

INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DA TEMPERATURA E PRESSÃO DE CONTATO NO COEFICIENTE DE ATRITO EM CHAPAS DE AÇO PHS2000 SEM REVESTIMENTO

Bruno Caetano dos Santos Silva

SENAI CIMATEC - Instituto SENAI de Inovação (ISI) em Conformação e União de Materiais (SENAI CIMATEC ISI C&UM), Salvador, Brasil.

Universidade de São Paulo - Escola Politécnica, São Paulo, Brasil.

bruno.silva@fieb.org.br

Luã Fonseca Seixas

Programa de Pós-graduação GETEC, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, Brasil.

lua.seixas@fbter.org.br

Luis Fernando Folle

SENAI CIMATEC - Instituto SENAI de Inovação (ISI) em Conformação e União de Materiais (SENAI CIMATEC ISI C&UM), Salvador, Brasil.

luis.folle@fbter.org.br

Alexandre Ferraz Dourado

SENAI CIMATEC - Instituto SENAI de Inovação (ISI) em Conformação e União de Materiais (SENAI CIMATEC ISI C&UM), Salvador, Brasil.

alexandre.dourado@fieb.org.br

Tiago Nunes Lima

SENAI CIMATEC - Instituto SENAI de Inovação (ISI) em Conformação e União de Materiais (SENAI CIMATEC ISI C&UM), Salvador, Brasil.

tiago.nunes@fieb.org.br

Rodrigo Santiago Coelho

Programa de Pós-graduação GETEC, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, Brasil.

SENAI CIMATEC - Instituto SENAI de Inovação (ISI) em Conformação e União de Materiais (SENAI CIMATEC ISI C&UM), Salvador, Brasil.

rodrigo.coelho@fieb.org.br

Gilmar Ferreira Batalha

Universidade de São Paulo - Escola Politécnica, São Paulo, Brasil.

gfbatalh@usp.br

Resumo: Os aços manganês-boro são amplamente utilizados na estampagem a quente, resultando em 1500 (PHS 1500) ou mesmo 2000 MPa (PHS 2000) de resistência à tração após o processo de estampagem. Esses aços são mais comumente utilizados na indústria na forma de chapas com revestimento de AlSi. No entanto, desenvolvimentos recentes estão sendo feitos para viabilizar a aplicação de aços não revestidos, resultando na redução de custos, mas trazendo desafios tecnológicos a serem superados. O coeficiente de atrito (μ) é um parâmetro fundamental na conformação de chapas metálicas e é influenciado por diversos fatores, tais como: rugosidade da superfície, temperatura de trabalho, lubrificação, pressão de contato e velocidade de deslizamento. Na estampagem a quente, sabe-se que a temperatura pode ter grande influência nos valores de μ para chapas revestidas, porém, há poucas informações sobre os aços não revestidos. O presente trabalho tem como objetivo investigar o comportamento tribológico de chapas de aço PHS 2000 não revestidas por meio do teste pino-sobre-disco. Os ensaios foram realizados em três condições de temperatura (800 °C, 600 °C e 400 °C) variando a pressão de contato em 5 e 10 MPa. Os resultados evidenciaram que o aço PHS 2000 sem revestimento apresenta uma tendência de redução do coeficiente de atrito com o aumento da temperatura, à pressão de 5 MPa, fator associado a formação de camadas de óxidos na superfície do aço. Contudo, à pressão de 10 MPa, essa redução não foi observada.

Palavras-chave: Coeficiente de atrito; PHS 2000; Pino-sobre-disco; Estampagem a quente; sem revestimento.

1. INTRODUÇÃO

No processo de estampagem a quente, a chapa metálica é aquecida em um forno com temperaturas entre 800 °C e 900 °C, por pelo menos 5 minutos, e então é transferida para a prensa para ser submetida ao processo de conformação e têmpera simultâneas (CTS) em uma matriz refrigerada (Altan, 2007; Karbasian & Tekkaya, 2010). Os aços mais utilizados neste tipo de processo são categorizados como PHS (*Press Hardening Steel*), sendo uma categoria dos chamados aços avançados de alta resistência ou aços AHSS (*Advanced High-Strength Steels*) (Gracia-Escosa et al. 2017). Estes materiais comumente apresentam um revestimento metálico, geralmente uma camada de Al-Si, que visa proteger o aço da oxidação e da formação de carepas (Altan, 2007; Karbasian & Tekkaya, 2010). A aplicação majoritária destes aços ocorre no setor automotivo, aplicado em processos de estampagem a quente para fabricação de componentes estruturais da carroceria de diversos modelos de veículos, compondo cerca de 38% dos componentes de carroceria dos carros modernos (Belanger, 2016; Taylor & Clough, 2018). Os aços PHS 2000 são suscetíveis ao endurecimento por solução sólida de elementos de liga como o manganês (Mn) e o boro (B) e pela transformação martensítica. Em termos de nomenclatura, o número 2000 se refere ao limite máximo aproximado da resistência mecânica (tensão última) que esse aço pode alcançar (Rana & Singh, 2017; Billur, 2019).

De acordo com Gracia-Escosa et al. (2017), durante a estampagem a quente, tanto a matriz quanto a chapa que está sendo conformada são submetidas a condições severas de atrito, o que pode se intensificar a depender da complexidade da geometria da peça. Além disso, durante a etapa de têmpera, ocorre alguma retração térmica que promove o deslizamento relativo, sob altas cargas, entre a ferramenta e o aço. Essa combinação de temperatura e fatores mecânicos pode contribuir para o desgaste excessivo do ferramental e impactar em altos custos de manutenção. Assim, entender e mapear o comportamento tribológico do aço PHS 2000 sem revestimento é fundamental para melhorar a aplicabilidade deste material no processo de estampagem a quente, bem como melhorar a vida útil da ferramenta.

De acordo com Trzepieciniski & Lemu (2020), o ensaio de atrito por pino-sobre-disco é uma técnica de caracterização tribológica comumente utilizada para estimar o coeficiente de atrito e mecanismos de desgaste, além de ser um importante método para avaliar o comportamento de pares tribológicos. Esse ensaio consiste em colocar um corpo de prova em forma de anel ou disco em contato com um pino realizando um movimento rotativo ao longo do eixo do corpo de prova como mostrado na Fig. 1. No teste, a força tangencial e a força normal são medidas. Podem ser utilizados pinos planos ou esféricos. A resistência ao atrito pode ser determinada para diferentes velocidades de deslizamento, condições de lubrificação e pressões de contato. Além disso alguns equipamentos permitem variar a temperatura de teste, colocando a amostra em um ambiente fechado e controlado (Trzepieciniski & Lemu, 2020).

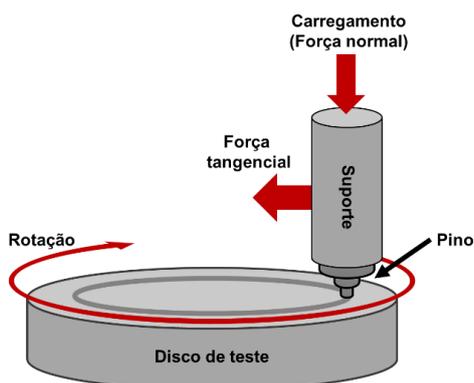


Figura 1. Representação esquemática de um ensaio de Pino-sobre-disco.

Durante os testes de pino-sobre-disco, a força de atrito e a distância de escorregamento para a primeira revolução do disco são medidas usando células de carga e um programa de computador para registrar os valores da força de atrito em função do tempo. O coeficiente de atrito “ μ ” é determinado a partir dos valores da força normal de “FN” e da força de atrito “FA”, conforme descrito na Eq. (1). A pressão aparente “Pc” no teste de pino-sobre-disco com pino plano pode ser avaliada a partir da largura da banda de fricção “ b_f ” que pode ser considerada igual ao diâmetro de uma seção de contato circular. Assim, a pressão aparente para cada amostra pode ser calculada a partir da Equação 2 (Trzepieciniski & Lemu, 2020).

$$\mu = FA / FN \quad (1)$$

$$Pc = 4FN / \pi(b_f)^2 \quad (2)$$

Existem estudos focados na investigação do comportamento tribológico de aços PHS sem revestimento, contudo a grande maioria avalia composições de aço mais comuns, como o aço PHS 1500. Ainda existe uma grande carência de avaliações deste fenômeno para o aço PHS 2000, com uma composição mais recente e mais avançada em termos de

resistência mecânica. Resultados de investigações relacionadas ao comportamento tribológico dos aços PHS, indicam, em sua maioria, que a pressão e a temperatura podem afetar significativamente o valor do coeficiente de atrito, que varia na faixa de 0,4 a até 0,8, a depender das condições de teste (Gracia-Escosa et al.,2017; Hernandez et al. 2014; Wang et al. 2015; Hardell, et al. 2008).

Desta forma, o objetivo deste estudo é avaliar o comportamento tribológico de chapas de aço PHS 2000 sob condições de elevadas temperaturas (400, 600 e 800 °C), considerando diferentes condições de carregamento mecânico aplicado à superfície do aço (5 e 10 MPa), de forma a simular condições industriais do processo de estampagem a quente.

2. Metodologia

2.1. Preparação das amostras

Para realização dos ensaios foram utilizadas chapas metálicas de 1,2 mm de espessura do aço PHS 2000 sem revestimento, cortadas em formato de disco, por equipamento de eletroerosão a fio WEDM, marca FANUC e modelo Robocut Alfa-OiE, considerando a inserção de furos para fixação durante os ensaios, conforme Fig 2a. As medições e tolerâncias foram verificadas por Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) de marca Brown&Sharpe, modelo Scirocco 09-10-07, paquímetro marca Starret, modelo 798 e micrômetro marca Mitutoyo, modelo 103-129. A limpeza e manuseio dos corpos de prova foram realizados conforme norma ASTM G115-10, de modo a remover substâncias que pudessem afetar os resultados e evitar o contato com as superfícies de análise, para evitar danos e contaminação na superfície da amostra. Foram realizados registros do material testado, condições de teste, condições de superfície e dimensões das amostras, de forma a manter a rastreabilidade dos ensaios. A superfície da chapa como recebida apresentou uma rugosidade média de 1,2 μm Ra, medida por meio de um rugosímetro digital de marca Mitutoyo e modelo SJ-210, de acordo com normas ISO 4287 e ISO 4288. Para limpeza utilizou-se acetona. Todo o procedimento de limpeza foi realizado antes do aquecimento das amostras. A Fig 2b mostra um dos discos preparados, antes dos testes.

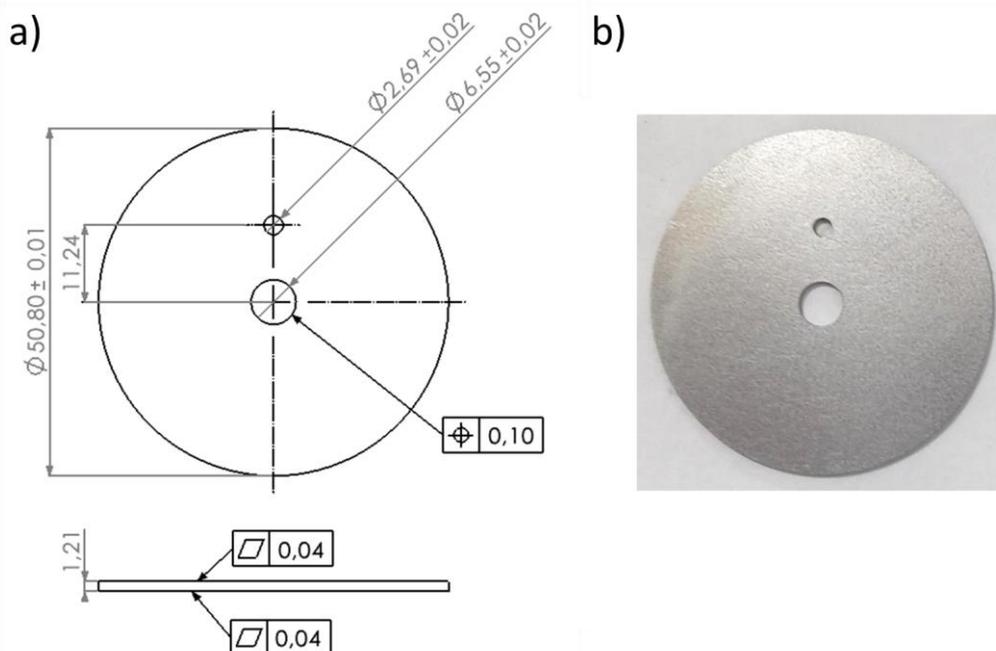


Figura 2. a) Dimensões (milímetro) dos discos de testes analisados; b) Imagem do disco antes dos testes.

2.2. Ensaios de atrito a quente

Os ensaios foram executados utilizando um tribômetro de pino-sobre-disco, de marca Brucker, modelo UMT Tribolab, apresentado na Fig. 3, seguindo as recomendações e procedimentos das normas ASTM G115-10 e ASTM G99-17. Visando aproximar os experimentos em laboratório da rota de estampagem a quente, inicialmente as amostras foram pré-aquecidas a uma temperatura de 800 °C, próxima da faixa de austenitização do material. Posteriormente foi realizado o resfriamento até a temperatura alvo, mantida durante o ensaio. O aquecimento foi realizado no equipamento de ensaio de pino-sobre-disco, equipado com forno de aquecimento acoplado, possibilitando o controle da temperatura das amostras durante todo o ensaio. A utilização do forno para teste de atrito permite que o aquecimento das amostras ocorra em um ambiente fechado e controlado, o que proporciona uma maior homogeneidade da temperatura ao longo do teste. Os parâmetros aplicados nos ensaios são apresentados na Tab. 1. As condições foram inseridas no software do equipamento

levando em conta o diâmetro do pino utilizado e o raio de giro, sendo fixada a velocidade tangencial e a distância percorrida. O equipamento aplica a carga de contato pino-disco, controla a rotação do disco e realiza a leitura das forças tangencial e normal, que são utilizadas para determinar o coeficiente de atrito.

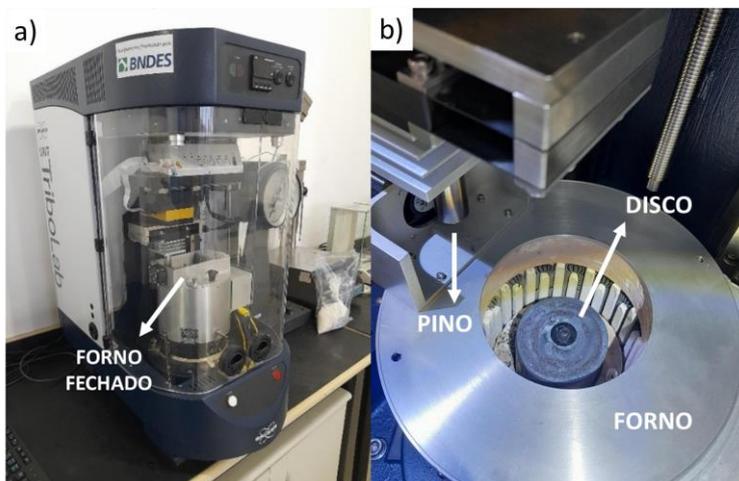


Figura 3. A) Imagem externa do equipamento de teste de pino-sobre-disco preparado para execução do teste; b) Imagem interna do equipamento de teste de pino-sobre-disco, após realização do teste.

Tabela 1. Parâmetros aplicados nos testes de pino-sobre-disco.

Condição de teste	Temperatura (°C)	Pressão de contato (MPa)	Velocidade (mm/s)	Distância percorrida (mm)
1	400	5	10	600
2	400	10		
3	600	5		
4	600	10		
5	800	5		
6	800	10		

Para todos os corpos de prova a temperatura de pré-aquecimento de 800 °C foi mantida por 5 minutos. As temperaturas de execução dos ensaios foram de 800 °C, 600 °C e 400 °C com pressões de contato estabelecidas de 5 MPa e 10 MPa. Como o parâmetro de entrada na máquina é em força, as cargas (98,17 N e 196,34 N) foram calculadas com base no diâmetro do pino (5 mm) para obtenção das pressões desejadas (5 MPa e 10MPa, respectivamente). Das 6 condições de ensaio, 3 repetições foram executadas, totalizando 18 testes no total. Foram considerados dois raios de teste em cada disco, conforme ilustrado na Fig. 4, sendo considerado cada raio como uma repetição. Desta forma, ao total, foram utilizados 9 discos. Previamente a cada teste, foi realizado o lixamento do pino com lixas de granulometria de 220 µm, 600 µm e 1200 µm, seguido da limpeza com acetona para possibilitar condições de teste equivalentes em todos os experimentos. Após este procedimento, o pino apresentava uma rugosidade superficial (Ra) de 0,6 µm.

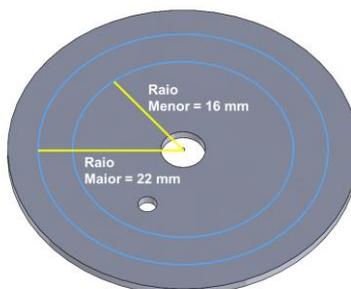


Figura 4. Raios de análise aplicados em cada disco de testes, contabilizando dois testes por disco.

3. Resultados

Após a rodada de testes, os resultados foram analisados de forma a investigar a influência das diferentes condições de atrito aplicadas no estudo. Os resultados das médias e desvios padrão dos coeficientes de atrito para cada combinação de condições avaliadas são apresentados na Fig. 5.

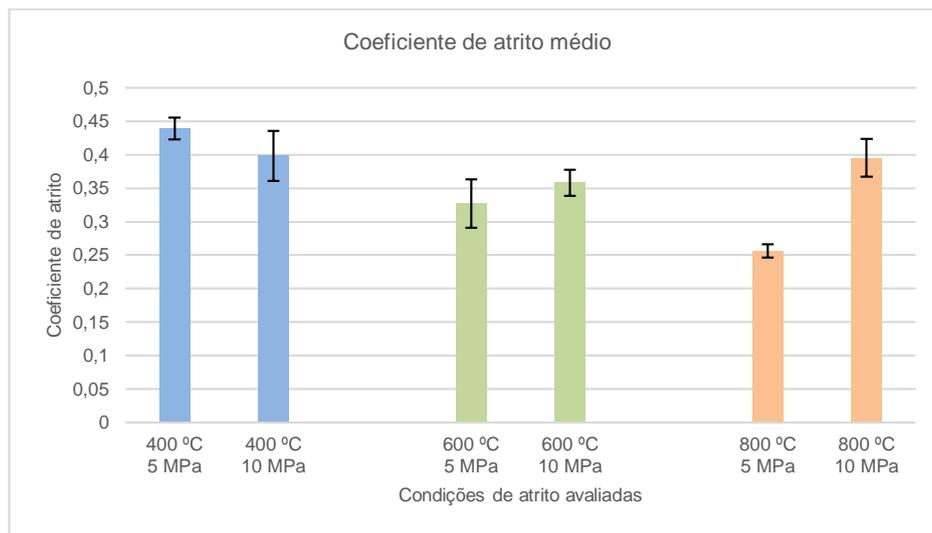


Figura 5. Coeficientes de atrito para cada combinação de condições a quente avaliadas.

O valor médio do coeficiente de atrito em função da temperatura, nas duas condições de pressão de contato, é exibido na Fig. 6.

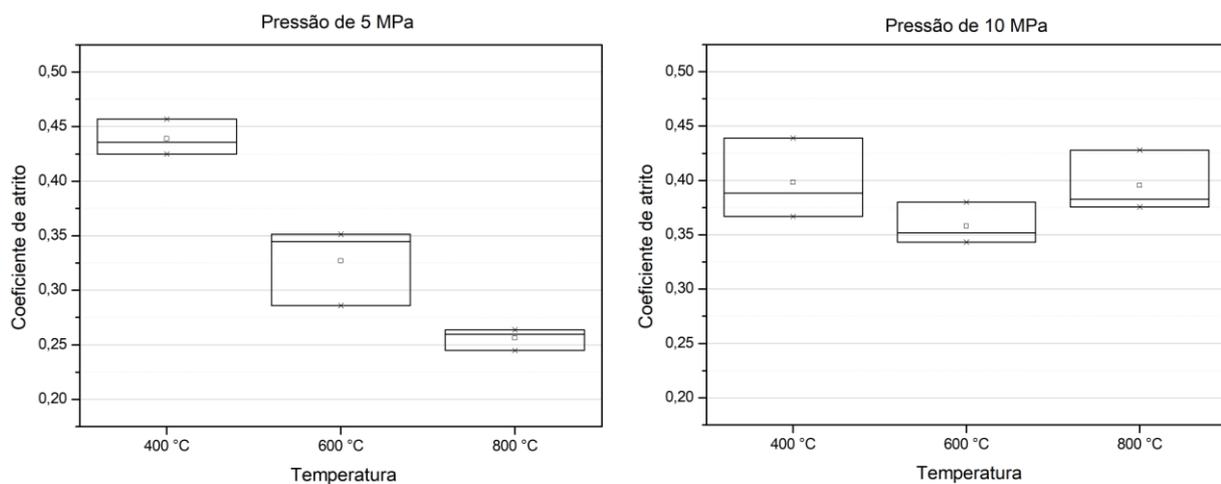


Figura 6. Coeficientes de atrito por pressão de contato.

Os resultados indicam, de forma geral, uma redução do coeficiente de atrito com o aumento da temperatura do ensaio, o que ocorreu ao se aumentar a temperatura de 400 °C para 600 °C e de 600 °C para 800 °C. A exceção foram os testes a 10 MPa, que indicaram um aumento no coeficiente de atrito na temperatura de 800 °C. Este comportamento de redução do coeficiente de atrito já foi observado em aços ao boro sem revestimento, como no trabalho de Hernandez et al. (2014), que observaram uma redução do coeficiente de atrito ao avaliarem o tribopar de um aço boro e aço ferramenta em teste de pino-sobre-disco. Segundo Hernandez et al. (2014) isso pode ser atribuído ao desenvolvimento de camadas protetoras oxidadas nas superfícies desgastadas do disco e do pino, pois pequenas mudanças na temperatura e/ou carga podem resultar em redução no comportamento de desgaste e atrito. Hernandez et al. (2014) elucidam que o comportamento tribológico dessas camadas é regido pela composição e tipo dos óxidos formados, que dependem de fatores como temperatura, carga, velocidade de deslizamento e materiais em contato. Essa redução também foi observada no estudo de Gracia-Escosa et al. (2017) que avaliou a variação do coeficiente de atrito do aço 22MnB5 à temperatura ambiente e à 900 °C. Em teste à 900 °C, o aço sem revestimento apresentou redução do coeficiente de atrito.

A Figura 7, Figura 8 e Figura 9 apresentam gráficos de coeficiente de atrito mensurados em tempo real durante a execução dos testes à 400 °C, 600 °C e 800 °C respectivamente, sendo estes resultados pertencentes a algumas das amostras aplicadas no estudo e não de toda a amostragem. As figuras indicam que, com o aumento da temperatura do teste, há uma tendência a intensificar a variação no comportamento de atrito do PHS 2000 sem revestimento, com variações mais intensas entre picos e vales ao longo dos testes. Além disso, na maioria das condições testadas, observa-se um aumento do coeficiente de atrito no início do teste. Inicialmente o pino está em contato com a superfície original

dos discos e, após a primeira revolução, o pino entra em contato com a superfície já desgastada pela passagem do pino, o que pode gerar essa redução no coeficiente de atrito após o início dos testes.

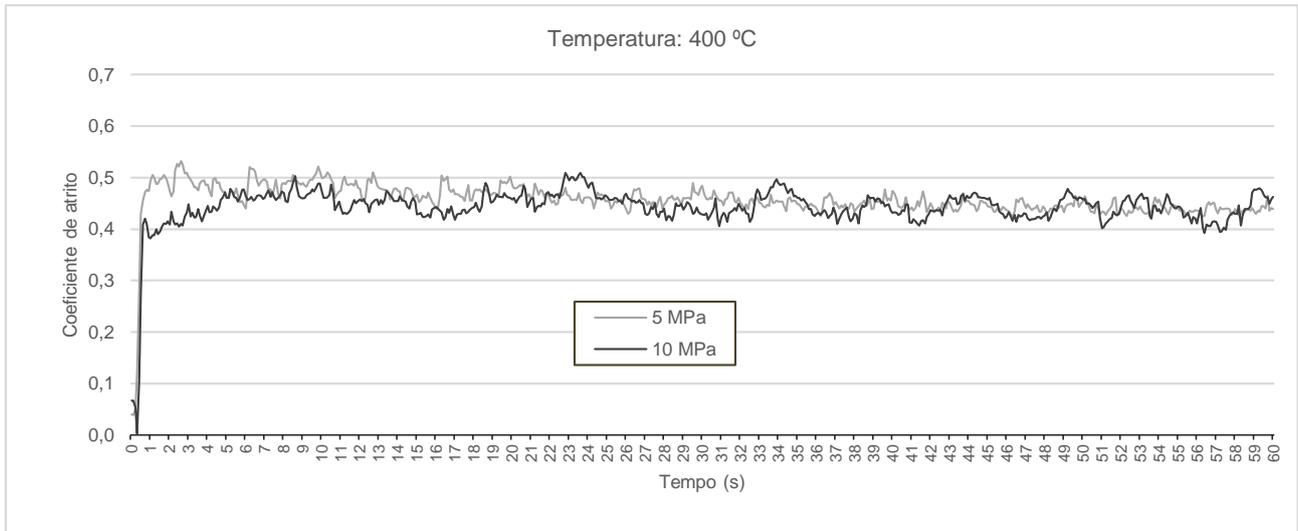


Figura 7. Gráfico de coeficientes de atrito ao longo dos ensaios a uma temperatura de 400 °C.

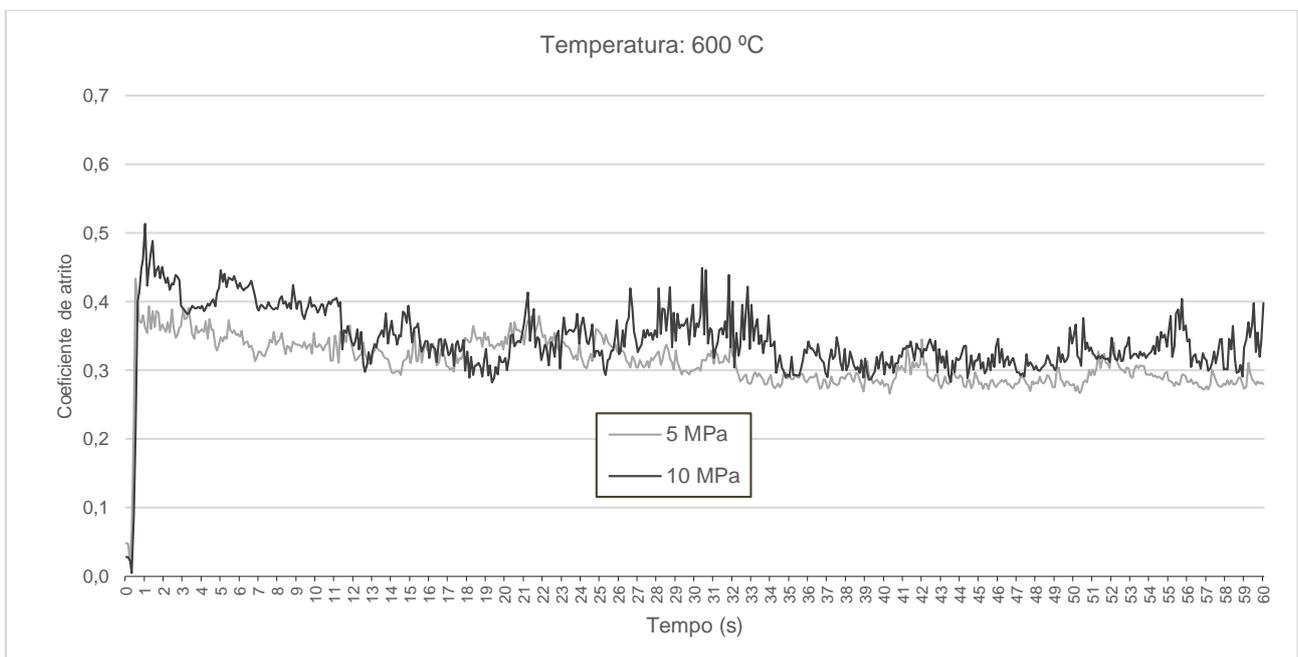


Figura 8. Gráfico de coeficientes de atrito ao longo dos ensaios a uma temperatura de 600 °C.

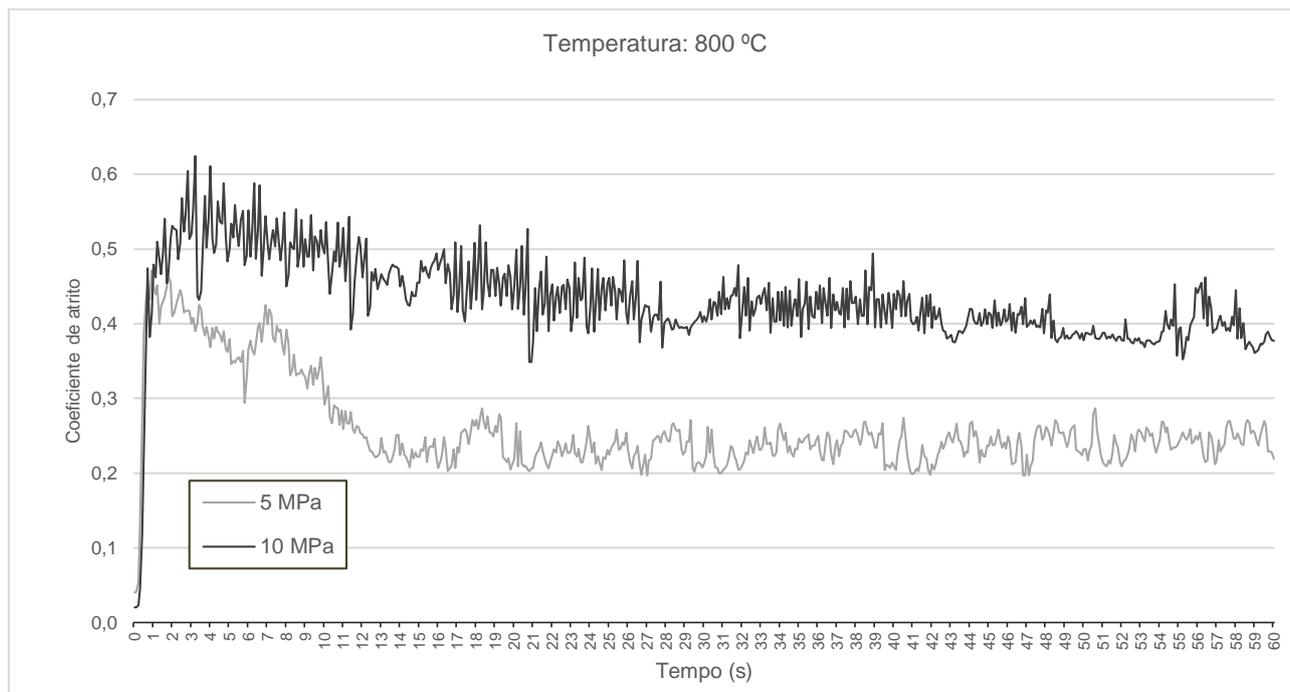


Figura 9. Gráfico de coeficientes de atrito ao longo dos ensaios a uma temperatura de 800 °C.

4. Conclusão

A partir do estudo realizado neste trabalho foi possível avaliar os coeficientes de atrito para o aço PHS 2000 sem revestimento em condições de pressão de 5 e 10 MPa e de temperatura de 400, 600 e 800 °C. As condições de pressão e temperatura podem afetar o comportamento deste aço, com variações no coeficiente de atrito. O aço PHS 2000 sem revestimento, bem como outros aços PHS não revestidos, pode apresentar redução do coeficiente de atrito em temperaturas maiores a uma pressão de 5 MPa, fator associado a formação de camadas de óxidos na superfície do aço que afetam na adesão com a superfície do pino de teste. Contudo, em pressões de 10 MPa, essa redução não foi observada. Maiores estudos precisam ser realizados para aprofundamento do comportamento tribológico deste aço, como estudos centrados na rugosidade, composição química e análises microestruturais.

5. REFERÊNCIAS

- Altan, T. R&D Update: Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts - Part I. *Stamping Journal*. 2007.
- Karbasian, K. Tekkaya, A.E. A review on hot stamping. *J. Mater. Process. Technol.* Vol. 210, no. 15, p. 2103–2118. 2010.
- Gracia-Escosa, E. García, I. Damborenea, J.J. Conde, A. Friction and wear behaviour of tool steels sliding against 22MnB5 steel. *Journal of Materials Research and Technology*. v. 6, n. 3. Pp. 241-250, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.04.002>
- Rana, R. Singh, S.B. Automotive steels: Design, metallurgy, processing, and applications. *Woodhead Publishing*, 2017.
- Billur, E. Hot stamping of ultra-high strength steels. *Springer Nature Switzerland*, 2019.
- Belanger, P. Steel innovation in Hot Stamping. *Great Design in Steel conference 2016*. 2016.
- Taylor, T. Clough, A. Critical review of automotive hot-stamped sheet steel from an industrial perspective. *Materials Science and Technology*. 2018.
- Hernandez, S. Hardell, J. Courbon, C. Winkelmann, H. Prakash, B. High temperature friction and wear mechanism map for tool steel and boron steel tribopair. *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*. vol. 8,n. 2. pp. 74-84. 2014. <https://doi.org/10.1179/1751584X13Y.0000000049>
- Wang, Z. Luo, X.Y. He, W.T. Zhang, Y.S. Investigation into the tribological behaviors of press hardening steels on the tailored conditions. *Sci China Tech Sci*. Vol 58. No 1. 2015.
- Hardell, J. Kassfeldt, E. Prakash, B. Friction and wear behaviour of high strength boron steel at elevated temperatures of up to 800 °C. *Wear*. Vol. 264. pp. 788-799. 2008.
- Trzepiecinski, T. Lemu, H.G. Recent developments and trends in the friction testing for conventional sheet metal forming and incremental sheet forming, *Metals (Basel)*. Vol. 10, n. 1, 2020.
- ASTM International. ASTM G115 – 10: Standard Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients. *ASTM International*. 2010.

ASTM International. ASTM G99 – 17: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. *ASTM International*. 2017.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF TEMPERATURE AND CONTACT PRESSURE ON THE FRICTION COEFFICIENT OF UNCOATED PHS2000 STEEL SHEETS

Bruno Caetano dos Santos Silva

SENAI CIMATEC - Instituto SENAI de Inovação (ISI) em Conformação e União de Materiais (SENAI CIMATEC ISI C&UM), Salvador, Brasil.

Universidade de São Paulo - Escola Politécnica, São Paulo, Brasil.

bruno.silva@fieb.org.br

Luã Fonseca Seixas

Programa de Pós-graduação GETEC, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, Brasil.

lua.seixas@fbter.org.br

Luis Fernando Folle

SENAI CIMATEC - Instituto SENAI de Inovação (ISI) em Conformação e União de Materiais (SENAI CIMATEC ISI C&UM), Salvador, Brasil.

luis.folle@fbter.org.br

Alexandre Ferraz Dourado

SENAI CIMATEC - Instituto SENAI de Inovação (ISI) em Conformação e União de Materiais (SENAI CIMATEC ISI C&UM), Salvador, Brasil.

alexandre.dourado@fieb.org.br

Rodrigo Santiago Coelho

Programa de Pós-graduação GETEC, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, Brasil.

SENAI CIMATEC - Instituto SENAI de Inovação (ISI) em Conformação e União de Materiais (SENAI CIMATEC ISI C&UM), Salvador, Brasil.

rodrigo.coelho@fieb.org.br

Gilmar Ferreira Batalha

Universidade de São Paulo - Escola Politécnica, São Paulo, Brasil.

gfbatalh@usp.br

***Sum:** Manganese-boron steels are widely used in hot stamping, resulting in 1500 (PHS 1500) or even 2000 MPa (PHS 2000) tensile strength after the stamping process. These steels are most used in the industry in the form of Al-Si coated sheets. However, recent developments are being made to enable the application of uncoated steels, resulting in cost reduction, but bringing technological challenges to be overcome. The friction coefficient (μ) is a fundamental parameter in the conformation of sheet metal and is influenced by several factors, such as: surface roughness, working temperature, lubrication, contact pressure and sliding speed. In hot stamping, it is known that temperature can have a great influence on μ values for coated plates, however, there is little information about uncoated steels. The present work aims to investigate the tribological behavior of UNCOATED PHS 2000 steel plates by pin-on-disc test. The tests were performed under three temperature conditions (800 °C, 600 °C and 400 °C) varying the contact pressure at 5 and 10 MPa. The results showed that the conditions of temperature and contact pressure can influence the tribological behavior of uncoated PHS steel, presenting variations generated mainly by the presence of oxide layers. The results showed that the uncoated PHS 2000 steel tends to reduce the friction coefficient when increasing temperature, at a pressure of 5 MPa, which is related to the formation of oxide layers on the steel surface. However, at 10 MPa pressure of, this reduction was not observed.*

***Keywords:** Friction coefficient; PHS 2000; Pin-on-disc; Hot stamping; uncoated steel sheet.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.