

Análise do comportamento do par tribológico aço fundido alto C e alto Si contra o metal duro sem e com revestimento de TiN

Natália F. Santos Pereira¹, Vinícius Melo Cangussu¹, Poliana Santos Souza¹, Bárbara C. Mendanha Reis^{1,2}, Anderson Júnior dos Santos^{1,3}, Denilson José do Carmo^{4,5}, Juan Carlos Campos Rubio¹

¹ Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Presidente Antônio Carlos 6627, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901, Brasil.

² Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Universitário do Morro do Cruzeiro, Ouro Preto MG, CEP: 35400-000, Brasil.

³ Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais Campus Muriáe, Muriáe MG, CEP 36884-036, Brasil.

⁴ Centro Tecnológico de Fundação Marcelino Corradi-SENAI-CETEF-Itaúna MG, CEP 35680-270, Brasil.

⁵ Universidade de Itaúna, Itaúna MG, CEP 35680-142, Brasil

.e-mail: natsantos23@gmail.com

DOI: [10.30609/JETI-2020-11787](https://doi.org/10.30609/JETI-2020-11787)

Abstract. Cast steels with high levels of carbon (C) and silicon (Si) with bainitic structure have aroused interest in studies and applications of the metal-mechanical industry, such as mining, railway, mechanical components, etc. for combining high strength and high ductility. These characteristics are due to the formation of multiple phases in its structure, which are activated after austempering heat treatment. In the manufacturing process of these materials, machining steps are implemented with the material still in the annealed state, in order to facilitate its machinability, since lower hardness values are obtained before austempering heat treatment. Cast steel in the annealed state, have been studied to assess machinability and tribological behavior, which help for a more efficient selection of materials for cutting tools and increase the service life of equipment. Thus, this work evaluated the wear behavior of the carbide with and without a titanium nitride (TiN) coating sliding against the molten steel in the annealed state (270 ± 3 HV). The pin-on-disk (PSD) results indicated that the conjugate with the coating presented lowest friction coefficient (μ) values. However, higher values (k) of specific wear coefficient were found for the conjugate with replica coating. This fact was attributed to a possible removal of the TiN coating. The work contributed to the understanding of the tribological behavior and the identification of the wear mechanisms as adhesion and abrasion that caused damage to the surface of the evaluated materials.

Keywords: Cast steel, Austempering, Pin on disk test, Carbide, TiN coating

Resumo. Aços fundidos com altos teores de carbono (C) e silício (Si) com estrutura bainítica têm despertado o interesse em estudos e aplicações na indústria metal-mecânica, como mineração, ferroviária, componentes mecânicos, etc, por combinar elevada resistência e alta ductilidade. Essas características são devido à formação de múltiplas fases na sua estrutura, que são ativadas após tratamento térmico de austêmpera. No processo de manufatura desses materiais, etapas de usinagem são implementadas com o material ainda no estado recozido, de modo a facilitar a sua usinabilidade, visto que menores valores de dureza são obtidos antes do tratamento térmico de austêmpera. Aço fundido no estado recozido, têm sido estudados para avaliação da usinabilidade e comportamento tribológico, que auxiliam na seleção mais eficiente de materiais para ferramentas de corte e aumentar a vida de útil de equipamentos. Sendo assim, este trabalho avaliou o comportamento ao desgaste do metal duro com e sem revestimento de nitreto de titânio (TiN) deslizando contra o aço fundido no estado recozido (270 ± 3 HV). Os resultados de pino sobre disco (PSD) indicaram que o conjugado com revestimento apresentou menores valores de coeficiente de atrito (μ). Entretanto, verificou-se maiores valores de coeficiente de desgaste específico (k) para o conjugado com revestimento réplica. Esse fato foi atribuído a um possível deslocamento do revestimento TiN. O trabalho contribuiu para o entendimento do comportamento tribológico e a identificação dos mecanismos de desgaste como adesão e abrasão que ocasionaram danos na superfície dos materiais avaliados.

Palavras-chaves: Aço fundido, Austêmpera, Ensaio pino sobre disco, Metal duro, Revestimento TiN.

1. Introduction

O estudo tribológico é um dos campos mais crescentes na pesquisa em engenharia de superfície. Divide-se, essencialmente, em duas áreas de investigação, que estão intimamente interligadas, sendo o estudo do desgaste da superfície do material e a determinação do coeficiente de atrito entre os corpos envolvidos [1]. Diversos mecanismos de desgaste como adesão, abrasão, oxidação e deformação plástica podem ocorrer no deslizamento entre materiais [2]. Sendo de interesse os estudos envolvendo origem e redução de desgaste. O ensaio de pino sobre disco (PSD) é comumente utilizado para avaliar a resistência ao desgaste de um determinado par tribológico. O ensaio consiste no deslizamento de um pino sobre uma amostra, com movimentos circulares em velocidade constante durante um tempo. Uma carga normal, pré-determinada, é aplicada. O ensaio pode ser realizado ao ar, ou em ambiente, com controle da umidade e temperatura [3].

A microestrutura bainítica, por sua vez, em quantidades significativas, tem demonstrado influenciar nas propriedades mecânicas de novos aços multifásicos, que podem

ser produzidos ajustando a quantidade dos elementos como C, Si, Mn, Cr, Ni e Mo e posterior realização de tratamento térmico de austêmpera. A bainita é um constituinte dos aços que é formada pela decomposição da austenita dentro de uma faixa de temperatura entre o campo da formação da martensita e da formação da ferrita e perlita. Esse constituinte consiste de um agregado de ferrita acicular e carbonetos [4]. Estudos realizados por Bhadeshia (2001) indicaram que a adição de Si visa inibir a formação de carbonetos, o que favorece o enriquecimento de carbono da austenita residual durante a formação da bainita, aumentando também a fração de austenita retida. Dessa forma, as diferentes fases de ferrita, austenita retida, bainita e martensita, interagem e combinam-se tornando um fator incisivo para a determinação da microestrutura formada e assim atingir as propriedades mecânicas desejadas [5].

Muitos trabalhos tem sido desenvolvido na produção de aços multifásicos que são conformados mecanicamente e tratados termicamente em seguida, no entanto poucos estudos consideram o aço fundido e tratado termicamente. Dessa forma, esforços têm sido realizado na tentativa de desenvolver aços com estrutura bainítica que apresente alta resistência mecânica, elevada ductilidade, alta tenacidade, maior resistência ao desgaste e menores tempos de austêmpera [6]. No estudo de Torres (2019) aços fundidos foram obtidos após tratamento de austêmpera nas temperaturas de 300°C e 220°C. Estrutura predominante bainítica foram obtidas a 300°C, resistência à tração de 2000 MPa, alongamento entre 3% a 6% e dureza de $59,4 \pm 0,3$ HRC. Com a austêmpera realizada a 220°C foi possível obter aços com estrutura multiconstituída composta por bainita, martensita e austenita retida, apresentando resistência à tração em torno de 2300 MPa, alongamento entre 0,8% a 1,5% e dureza próxima de $53,1 \pm 0,2$ HRC. Contudo as microestruturas obtidas no seu estudo não foram consideradas nanoestruturada [7].

O desenvolvimento de aço com estrutura bainítica obtida pelo processo de fundição, visa aplicações de peças com geometrias complexas e variadas dimensões. Alguns processos são limitados a fabricação de componentes de menor espessura, dessa forma o processo de fundição apresenta vantagens. Aços com estruturas bainíticas são aplicáveis nas indústrias de mineração, transportes, ferroviárias, cimenteiras, refratários e fabricantes de maquinários [7] Adicionalmente, componentes que requerem resistência ao desgaste, como pistas de mancais de rolamentos, especialmente em condições de baixa lubrificação também tem sido empregado aços com estruturas bainíticas [8].

Em relação as operações de usinagem de aços bainíticos, visto que são responsáveis pela maior parte dos custos totais de fabricação, elas devem ser analisadas e otimizadas para

utilização de sua plena capacidade [9]. A usinagem de peças com dureza entre 45 e 70 HRC está na categoria de usinagem dura, ou seja materiais de difícil usinagem. Sendo assim, promove elevadas forças de corte e aumento de temperatura, além de um desgaste da ferramenta, necessitando de uma escolha adequada de ferramenta de corte para obtenção de maior produtividade. Estudos tem sido realizado para otimizar a usinagem do aço fundido após tratamento térmico de recozimento, visando operações de desbaste por apresentar dureza inferior a 45 HRC [10].

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento do sistema tribológico constituídos de pinos de metal duro com topo esférico revestidos com TiN e sem revestimento contra o aço fundido no estado recozido durante o ensaio PSD. Todas as análises foram realizadas com o propósito de comparar o uso do revestimento sobre o comportamento ao desgaste.

2. Material and Methods

A elaboração do aço fundido foi realizada em um forno à indução de média frequência, marca Inductotherm, cujo cadinho tem capacidade para 120 kg de aço, vazados em moldes de areia aglomerada com resina furânica. Posteriormente realizou-se o tratamento térmico de recozimento à temperatura de 1100°C por 24 horas, para homogeneização e redução de tensão residual. A composição química é apresentada na Tabela 1. O material foi preparado como corpo de trabalho (disco) para realização do ensaio de PSD. As dimensões dos discos são 75 mm de diâmetro por 10 mm de altura e sua superfície foi preparada utilizando lixas d'água com granulometria entre 80 a 220 mesh. O objetivo é que as superfícies do disco apresentassem desvio aritmético médio (R_a) menor que 0,80 μ m conforme indicado pela norma ASTM G99-05 [11], sendo medida com o equipamento Taylor Robson modelo Surtronic 25. Além da rugosidade, verificou-se a planicidade dos discos por meio do relógio comparador, marca Digimess, modelo 121.304, com resolução de 0,01 mm, de modo a evitar vibração durante o ensaio que pudessem interferir nos valores do coeficiente de atrito (μ). O ensaio de macrodureza realizada no disco está em conformidade com a norma ISO 6508-1: 2005, escala Rockwell-C, durômetro Modelo 3814, fabricante Starrett. Utilizou-se um indentador cônico de diamante com ângulo de 120° e uma carga de 1471 N. Foram realizadas 15 medições e posteriormente calculados a média e o desvio padrão. A microestrutura do material do disco foi preparada com embutimento a quente, seguida de polimento e ataque com o reagente Nital 2% por 8s. As imagens da

estrutura foram realizadas no microscópio óptico, modelo CX31, marca Olympus por meio do software LCmicro.

Os pinos de topo esférico em metal duro foram confeccionados conforme a geometria indicado pela Figura 1. Para a deposição comercial do revestimento de nitreto de titânio (TiN) ou Balinit A (nome comercial do revestimento), os pinos foram enviados para a empresa Oerlikon Balzers, que utilizou o processo PVD (*Physical Vapour Deposition*). Tanto os pinos quanto os discos foram limpos em uma solução com acetona no ultrassom Branson modelo 1800 por 10 minutos e secados em ar quente, antes e depois de cada ensaio PSD.

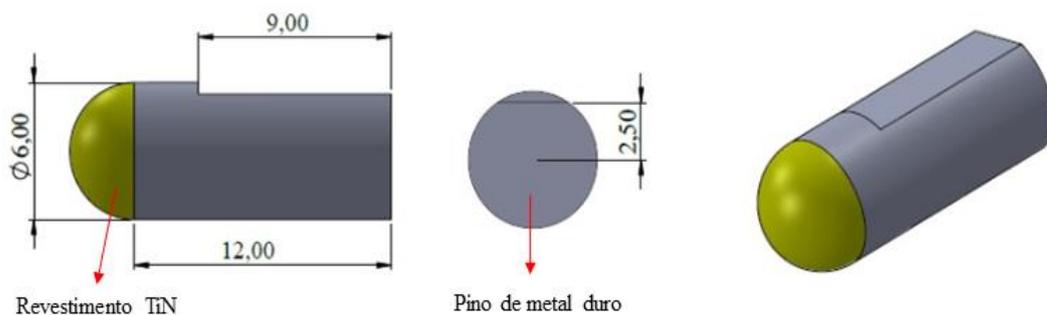


Figura 1 – Desenho 3D do pino de metal duro de topo esférico revestido com TiN (em mm)
Fonte: os autores (2020)

Para a análise tribológica dos conjugados (aço vs. metal duro/TiN e aço vs. metal duro sem revestimento) utilizou-se um tribômetro da Microtest, modelo SMT-A/0100 – n° série B01100-19. A Figura 2 detalha a dinâmica do ensaio PSD. Os dados de μ são coletados por meio do programa Nanovea Tribometer Software. Os parâmetros escolhidos no ensaio foram carga normal constante de 20 N; velocidade de deslizamento de 90 m/min; diâmetro das pistas de 60 mm; distância percorrida de 10.000 m (57.600 ciclos); sem lubrificação; temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ e uma réplica. Os parâmetros escolhidos foram baseados nos estudos de (VIÁFARA et al., 2005). Antes do ensaio no tribômetro, os pinos foram submetidos ao ensaio de perfilometria para verificar a rugosidade média (R_a) inicial. Utilizou-se o perfilômetro por contato Hommelwerk modelo-T8000.

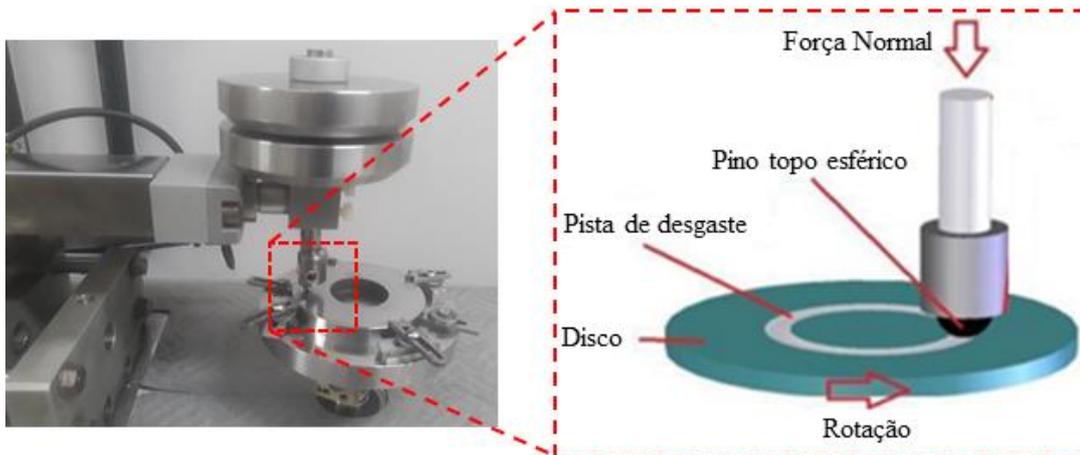


Figura 2 – Tribômetro utilizado para o ensaio PSD
 Fonte: adaptado de ANAZAWA et al. (2006)

Após o ensaio PSD, tanto os pinos quanto as trilhas de desgaste formadas sobre os discos, foram submetidas a análise por perfilometria varrendo a região da superfície desgastada. O volume de material removido no disco foi calculado pela área desgastada, sendo esse dado coletado pela seção transversal da trilha obtida pelo ensaio de perfilometria em três regiões distintas na mesma trilha para a obtenção da média. Posteriormente, o volume desgastado (em mm³) é calculado por meio de relações geométricas.

O coeficiente de desgaste (k) também referido como taxa de desgaste específica, representa o volume (V) de material removido no desgaste em mm³, em função da distância percorrida (S) em m e a carga (F) aplicada em N. Por meio da análise do valor do coeficiente k , torna-se possível a comparação entre as taxas de desgaste em diferentes classes de materiais [1]. A equação 2.1 sintetiza o cálculo do coeficiente de desgaste específico (k) (mm³/Nm) realizado para os discos. O k do pino foi negligenciada devido a baixo valores.

$$k = \frac{V}{F \cdot S} \quad \text{Equação 2.1}$$

A equação 2.1 foi desenvolvida como ponto de partida da equação de Archard conforme descrito por (Archard e Hirst, 1956) e detalhado nos estudos de (FENG et al., 2017).

3. Results and discussion

O aço fundido no estado recozido apresentou dureza de 270 HV ± 3. A Tabela 1 detalha a composição química correspondente a esse aço. A matriz metálica é caracterizada por uma microestrutura totalmente perlítica, ou seja, lamelas alternadas de ferrita e cementita, como apresentada pela Figura 3.

Tabela 1. Composição química do aço fundido (%)

Fe	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S	Al	Cu
94,75	0,75	1,83	0,81	0,99	0,20	0,52	0,03	0,01	0,01	0,016



Figura 3 - Estrutura metalográfica do aço fundido com ataque de 2% de Nital
Fonte: os autores (2020)

Os discos apresentaram valores de R_a entre 0,24 a 0,30 μm atendendo ao valor de rugosidade especificado pela norma. Quanto a planicidade, os resultados apresentaram valores menores que 0,1 mm. As Figuras 4 e 5 apresentam as imagens dos pinos novos antes do ensaio pino sobre disco com revestimento e sem revestimento. Os valores de R_a para os pinos revestido de TiN teste e réplica foram de $0,21 \pm 0,02$ e $0,25 \pm 0,02$ respectivamente. Para os pinos sem revestimento o R_a foram de $0,43 \pm 0,04$ para o teste e $0,36 \pm 0,03$ para a réplica. Os valores estão coerentes, pois se esperava maiores valores para os pinos sem revestimento, devido a presença de defeitos microscópicos na superfície do substrato, que eventualmente são encobertos pelo revestimento. A alta rugosidade dos pinos pode contribuir para alterar o μ . As imagens das Figuras 4 (a) e (b) demonstram que os pinos revestidos e sem revestimento não apresentaram ondulações ou outros defeitos superficiais que poderiam interferir no ensaio PSD, resultado similar foi verificado para a réplica.

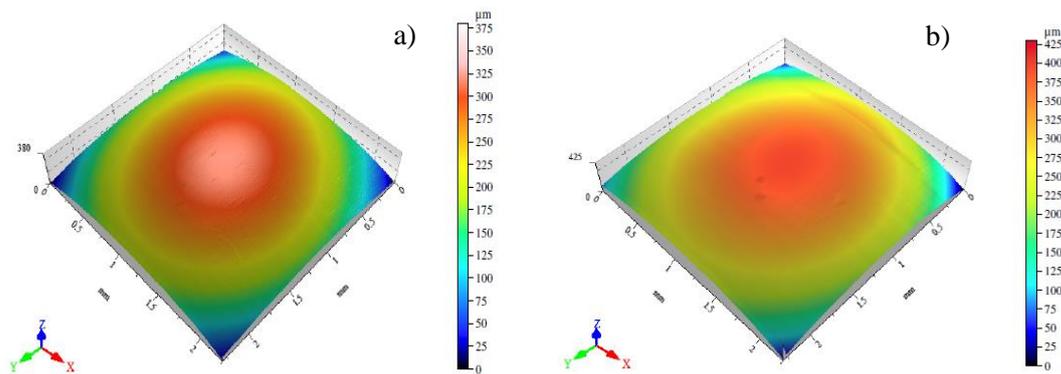


Figura 4 – Superfície dos pinos antes do ensaio no tribômetro: a) revestido com TiN- teste; b) sem revestimento-teste

Fonte: os autores (2020)

As curvas do μ estão representadas pela Figura 5 até a distância de deslizamento de 10.000 m e os valores médios de μ foram coletados quando as curvas apresentaram o estágio estacionário para os conjugados avaliados. As curvas de μ tanto para os conjugados revestidos e sem revestimento se mantiveram estáveis ao longo da distância percorrida. De acordo com Blau (2009) a curva de comportamento do atrito é dividida entre o período de amaciamento (*running-in*) e estágio estacionário, sendo que no período de *running-in* as superfícies em contato ainda estão se acomodando e não é verificada ainda a presença de um regime permanente de desgaste. Quando as superfícies atingem a conformidade geométrica, alcançam e mantêm um nível de μ médio relativamente constante. O regime permanente não apresenta um padrão e depende de cada par tribológico. Sendo assim, para o pino revestido de TiN teste e réplica, os valores médios de μ foram de $0,45 \pm 0,01$ e $0,44 \pm 0,02$ respectivamente. Foi considerado o estágio estacionário a partir da distância de 1.500 m. Para os pinos sem revestimento, foi considerado o estágio estacionário a partir da distância de 2.000 m. Os valores médios de μ para os pinos sem revestimento teste e réplica foram de $0,53 \pm 0,02$ e $0,50 \pm 0,02$ respectivamente.

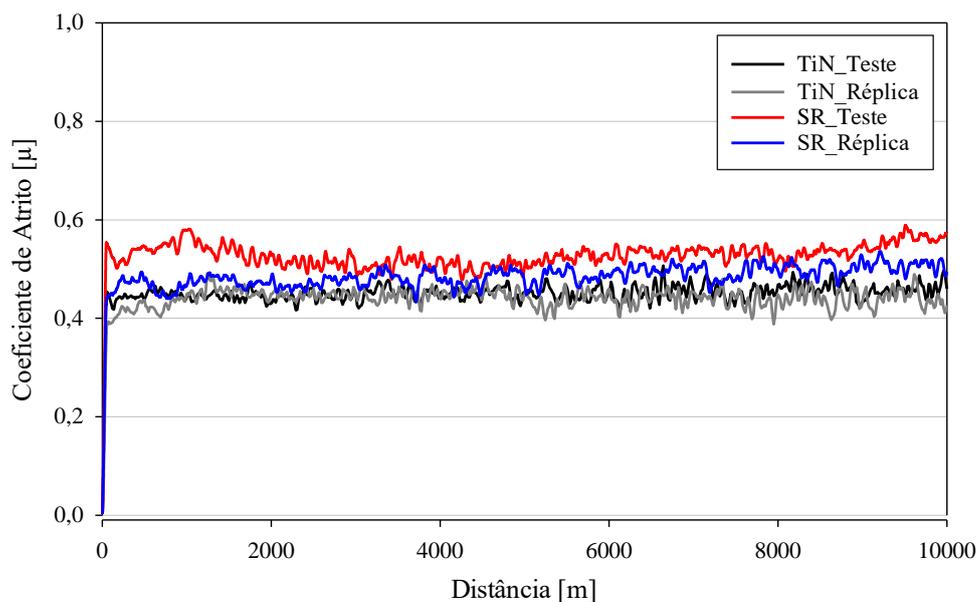


Figura 5 – Valores de μ para os pinos revestidos com TiN e pinos SR (sem revestimento) - teste e réplica
 Fonte: os autores (2020)

O que se observa para os conjugados avaliados é que o pino revestido apresentou menores valores de μ , que pode ser atribuído as propriedades de resistência ao atrito do TiN, como afirmado por Holmberg e Matthews (2009) que a alta dureza do revestimento de TiN (2000 HV - 2500 HV) apresenta uma boa resistência ao desgaste abrasivo e boa estabilidade química resultando em uma alta resistência ao desgaste. A Tabela 2 apresenta o volume desgastado (mm^3), a distância percorrida em m e a carga normal em (N), do qual foram utilizados para o cálculo do coeficiente de desgaste específico (k) do disco e a Figura 6 sintetiza os valores de μ e k para os conjugados estudados.

Tabela 2. Coeficiente de desgaste específico (k) do disco

Conjugado Disco x Pino	Ensaio	Volume desgastado – (V) [mm^3]	Distância percorrida – (S) [m]	Carga Normal [N]	k (Coeficiente de desgaste específico do disco [$10^{-2} \text{mm}^3/\text{Nm}$])
Pino revestido com TiN	Teste	3215,55	10852	20	$1,48 \pm 0,11$
	Réplica	5162,90	10801	20	$2,38 \pm 0,13$
Pino sem revestimento	Teste	3277,31	10852	20	$1,50 \pm 0,14$
	Réplica	3974,12	10801	20	$1,84 \pm 0,05$

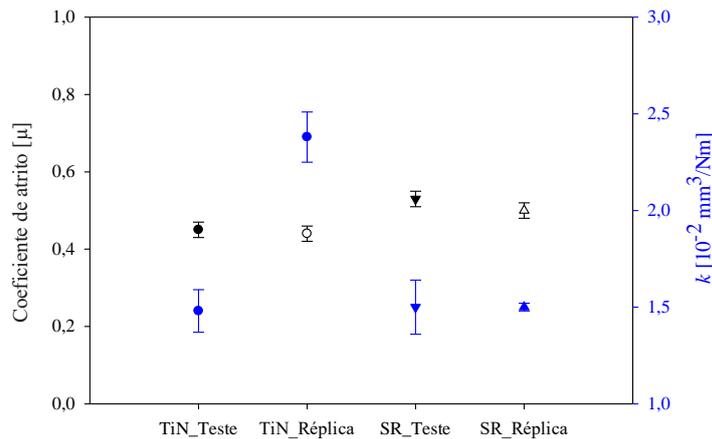


Figura 6 – Comparação dos valores de μ e k para os conjugados estudados
 Fonte: os autores (2020)

A análise dos resultados do k indicaram que o maior desgaste ocorreu no contato entre o disco e pino revestido no ensaio referente a réplica. Como os menores valores de coeficiente de desgaste foram encontrados no contato com o revestimento, também era esperado que o desgaste fosse amenizado neste conjugado. Espera-se que as análises do desgaste dos pinos e trilhas possam ajudar a explicar a causa do aumento do desgaste.

As Figuras 7 (a) e 7 (b), detalham as superfícies desgastadas dos pinos revestidos de TiN. Observou-se para os pinos revestidos, teste e réplica, uma aderência de material, que foi transferida pelo disco, conforme demonstrado pela perfilometria da região desgastada. Este, sugere um desgaste por adesão para esses conjugados. Uma região de maior desgaste foi observada para a réplica, conforme medições realizadas com auxílio do software *AxionVision* e estão indicadas na Figura 7 (b).

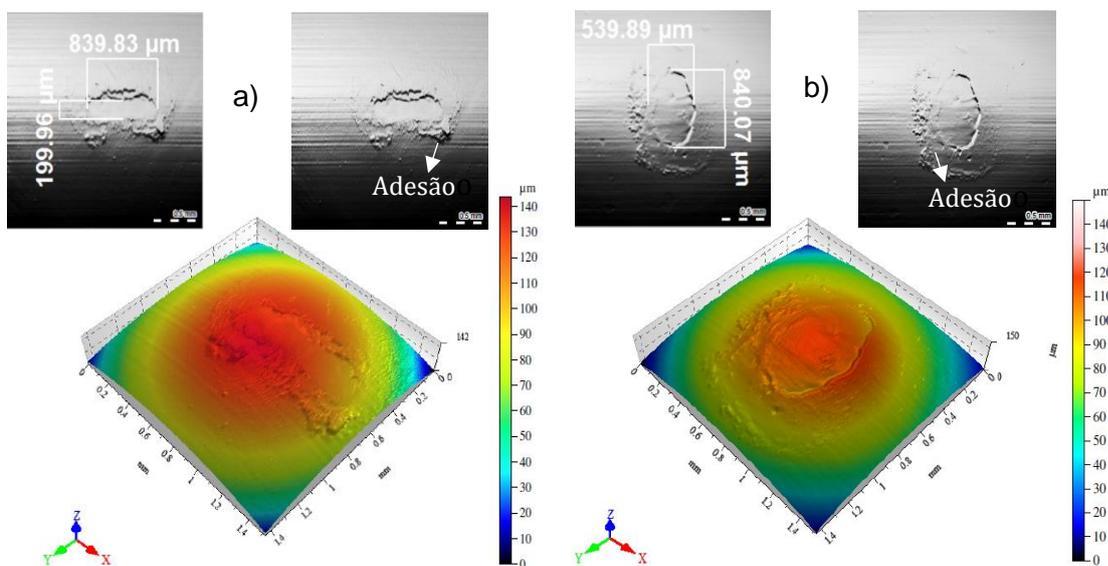


Figura 7 – Região de desgaste dos pinos revestidos com TiN após ensaio tribológico: a) teste; b) réplica
 Fonte: os autores (2020)

Mecanismo de adesão juntamente com componentes abrasivas poderiam ter intensificado o desgaste do pino revestido réplica levando a um possível deslocamento do filme, e conseqüentemente a exposição do substrato de metal duro, acelerando o desgaste. A análise do perfil 2D do pino na região do desgaste, revela a presença de um vale o que sugere esse deslocamento, contribuindo para o aumento do k , conforme indicado pela Figura 8. De acordo com Clint (2001) a adesão de superfícies sólidas é desejável na interface entre revestimentos e substratos e assim reduzir possíveis deslocamentos do revestimento. Porém, espera-se uma adesão mínima do revestimento em contato com o disco no deslizamento, de modo a reduzir o desgaste por adesão da superfície, como reportado por (SOUZA et al, 2020).

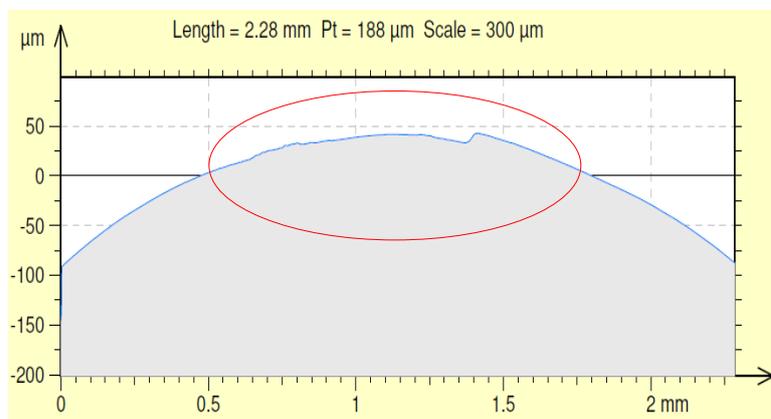


Figura 8 – Perfil 2D do pino revestido réplica após ensaio tribológico
Fonte: os autores (2020)

Nas Figuras 9 (a) e 9 (b) detalham as superfícies desgastadas dos pinos sem revestimento. O que se observa para os dois pinos, uma superfície com ranhuras indicando a existência de componente abrasiva atuando, o que justificaria os maiores valores do μ verificado para esses conjugados. Uma comparação direta entre os pinos com revestimento e sem revestimento indica que o uso do revestimento reduziu o desgaste sobre a superfície dos pinos após os testes de deslizamento.

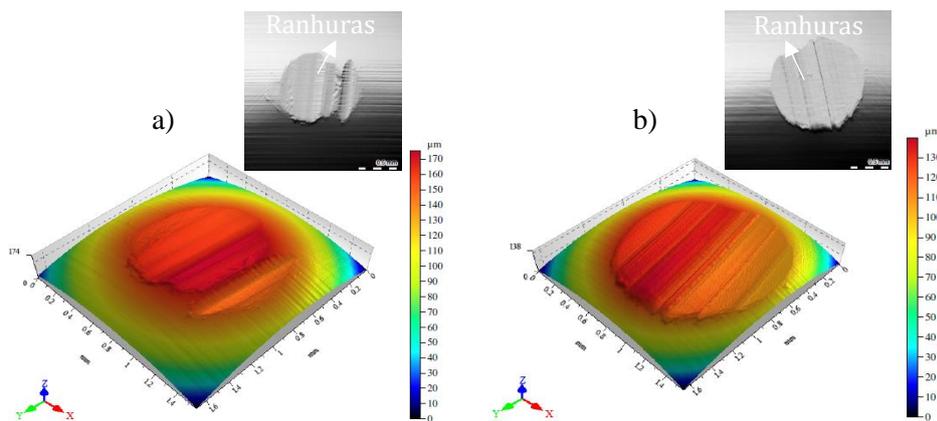


Figura 9 – Região de desgaste dos pinos sem revestimento após ensaio tribológico: a) teste; b) réplica
 Fonte: os autores (2020)

As imagens das Figuras 10 (a) e 10 (b), juntamente com as Figuras 11 (a) e 11 (b) apresentam as trilhas desgastadas após ensaio PSD. Observou-se para os pares pinos revestidos e disco, trilhas com textura mais lisa quando comparada com as trilhas dos pinos sem revestimento, que sugere uma influência do revestimento TiN. Nota-se também a formação de bordas laterais junto às trilhas de material deslocado plasticamente, o que poderia justificar a participação de mecanismos de desgaste abrasivo. Os valores de profundidade foram extraídos do perfil 2D, como indicado nas Figuras 10 (c) e 10 (d). Para as trilhas dos pinos revestidos réplica observou-se maiores profundidades ($39 \mu\text{m} \pm 3,0$) quando comparado com a trilha teste ($28 \mu\text{m} \pm 3,0$), o que corrobora com os valores encontrados de k .

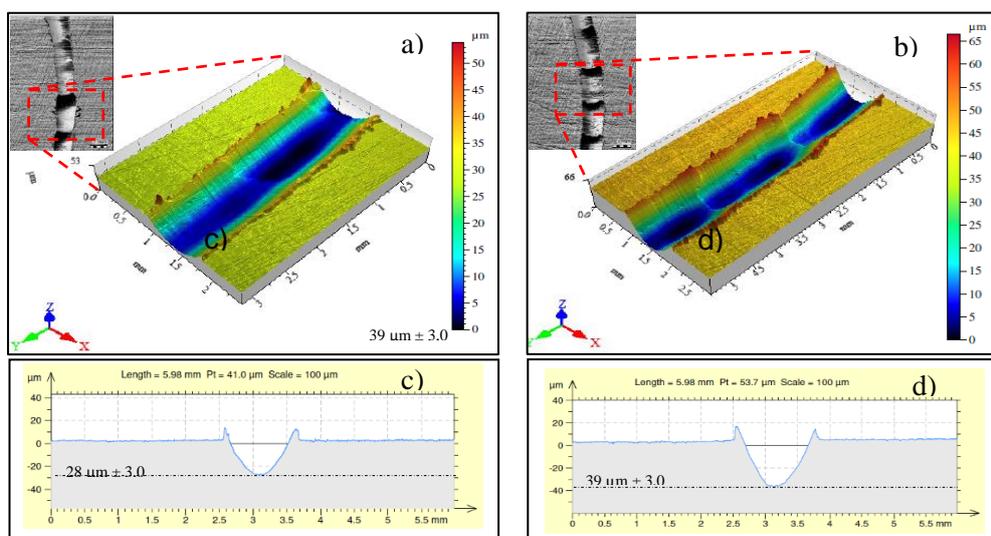


Figura 10 – Região de desgaste das trilhas com pinos revestidos de TiN: a) teste; b) réplica; c) perfil 2D do teste; d) perfil 2D da réplica
 Fonte: os autores (2020)

Os perfis das trilhas correspondente aos pinos sem revestimento, apresentam superfícies irregulares, juntamente com a formação de bordas laterais o que sugere a participação de desgaste abrasivo, fato esse verificado pelas maiores profundidades verificados no perfil 2D para esses conjugados, como destacado nas Figuras 11 (c) e 11 (d). Realizando uma análise das trilhas da superfície dos pinos sem revestimento e dos valores de μ , sugere se um desgaste abrasivo severo para esse conjugado corroborando as afirmações de PODGORNİK e JERINA (2012) em relação ao μ , pois quando atinge valores maiores de $0,5 \mu\text{m}$ seria um indicativo de um processo severo ocorrendo na interação das superfícies.

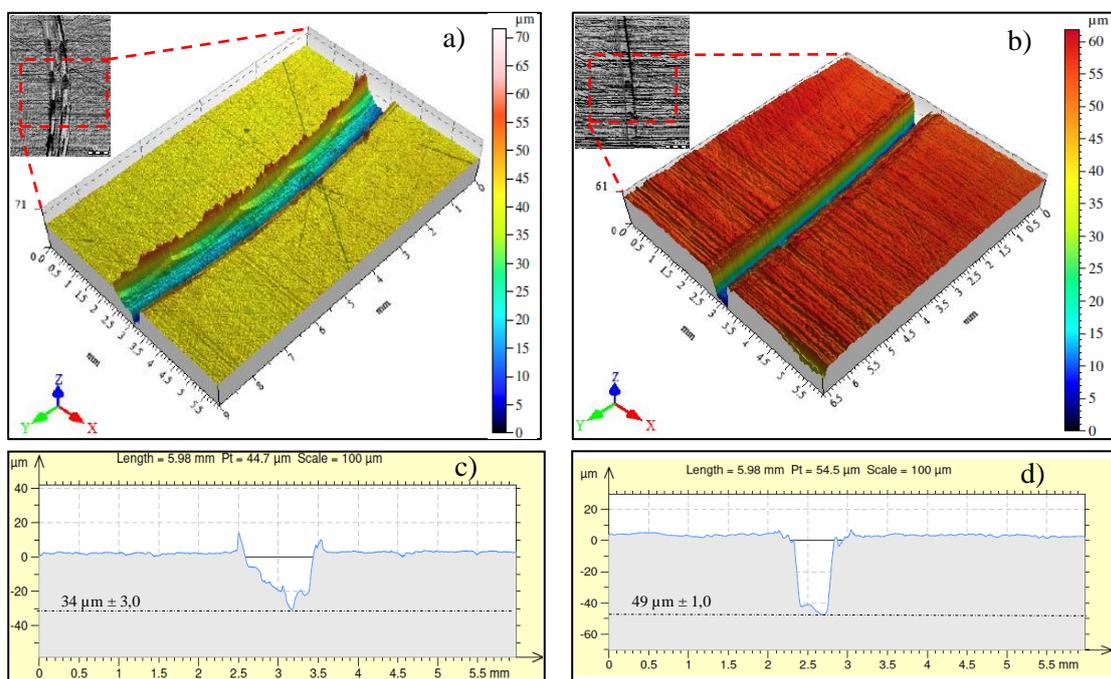


Figura 11 – Região de desgaste das trilhas com pinos sem revestimentos: a) teste; b) réplica; c) perfil 2D do teste; d) perfil 2D da réplica
Fonte: os autores (2020)

4. Conclusion

A avaliação do comportamento tribológico do pino revestido com TiN e sem revestimento deslizando contra o aço fundido foi realizada, considerando o coeficiente de atrito, coeficiente de desgaste específico e a perfilometria da superfície desgastada dos pinos e das trilhas. Os menores valores de coeficiente de atrito foram verificados para os pares revestidos, influenciado pelas características do revestimento TiN. Entretanto, ao analisar o coeficiente de desgaste específico para o conjugado pino revestido réplica, a participação de mecanismos de adesão e abrasão poderiam ter intensificado o desgaste que levou a um possível deslocamento do filme e exposição do substrato. Já para os conjugados disco e

pino sem revestimento, observou-se maiores valores de coeficiente de atrito e coeficiente de desgaste específico, além de maior profundidade das trilhas, que sugere a participação de mecanismos de abrasão. A avaliação dos debris, seria o indicativo da presença ou não de óxidos influenciados pela composição química do disco, sendo essa análise verificada em futuros trabalhos. Nesse trabalho verificou-se os benefícios do revestimento e a análise tribológica permitiu verificar um comportamento severo para os pares estudados.

5. Acknowledgment

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e ao Senai/Cetef de Itaúna-MG. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES – Código de Financiamento 001.

6. Bibliography

- [1] HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 2 ed. Elsevier, 2017.
- [2] HOLMBERG, K.; MATTHEWS, A. **Coatings Tribology: properties, techniques and applications in surface engineering**. 2. ed. Great Britain: Elsevier, 2009.
- [3] HOLMBERG, K. Realiability aspects on tribology. **Tribology International**, v. 34, p. 801-808, 2001
- [4] BHADSHIA, H. K. D. H. **Bainite in Steels – Transformations, Microstructure and Properties**. 2 ed. Cambridge: Iom Communicataions, 2001.
- [5] ANAZAWA, R.M.; ABDALLA, A.J.; HASHIMOTO, T.M.; PEREIRA, M.S. Efeito dos tratamentos intercrítico e isotérmico sobre as propriedades mecânicas e a microestrutura no aço 300M. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, São José dos Campos, v.25, n.2, p.93-97, 2006.
- [6] DO CARMO, D; GODOY, G.C.; J., DO CARMO; D. Avaliação dos ciclos térmicos na obtenção de aços fundidos de elevada resistência mecânica e boa ductilidade. **22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECimat**, n. 2, p. 2–5, 2016.
- [7] TORRES, W.C. Desenvolvimento e caracterização de aço fundido visando obtenção de microestrutura bainítica com refino microestrutural. **Dissertação (mestrado)**, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais-CEFET-MG, Belo Horizonte, 2019
- [8] VIÁFARA, C. C.; CASTRO, M. I.; VÉLEZ, J.M.; TORO, A. Unlubricated sliding wear of pearlitic and bainitic steels. **Wear**, v. 259, n. 1–6, p. 405–411, 2005
- [9] BIERMANN, D.; HARTMANN, H. A.; TERWEY, I.; MERKEL, C.; KEHL, D. Turning of high-strength bainitic and quenched and tempered steels. **Procedia CIRP**, v. 7, p. 276–281, 2013.
- [10] DAS, A.; MUKHOPADHYAY, A.; PATEL, S.K.; BISWAL, B. B. Comparative Assessment on Machinability Aspects of AISI 4340 Alloy Steel Using Uncoated Carbide

and Coated Cermet Inserts During Hard Turning. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 41, n. 11, p. 4531–4552, 2016.

[11] ASTM G99-05. **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**. ASTM International, 2010.

[12] ARCHARD, J.F.; HIRST, W. The wear of metals under unlubricated conditions. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 236, n. 1206, p. 397-410, 1956.

[13] FENG, X.; ZHANG, Y.; HU, H.; ZHENG, Y.; ZHANG, K.; ZHOU, H. Comparison of mechanical behavior of TiN, TiNC, CrN/TiNC, TiN/TiNC films on 9Cr18 steel by PVD. **Applied surface science**, v. 422, p. 266-272, 2017.

[14] BLAU, P. J. **Friction Science and Technology: From concepts to applications**. 2 ed. New York: CRC Press, 2009.

[15] CLINT, J.H. Adhesion and components of solid surface energies. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 6, p.28-33, 2001.

[16] SOUZA, P. S.; SANTOS, A. J.; COTRIM, M. A. P.; ABRÃO, A. M.; CÂMARA, M. A. Analysis of the surface energy interactions in the tribological behavior of AlCrN and TiAlN coatings. **Tribology International**, v.146, n.106206, 2020.

[17] PODGORNIK, B.; JERINA, J. Surface topography effect on galling resistance of coated and uncoated tool steel. **Surface & Coatings Technology**, v. 206, p. 2792–2800, 2012.