrutura, contribuindo para o aumento da dureza e resistência mecânica.

As amostras tratadas por SHTPN+têmpera+revenimento a 200 e 400°C não apresentaram diferença considerável em relação à profundidade do risco, devido ao fato de as durezas terem valores próximos, sendo 575 HV para a condição R200 e 606 HV para a condição R400. Essas duas condições resultaram em perfis de dureza similares às amostras SHTPN (567HV) e SHTPN+Têmpera (569HV).

Tabela 2 – Dureza de topo para as amostras

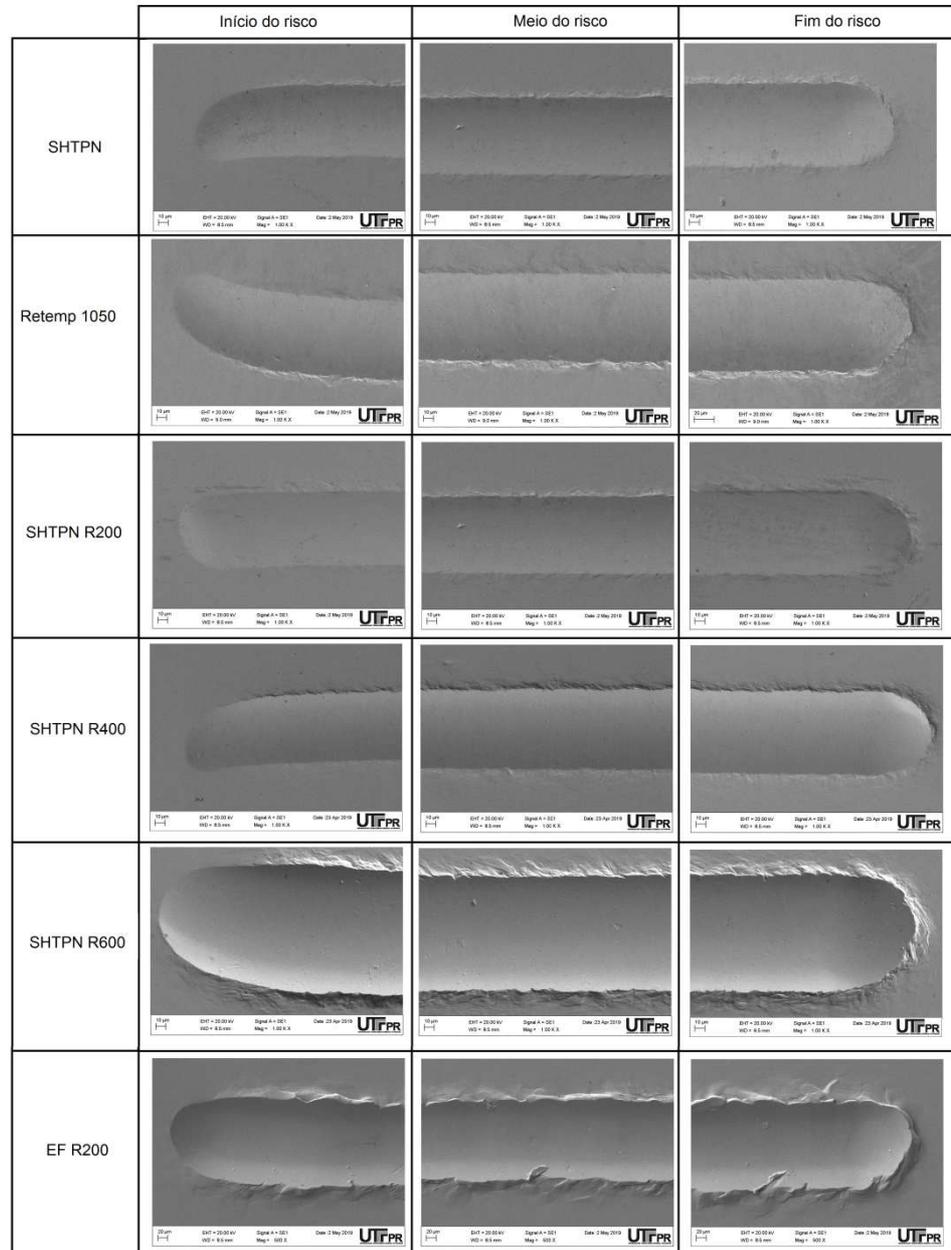
Condição	Valor (HV)
EF	165
SHTPN	567
Retemperado	569
R200	575
R400	606
R600	317

Fonte: Autoria própria.

Na condição revenido a 600°C houve uma queda considerável na dureza (317 HV), o que resultou numa condição de desgaste mais próxima ao material no estado de fornecimento. Além do valor mais alto do coeficiente de atrito, o

indentador provocou uma trilha nitidamente mais profunda e larga, apresentando no fundo do risco e nas bordas deformação plástica.

Figura 2 – Trilhas de desgaste



Fonte: Autoria própria.

## CONCLUSÕES

Observa-se que a melhor condição para desgaste foi a amostra tratada por SHTPN+têmpera+revenido200°C. Nas imagens de MEV nota-se que a pista de desgaste é mais estreita (e rasa), portando tendo menor perda de material.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos os agentes financiadores da pesquisa CAPES e CNPq.

## REFERÊNCIAS

- BERTON, E. M., *et al.* (2017). **Efeito das temperaturas de tempera e de revenido na resistência à corrosão da camada martensítica de alto nitrogênio produzida por SHTPN sobre o aço AISI 409.**
- BORGES, P. C.; ROCHA, L. A. (2011). **Solution heat treatment of plasma nitrided 15-5PH stainless steel Part I. Improvement of the corrosion resistance.** *Kovove Mater.* doi:10.4149/km.
- CHIAVERINI, V. (1984) **Aços e ferros fundidos, 5ª ed.** Ass. Brasileira de Metais.
- GENTIL, V. (1982). **Corrosão** (2 ed.). Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.
- REIS, R. F., PANDOLFO, V. (2015). **Obtenção de austenita expandida (fase S): Nitretação por plasma em baixa temperatura x SHTPN – Parte 1.**
- SIMMONS, J. W. (1996). **Overview: high-nitrogen alloying of stainless steel.** *Materials Science and Engineering*, 207, 159–169.
- WRITZL, V. (2018). **O efeito dos tratamentos de nitretação por plasma e têmpera superficial a laser nas propriedades superficiais de ferros fundidos vermiculares.**
- Xi *et al.* (2008). **Improvement of corrosion and wear resistances of AISI 420 martensitic stainless steel using plasma nitriding at low temperature.** *Surface & Coatings Technology* 2577–2583