

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DE AÇO SAE 8640 TEMPERADO E REVENIDO

Raul Canever¹

Elvys Isaias Mercado Curi²

Resumo: O aço SAE 8640 substitui o aço 1045 em produtos industriais, por ter maior resistência à fadiga e fratura, além de ter melhor resistência ao desgaste. O tratamento térmico modifica suas propriedades de dureza e tenacidade, mas ocasiona algumas dificuldades durante o processo de usinagem, pela influência da temperatura e pelo desgaste adesivo que ocorre com a ferramenta de corte. Há pouca informação sobre seu comportamento ao desgaste e atrito em superfícies em deslizamento. Informações sobre o material são essenciais para a boa aplicação, economizando em custos industriais e aprimorando o desempenho dos componentes. O objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento tribológico do aço SAE 8640 temperado, revenido e sem tratamento térmico em relação ao atrito e desgaste, assim como o consumo de corrente elétrica. Para analisar o comportamento tribológico se preparou discos corpos de prova \varnothing 63,5 mm e 12 mm de espessura. Estes foram submetidos a um ensaio de desgaste adesivo no tribômetro pino sobre disco, seguindo as recomendações da norma ASTM G 99. Utilizou-se como pino uma esfera de alumina Al_2O_3 e de aço ASTM 52100, durante os ensaios foram coletados sinais de atrito e temperatura. Depois do ensaio, avaliou-se a perda de massa. Os resultados apresentaram que a perda de massa foi menor no corpo de maior dureza e maior na mostra sem tratamento térmico, as amostras tratadas termicamente apresentaram uma peça de massa de até 6 vezes menor que as amostras sem tratamento. O comportamento do coeficiente de atrito com o pino cerâmico foi menor no material temperado e revenido, porém maior sem temperar. O acréscimo de temperatura na superfície foi diretamente proporcional ao consumo de corrente.

Palavras-Chave: SAE 8640. Tribologia. Adesão. Eficiência energética. Desgaste.

1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista a variedade cada vez maior de componentes e matérias primas na fabricação de peças para a indústria metal mecânica, é importante considerar na escolha que os materiais sejam resistentes à fadiga, fratura e desgaste. Se alguma parte dos componentes interage com deslizamento sobre

1 Graduando em Engenharia Mecânica, ano: 2022. E-mail: raulcanever@gmail.com

2 Professor do Centro Universitário UniSATC. E-mail: elvys.curi@satc.edu.br

outros materiais, nestes casos se considera o comportamento do coeficiente de atrito, propriedades de desgaste por adesão, consumo de energia e custo.

Entre as ligas de aço de baixo carbono, o aço SAE 8640 se destaca por suas propriedades mecânicas, que são superiores a outros aços como, por exemplo, o aço SAE 1045. A maior vantagem dos aços de alto Manganês é que sua composição de Cromo, Níquel e o Molibdênio como elementos de liga principais, melhora suas propriedades, quando for submetido ao tratamento térmico. Uma das desvantagens deste tipo de aço é que requer alguns cuidados durante a usinagem, já que deve ser controlada sua temperatura lubrificando-o, porque suas propriedades se modificam com facilidade, além de ter que ser usinado preferencialmente com materiais cerâmicos para evitar sua adesão com materiais metálicos e controlar melhor as rugosidades no acabamento superficial.

Nos projetos de desenvolvimento de uma máquina, se estima que suas peças possuem uma resistência em relação ao desgaste. Nos sistemas mecânicos que utilizam movimentos dinâmicos, forças, variações de temperatura, impactos, o atrito e demais parâmetros influenciam no tempo de vida dos componentes das máquinas. Além disso, a atenção às instruções desenvolvidas pela engenharia do produto como faixa de dureza, composição química e morfologia se faz essencial para garantir o bom funcionamento do sistema (O'DONOVAN et al., 2015).

Podem-se obter melhorias no desempenho dos materiais com a aplicação da têmpera. É um procedimento utilizado na indústria metal mecânica na fabricação de peças a fim de aumentar a resistência mecânica do material e, conseqüentemente, atrasar a substituição por uma nova peça reduzindo gastos com manutenção.

O presente trabalho tem por objetivo estudar o comportamento tribológico do aço SAE 8640, na sua forma comercial e o mesmo tratado termicamente. A avaliação do desempenho respeito ao desgaste, atrito e consumo de energia na condição de deslizamento se realiza por meio de ensaios em um tribômetro pino sobre disco. Nos primeiros ensaios o pino é uma esfera cerâmica de alumina, depois se testa com uma esfera de aço 52100 para comparar seu comportamento. Esta análise pretende avaliar a importância do mecanismo de desgaste adesivo e sua relação com o atrito e o consumo de energia. Por fim, busca-se alcançar algumas recomendações para o melhor uso do material SAE 8640, com e sem tratamento

térmico e os benefícios que podem ser obtidos para a escolha de peças que estariam funcionando com deslizamento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apresenta-se, neste capítulo, a fundamentação teórica deste artigo a fim de dissertar sobre os conceitos estudados e aplicados em cada fase do projeto e suas áreas específicas. Destaca-se também a orientação por meio de referências a autores nas pesquisas sobre desgaste, ferramentas de corte, materiais e tratamentos térmicos.

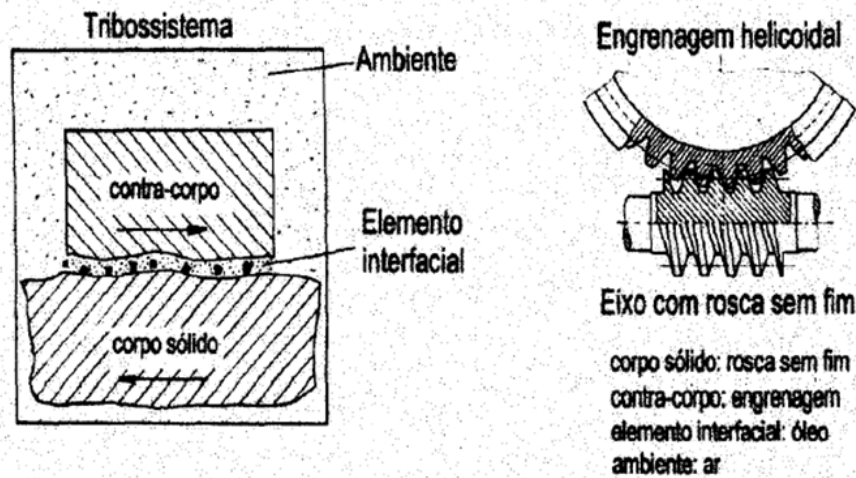
2.1 TRIBOSISTEMA

Conforme exposto anteriormente, o contato entre os elementos que compõem uma máquina geram um desgaste que precisa ser considerado ao desenvolvê-la, pois dessa forma, torna-se inviável manter o pleno funcionamento do sistema por tempo indeterminado. Atento a isso, a escolha do material dos componentes se torna de extrema importância no retardo do desgaste natural, porém essa se torna uma tarefa complexa tendo em vista que outras variáveis também interferem, tais como as condições de uso e o ambiente onde se encontra o equipamento.

De acordo com Yust (1985), denomina-se tribossistema os fatores analisados no conjunto operante. Ou seja, além da dinâmica de trabalho do elemento como temperatura, força aplicada e velocidade relativa, devem-se avaliar características naturais do material antes do desenvolvimento dos componentes de um projeto. Dentre as propriedades, observa-se: dureza, fatores de resistência, microestrutura e microtopografia (rugosidade).

Além disso, compreende-se a importância de lubrificantes ou partículas que estarão entre as superfícies de contatos dos componentes, pois estes elementos interfaciais podem acelerar o processo de desgaste. A Fig. 1 mostra os corpos que contemplam um tribossistema e um exemplo de aplicação.

Figura 1: Tribossistema e engrenagem helicoidal.



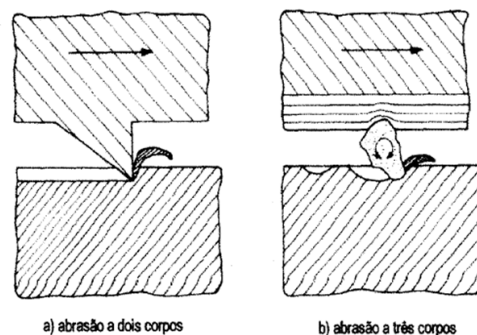
Fonte: Gahr (1987)

Compreende-se a importância de lubrificantes ou partículas que estarão entre as superfícies de contatos dos componentes, pois estes elementos interfaciais podem acelerar o processo de desgaste.

2.2 DESGASTE

A atenção ao desgaste é de suma importância, pois o desprendimento de materiais causado pela deterioração pode ocasionar falhas em outras partes do equipamento. Essa problemática se faz presente em sistemas hidráulicos, onde partículas desprendidas podem ser conduzidas pelo fluxo de óleo, comprometendo todo o seu funcionamento (MACHADO et al., 2009). A característica da abrasão entre superfícies com um terceiro corpo pode ser demonstrada na Fig. 2:

Figura 2: Desgaste em relação ao número de corpos envolvidos.



Fonte: Gahr (1987)

O comportamento do desgaste depende diretamente dos corpos e de suas geometrias durante o contato. É de suma importância conhecer a aplicação correta e condições de trabalho dos materiais a serem utilizados em um sistema mecânico.

2.4 MATERIAL

Segundo Pannoni (2005), os aços podem ser classificados em dois tipos: aços carbono e aços ligados. Sendo o primeiro composto por ferro e carbono, tendo de 0,008% a 2,11% de carbono em seu interstício e outros materiais provenientes do processo de fabricação do aço. Já o segundo caracteriza-se pela adição de outros elementos em sua composição.

Os aços podem ser classificados de forma correspondente à sua composição química, de acordo com as normas SAE. Desta forma, destaca-se o aço SAE 8640, onde os dois primeiros números (86XX) indicam o tipo do aço. Sua composição é definida por 0,20% Molibdênio (Mo), 0,50% Cromo (Cr) e 0,55% Níquel (Ni) e a quantidade de carbono presente é de 0,40%, conforme indicam os dois últimos números da sua nomenclatura.

Conforme a norma SAE (*Society of Automotive Engineers*) e sua equivalente AISI (*American Iron and Steel Institute*) é admitido como aço 8640 um material que contém a concentração de elementos descritos na Tab. 2.

Tabela 1: Tabela da composição química do material.

% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Ni	%Cr	%Mo
0,38	0,75	Máx.	Máx.	0,13	0,40	0,40	0,15
-	-	0,030	0,040	-	-	-	-
0,43	1,00			0,35	0,70	0,60	0,25

Fonte: Favorit Aços Especiais (2023)³

A temperabilidade do aço SAE 8640 é de nível médio e sua dureza pode ultrapassar 50HC quando temperado.

O aço SAE 8640 está presente em grande parte das indústrias de fabricação mecânica, pois possui características importantes como a alta resistência

³ Disponível em: <<https://favorit.com.br/nossos-produtos/acos-para-construcao-mecanica/aco-sae-8640>> Acesso em: 31 mai. 2023.

à fadiga e à fratura, além de boa usinabilidade, temperabilidade e forjabilidade. Além disso, destaca-se pela sua utilização em substituição ao aço ABNT 1045 e em composições de diversos materiais como eixos, pistões, engrenagens, componentes para máquinas e motores, entre outros. (SILVEIRA, 2018)

De acordo com Caruso (2001), as principais ligas do SAE 8640 (Cromo, Níquel e Molibdênio) são responsáveis pela qualidade do produto, visto que, a adição de cromo eleva a temperabilidade por formar carbonetos endurecedores fáceis de dissolver quando ocorre a austenitização, processo anterior ao tratamento térmico de têmpera. O Molibdênio, por sua vez, forma carbonetos que propiciam o revenimento, realizado após a têmpera, atuando no segundo pico de dureza. Ainda de acordo com o autor, destaca-se que o Níquel, por si só, é capaz de aumentar a temperabilidade, mas neste caso, em junção com Molibdenio e Cromo, sua eminência está relacionada à resistência a fadiga e ao impacto.

Elementos como Boro, Cromo, Manganês, Molibdênio, Níquel, Titânio, Tungstênio, entre outros, são acrescentados ao aço por conta da necessidade de aprimoramento das características mecânicas do material, de acordo com Souza (2008).

2.5 TRATAMENTO TÉRMICO

Os aços são materiais de suma importância para a fabricação de diversos produtos e oferecem vantagem ao serem tratados termicamente, pois podem amplificar seu desempenho em determinada aplicação ao aumentar sua dureza ou tenacidade.

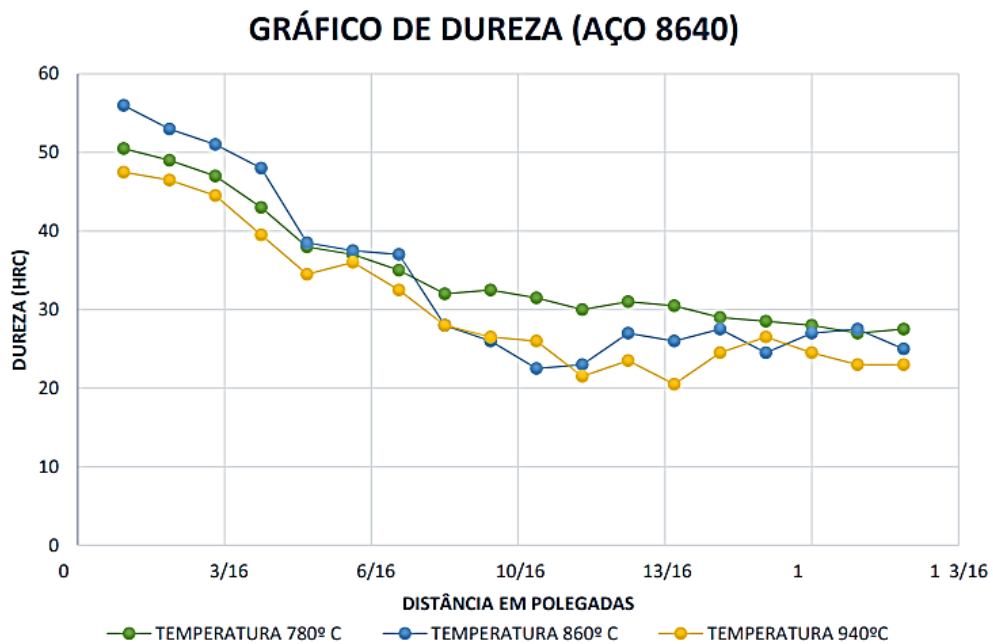
2.5.1 Têmpera

Entende-se por aço temperado um material aquecido ao ponto de austenitização e resfriado em condições de tempo a fim de evitar a formação de estruturas perlíticas e favorecer a formação de estruturas martensíticas, aumentando assim a sua resistência (COSTA e SILVA, 1988).

O aço SAE 8640 é amplamente utilizado para fabricar máquinas, equipamentos, matrizes, na indústria agrícola e automobilística na confecção de

virabrequins, bielas, eixos e matrizes para modelagem de compósitos polímeros. Apresenta resistência ao desgaste e bom nível de tenacidade. Este material após tratamento térmico de têmpera entre 780 e 940°C pode ser usado como aço ferramenta, conforme afirma Silva Junior (2003). A Fig. 3 mostra a dureza do aço SAE 8640 temperado a diferentes temperaturas.

Figura 3: Dureza em função da distância da extremidade temperada de SAE 8640.



Fonte: Adaptado Pereira et al. (2020)

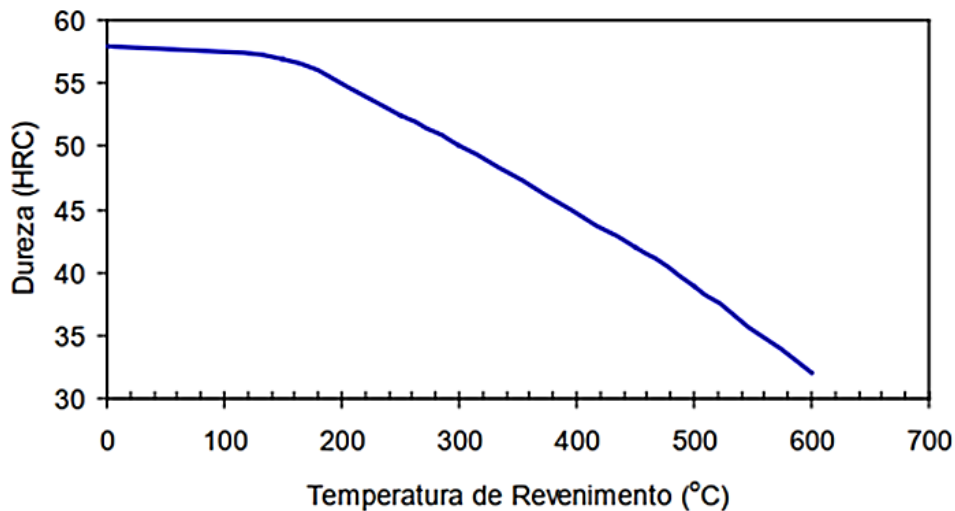
A Fig. 3 demonstra que existe uma faixa de temperatura entre os limites para de alcançar a maior valor de dureza. Para o tratamento térmico, a temperatura de austenitização deve ser fundamentada para que se atinjam os objetivos principais do processo. Se o objetivo for transformar a maior quantidade de austenita retida em martensita para aumentar a dureza do material, maiores temperaturas de austenitização serão necessárias.

Reduzindo a temperatura de austenitização, maior quantidade de migração de carbonos e carbonetos irão se formar durante o tratamento. Desta forma ocorrerá um aumento da resistência ao desgaste do material devido à formação destes carbonetos tendo uma melhoria também nos níveis de tenacidade (COLLINS, 1998).

2.5.2 Revenimento

Conforme Chiaverini (2005), o revenimento está presente no processo de tratamento térmico e é capaz de auxiliar na correção de tensões internas e excesso de dureza, que são responsáveis por fragilizar o material.

Figura 4: Curva de revenimento.



Fonte: Adaptado GGD Metals (2022)⁴

O processo de revenimento se dá pelo aquecimento da peça a uma temperatura abaixo da temperatura de têmpera e, dessa forma, é possível uniformizar a estrutura do material (COSTA e SILVA, 1988).

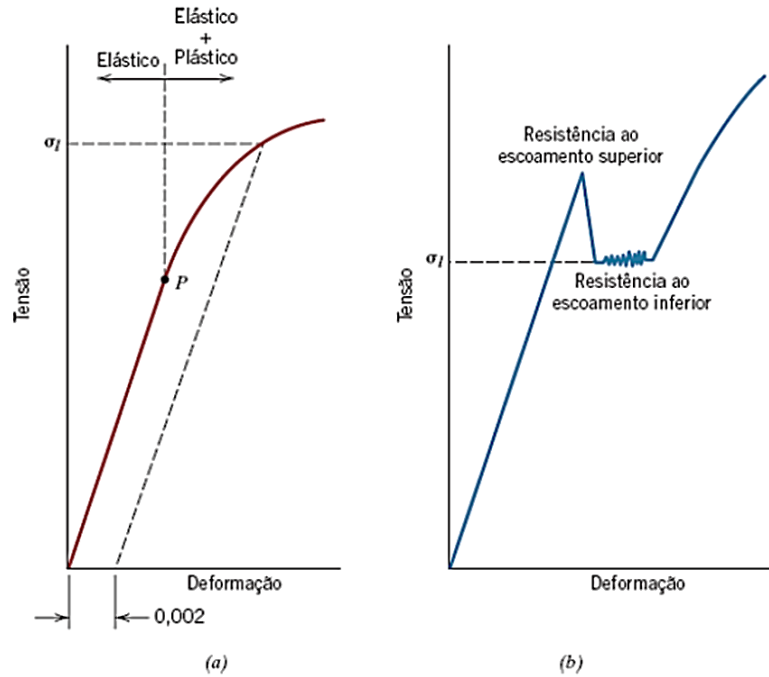
2.6 TENACIDADE

Compreende-se por tenacidade a capacidade que o material apresenta de se deformar plasticamente antes de romper-se (SOUZA, 2008). Existem ensaios laboratoriais de tensão-deformação em tração que demonstram o comportamento do material da zona elástica até sua ruptura.

Conforme Fig. 5 observa-se que a área à direita do ponto P entre o eixo e a curva do gráfico indica a tenacidade do material.

⁴ Disponível em: <<https://www.ggdmetals.com.br/produtos/aco-construcao-mecanica/>> Acesso em: 31 mai. 2023.

Figura 5: a) Comportamento tensão-deformação de um metal, com deformação elástica e plástica, o limite de proporcionalidade P e a resistência ao escoamento σ_l , determinada como uso do método da pré-deformação de 0,002. b) Comportamento tensão-deformação esquemático em aços que possuem ponto de resistência ao escoamento definido.

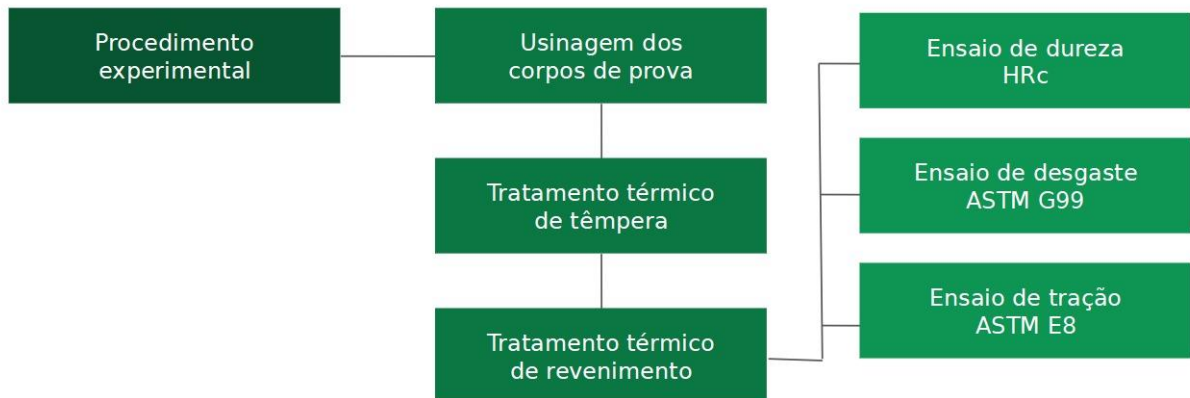


Fonte: Callister (2016)

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para realização do procedimento experimental utilizou-se a metodologia, ilustrada na Fig. 6, com as etapas que foram executadas. Na referência bibliográfica não foram encontradas informações sobre desgaste e atrito do aço SAE 8640, portanto, se considerou necessário realizar diferentes tipos de ensaios para depois analisar sua relação destes resultados.

Figura 6: Fluxograma da metodologia para procedimento experimental.



Fonte: Do autor (2023)

3.1 TRATAMENTO TÉRMICO E REVENIMENTO

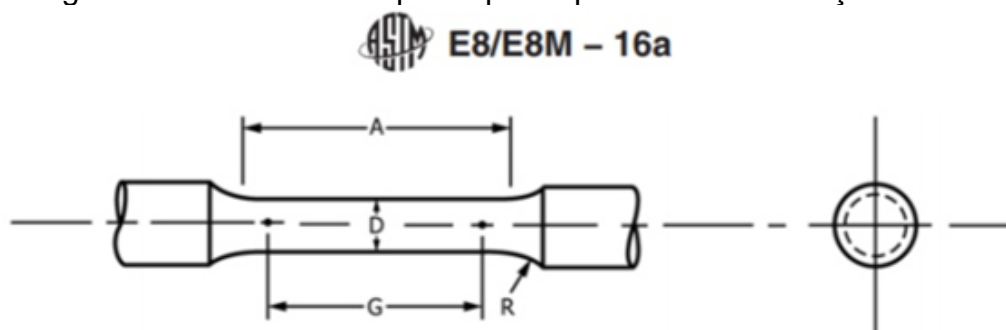
Para a realização da têmpera, foi aplicado as instruções indicadas pelo fabricante do material. Dessa forma, foi aquecido os corpos de prova até atingir a temperatura de 850 °C e manter aquecido por 60 minutos. Em seguida, utiliza-se o método de resfriamento ao óleo.

Nas amostras revenidas, após a têmpera, assim que o corpo atinge uma temperatura de 300 °C inicia-se o processo de revenimento. A temperatura para o procedimento será definida a partir da dureza requerida de 50 HRc.

3.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Compreende-se que o corpo de prova a ser utilizado necessita estar de acordo com a norma ASTM E8, conforme demonstrado na Fig. 7 e Tab. 2:

Figura 7: Desenho do corpo de prova para ensaio de tração.



Fonte: Adaptado ASTM E8/E8M - 16a (2016)

Tabela 2: Desenho do corpo de prova para ensaio de tração.

Cotas	A	D	R
Dimensões nominais (mm)	30	6	6

Fonte: ASTM E8/E8M – 16a (2016)

Foram efetuados 9 ensaios, 3 de cada tipo (sem tratamento, temperado e revenido). Para os ensaios de tração, utiliza-se a máquina de ensaio universal EMIC modelo DL 10000, com velocidade de avanço de 5 mm/min e capacidade máxima de tração de 100 kN.

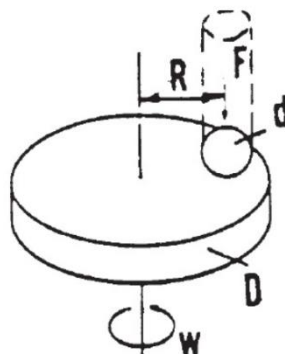
3.3 ENSAIO DE DUREZA

Os ensaios de dureza foram realizados no Laboratório de Caracterização Microestrutural LACAMI, da UNISATC, com a utilização do durômetro Mitutoyo HR-400 com penetrador de cone de diamante a uma força de 60N. Os resultados foram obtidos na escala HRA. Os ensaios de dureza foram condscendentes com resultados de algumas publicações citadas na revisão.

3.4 ENSAIO DE DESGASTE ABRASIVO EM PINO SOBRE DISCO

Seguindo a norma ASTM G99, o equipamento para o ensaio em questão possui um pino com uma esfera acoplada em sua ponta que, por sua vez, faz contato com a amostra circular (disco) a ser ensaiada de dimensões previstas pela norma. O esquema é demonstrado pela Fig. 8.

Figura 8: Esquema do sistema de Teste de desgaste de pino sobre disco.



Fonte: Adaptado ASTM G99 (2000)

Para os ensaios, foram utilizados 2 corpos de prova de cada tipo (sem tratamento, temperado e revenido) tendo diâmetro de 63,5mm, espessura 12mm. Os corpos foram retificados para obter a rugosidade mínima requerida pela norma.

Conforme Verdi (2011), o eixo do pino necessita estar perpendicular com a superfície do disco, independente deste estar na vertical ou horizontal. O pino deve ser pressionado contra a face do disco em movimento com uma carga previamente definida para simular o movimento e atrito do material durante seu funcionamento na máquina, ferramenta ou equipamento que o utiliza em sua construção.

O desgaste é determinado da mesma forma que o ensaio roda de borracha analisando a perda de massa e volume. O resultado provém de diversos fatores como a velocidade de giro, tempo de simulação (distância percorrida), temperatura, propriedade dos materiais envolvidos, força exercida pela carga, etc.

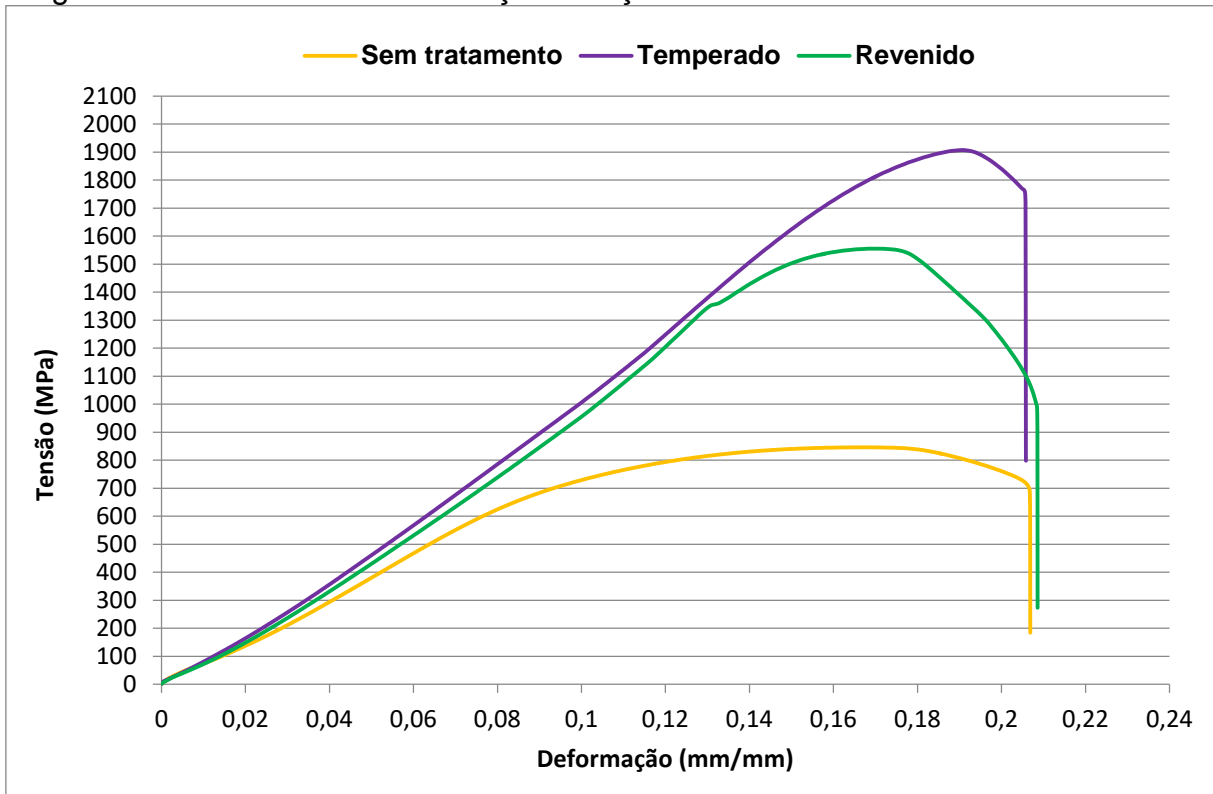
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após concluir o procedimento experimental, compilaram-se os dados adquiridos para análise dos resultados apresentados nos ensaios. A análise visa comparar o comportamento do material considerando o material sem tratamento, temperado e revenido.

4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Após os corpos de prova padrão serem submetidos ao tratamento térmico, iniciou-se o ensaio de tração com a finalidade de conhecer as características do material, a Fig. 9 demonstra os resultados.

Figura 9: Gráfico tensão-deformação do aço SAE 8640 tratado termicamente.



Fonte: Do autor (2023)

O resultado demonstrou dados como alongamento, tensão de escoamento e tensão máxima de ruptura de cada situação.

4.3 DUREZAS (HRa)

No ensaio de dureza, foram realizadas três endentações com durômetro adotando a escala padrão do método *Rockwell* com penetrador cone de diamante à 60 kgf (HRa). Os resultados são apresentados na Tab. 3 abaixo:

Tabela 3: Resultado do ensaio de dureza.

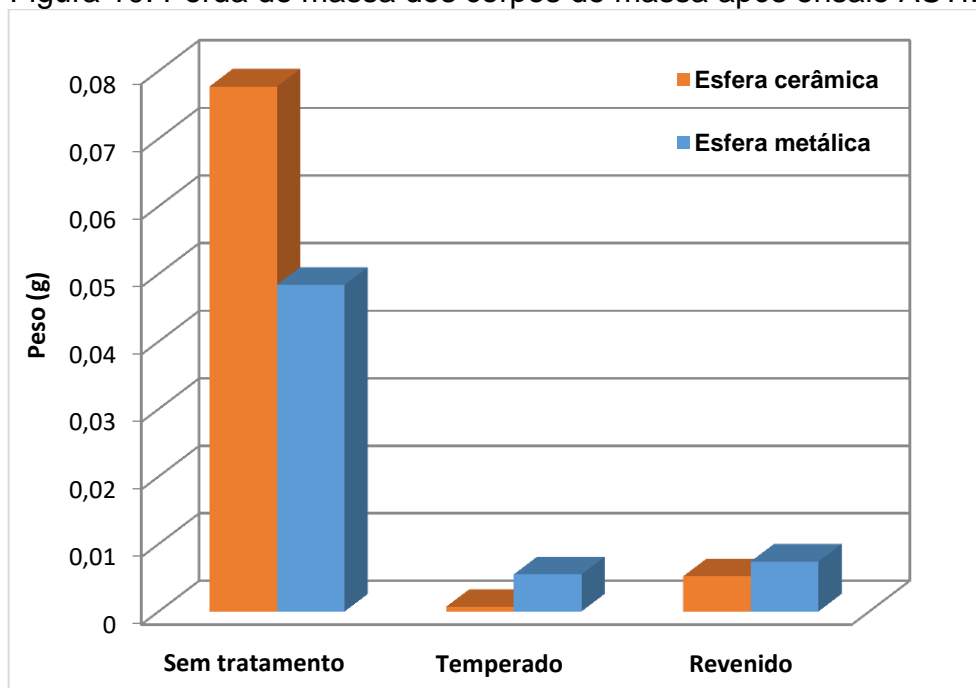
	1º	2º	3º	4º	Média	Desvio padrão
Sem tratamento	63,6	62,4	61,6	63,5	62,7	0,7
Temperado	75,5	72,9	73,8	77,0	74,8	1,4
Revenido	72,9	74,4	72,8	75,5	73,9	1,0

Fonte: Do autor (2023)

4.4 ANÁLISES DE DESGASTE ABRASIVO EM PINO SOBRE DISCO

Após os tratamentos térmicos realizados, os corpos de prova do ensaio abrasivo foram sujeitos ao desgaste na máquina pino sobre disco e os resultados que demonstram a variação na perda de massa podem ser observados na Fig. 15.

Figura 10: Perda de massa dos corpos de massa após ensaio ASTM-G99



Fonte: Do autor (2023)

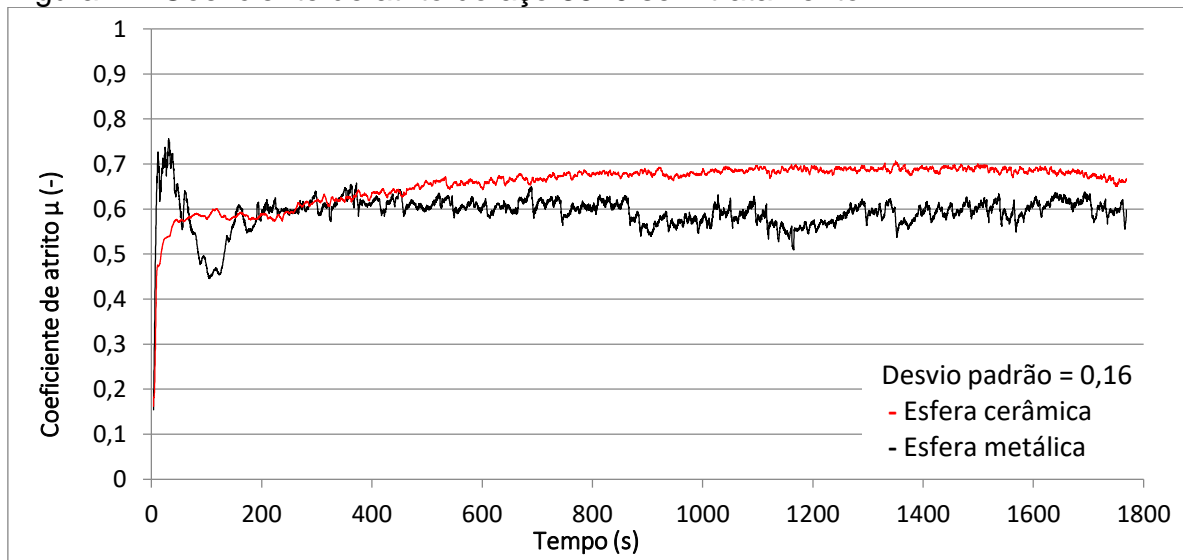
Conforme visto na Fig. 10, a mesma informa a perda de massa em gramas de cada corpo de prova ensaiado com pino em cerâmica (óxido de alumínio - Al_2O_3) e aço ferramenta 52100.

Os resultados fornecidos pelo tribômetro mostram o desgaste, por meio da perda de massa, com o coeficiente de atrito em cada caso. Constata-se a relação

do coeficiente de atrito no tempo em segundos de cada caso para os dois diferentes tipos de material utilizados nos pinos.

A Fig. 11 apresenta os resultados do comportamento do atrito do corpo de prova sem tratamento térmico. Nesses resultados se observa que inicialmente o comportamento do coeficiente de atrito com o pino metálico é instável e após 400 segundos tende a ser estável. Isso não ocorre no ensaio com o pino cerâmico, que desde o início tende a incrementar-se gradualmente até estabilizar. Um valor de coeficiente de atrito levemente menor foi observado no ensaio com o pino metálico.

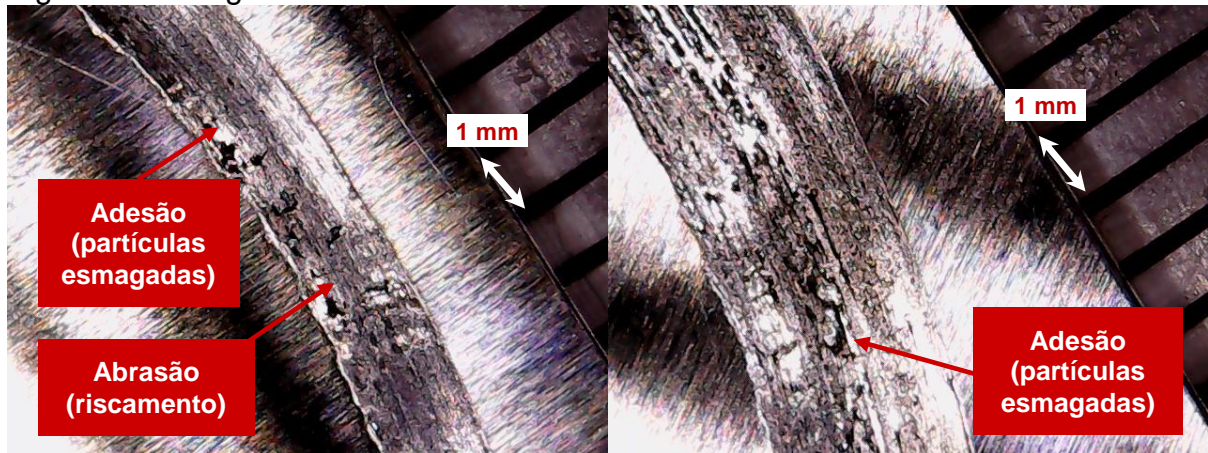
Figura 11: Coeficiente de atrito do aço 8640 sem tratamento.



Fonte: Do autor (2023)

Na Fig. 12 é possível observar a trilha percorrida pelo pino durante o ensaio ASTM G99. Na esquerda foi utilizado o pino de cerâmica onde podemos notar um menor grau de adesão à superfície da peça. Nota-se também maior desgaste e profundidade da trilha com pino cerâmico, em relação à figura à direita, que foi utilizada um pino metálico.

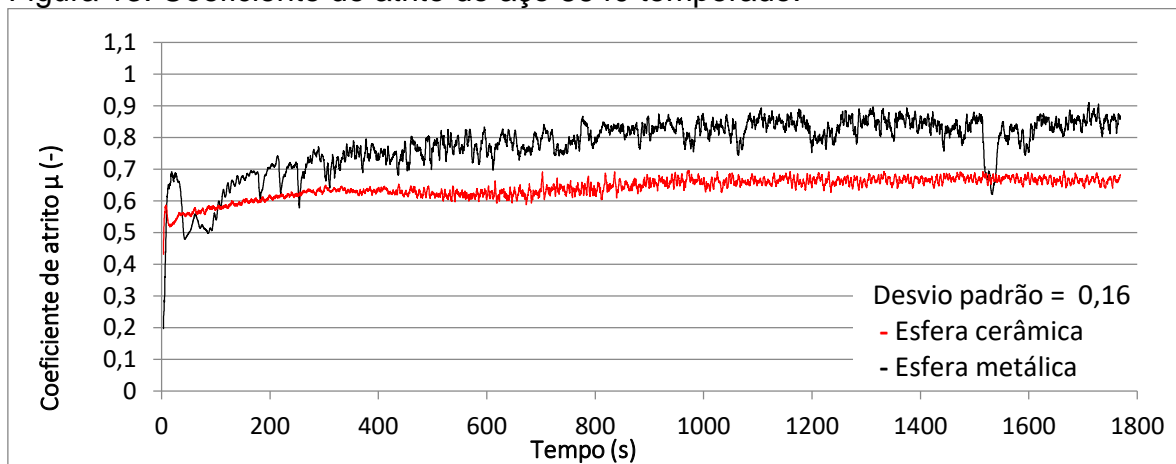
Figura 12: Fotografias das trilhas do material sem tratamento.



Fonte: Do autor (2023)

A Fig. 13 apresenta os resultados do comportamento do atrito do corpo de prova temperado. Nesses resultados se observa que o comportamento do coeficiente de atrito com o pino metálico é instável, a partir dos 200 segundos. Isso ocorre com menor intensidade no ensaio com o pino cerâmico, que se estabiliza a partir dos 1000 segundos entre 0,60 e 0,70. Um valor de coeficiente de atrito consideravelmente menor foi observado no ensaio com o pino cerâmico.

Figura 13: Coeficiente de atrito do aço 8640 temperado.

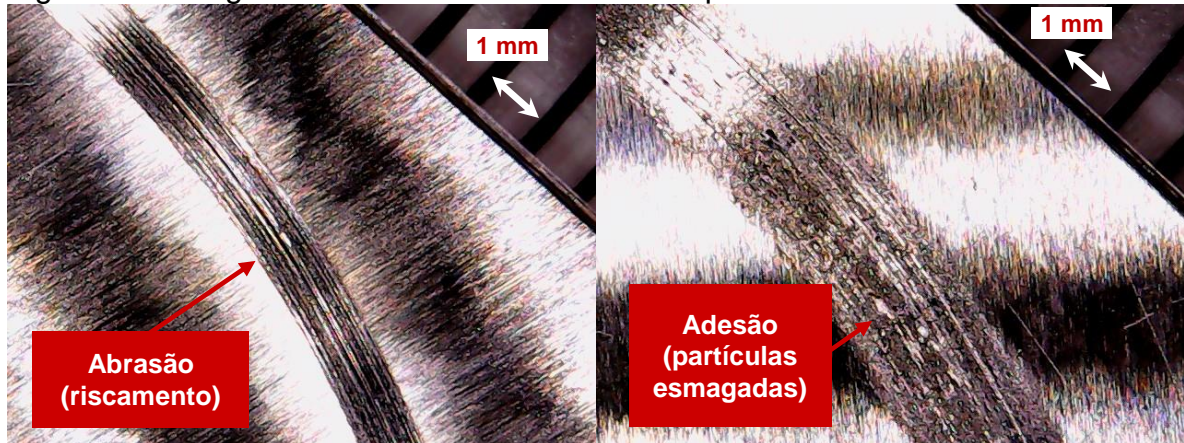


Fonte: Do autor (2023)

Na Fig. 14 é possível observar a trilha percorrida pelo pino cerâmico e metálico, respectivamente, correspondente ao ensaio com material temperado. Na imagem à esquerda utilizou-se o pino de cerâmica onde há um grau de adesão consideravelmente menor à superfície da peça em relação ao ensaio sem

tratamento. Percebe-se que a instabilidade do coeficiente de atrito dos resultados se visualiza pelo desgaste não linear da imagem à esquerda. Houve maior desgaste e profundidade da trilha com pino metálico em relação à figura à esquerda onde foi utilizado um pino cerâmico.

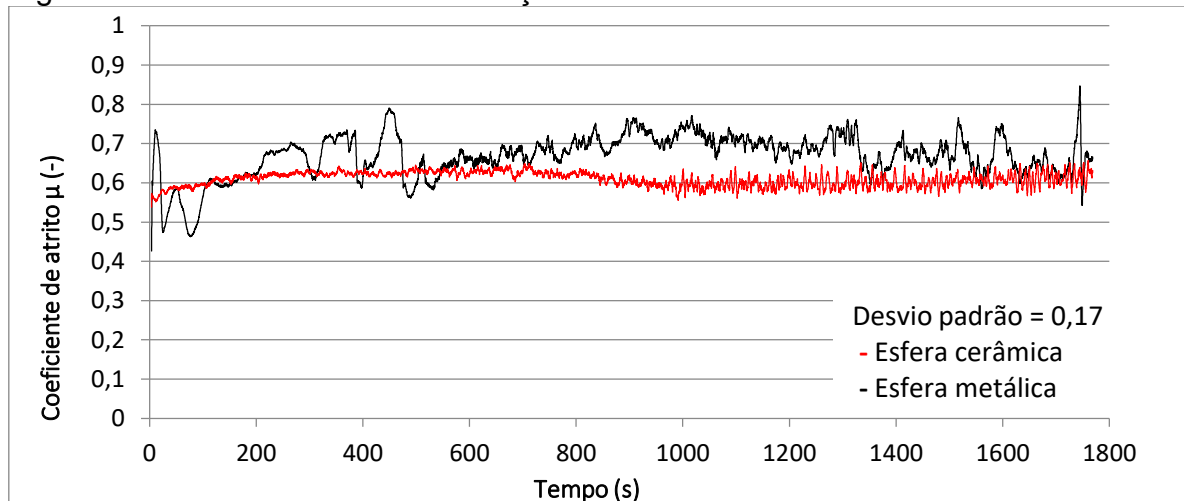
Figura 14: Fotografias das trilhas do material temperado.



Fonte: Do autor (2023)

A Fig. 15 apresenta os resultados do comportamento do atrito do corpo de prova revenido. Nesses resultados nota-se que o comportamento do coeficiente de atrito com o pino metálico é instável do começo ao fim. Isso ocorre com menor intensidade no ensaio com o pino cerâmico, que se estabiliza a partir dos 900 segundos entre 0,50 e 0,65. Um valor de coeficiente de atrito consideravelmente menor também foi observado no ensaio com o pino cerâmico.

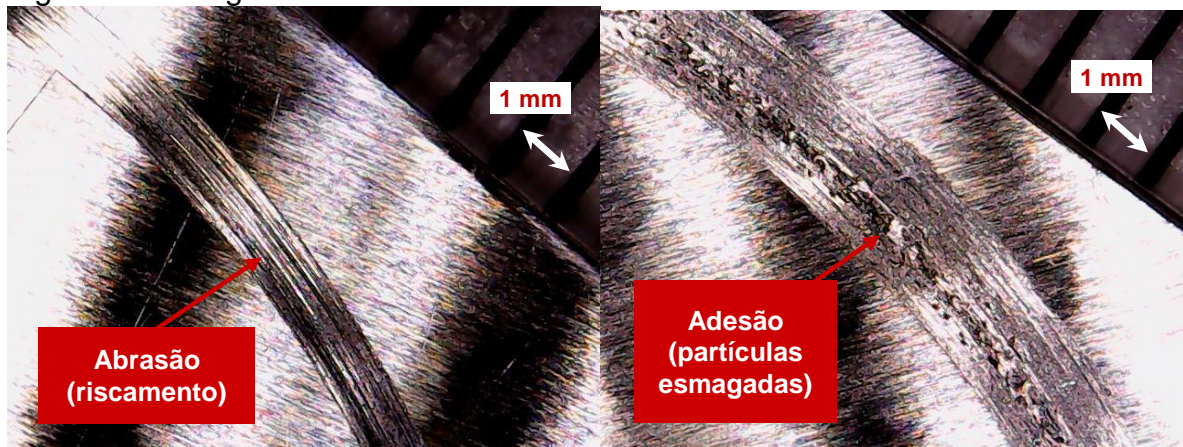
Figura 15: Coeficiente de atrito do aço 8640 revenido.



Fonte: Do autor (2023)

Na Fig. 16 é possível observar a trilha percorrida pelo pino cerâmico e metálico, respectivamente, que correspondem ao ensaio com material revenido. Na imagem à esquerda fez-se o uso do pino de cerâmica, que apresentou um menor grau de adesão à superfície da peça, bem como menor coeficiente de atrito. Nota-se também menor desgaste e profundidade da trilha com pino cerâmico em relação à figura da direita que foi utilizada um pino metálico.

Figura 16: Fotografias das trilhas do material revenido.

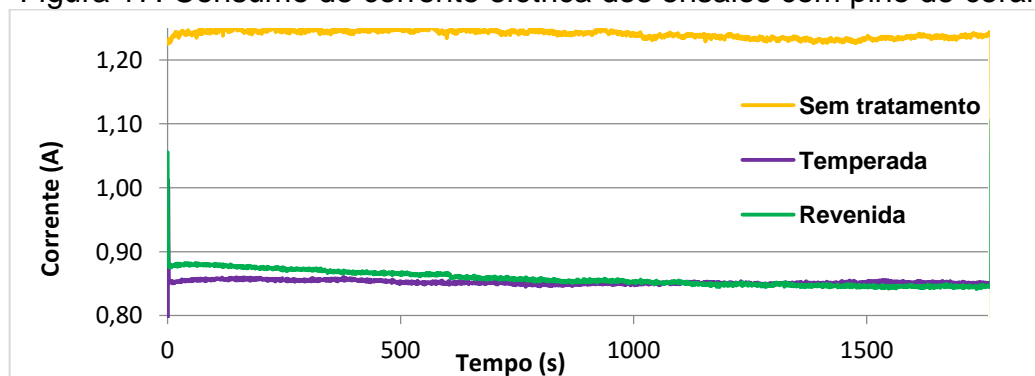


Fonte: do Autor (2023)

Dados sobre corrente elétrica (A) também foram gerados pelo tribômetro indicando a relação entre consumo de energia dos casos ensaiados.

A Fig. 17 abaixo ilustra os resultados obtidos nos testes utilizando pino cerâmico, tendo o ensaio sem tratamento como maior consumidor de corrente elétrica em relação aos corpos temperados e revenidos. Este último apresenta menor consumo com a tendência de redução a partir dos 600 segundos iniciais.

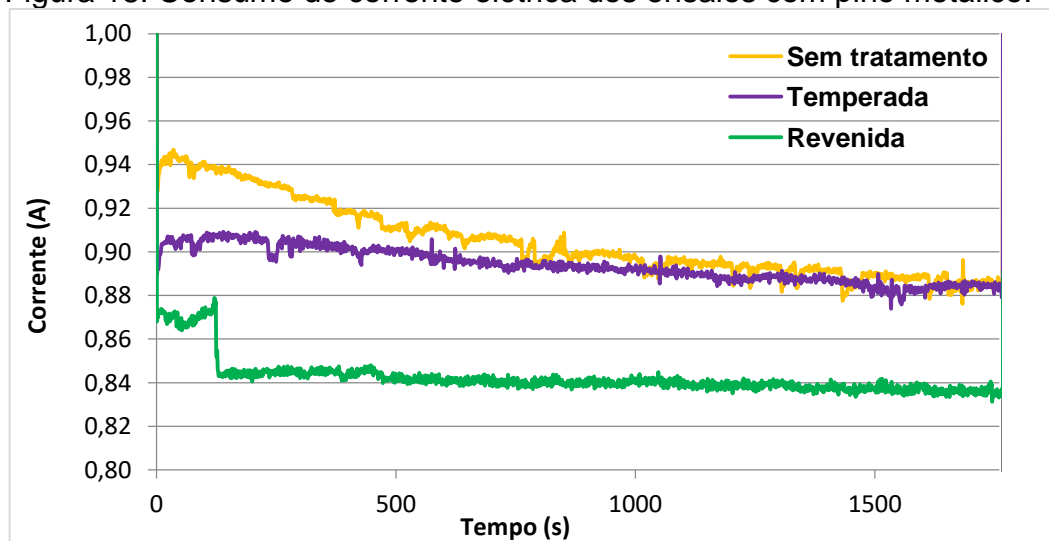
Figura 17: Consumo de corrente elétrica dos ensaios com pino de cerâmica.



Fonte: Do autor (2023)

Já a Fig. 18 apresenta os resultados obtidos nos testes utilizando pino metálico, com o ensaio sem tratamento inicialmente maior, mas tende a se equalizar aos resultados obtidos do corpo de prova temperado a partir dos 700 segundos iniciais. Os valores do ensaio com corpos de prova revenidos apresentam valores equivalentes ao mesmo material ensaiado com pino metálico.

Figura 18: Consumo de corrente elétrica dos ensaios com pino metálico.



Fonte: Do autor (2023)

Utilizou-se uma câmera térmica para registrar a temperatura imediatamente após o ensaio de desgaste, confirmando desta forma a diferença de consumo energético de cada corpo de prova apresentado.

A Fig. 19 representa os ensaios utilizando pino cerâmico, ordenados da esquerda para direita da seguinte forma: sem tratamento, temperado e revenido.

Figura 19: Fotografias térmicas ensaio com pino cerâmico.



Fonte: Do autor (2023)

Nota-se uma diferença de quase 10 graus Celsius entre a amostra sem tratamento e as amostras temperada e revenida. Já na Fig. 20 demonstram-se os ensaios utilizando pino metálico, ordenados da esquerda para direita: sem tratamento, temperado e revenido.

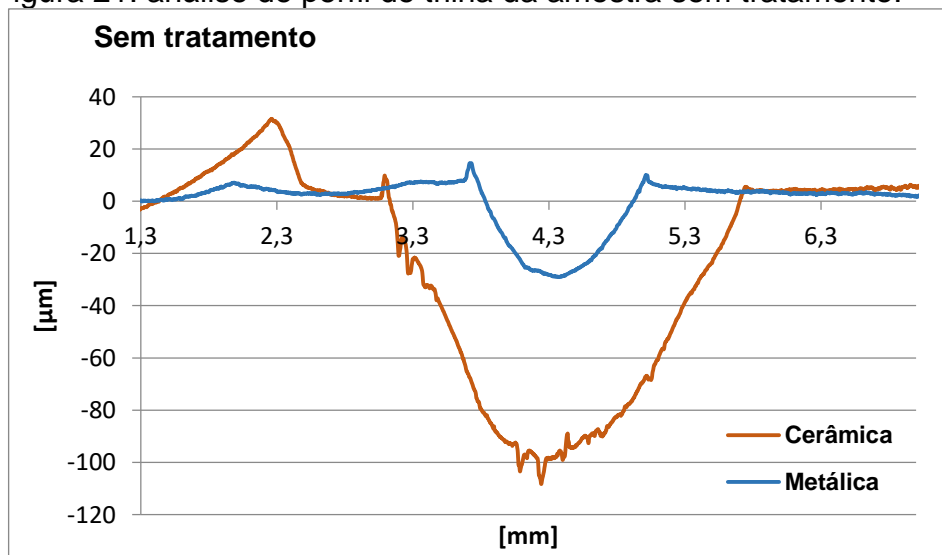
Figura 20: fotografias térmicas ensaio com pino metálico.



Fonte: Do autor (2023)

Neste caso, os corpos de prova sem tratamento e temperado apresentaram valores próximos se distanciando do corpo de prova revenido em aproximadamente 6 graus Celsius.

Figura 21: análise de perfil de trilha da amostra sem tratamento.



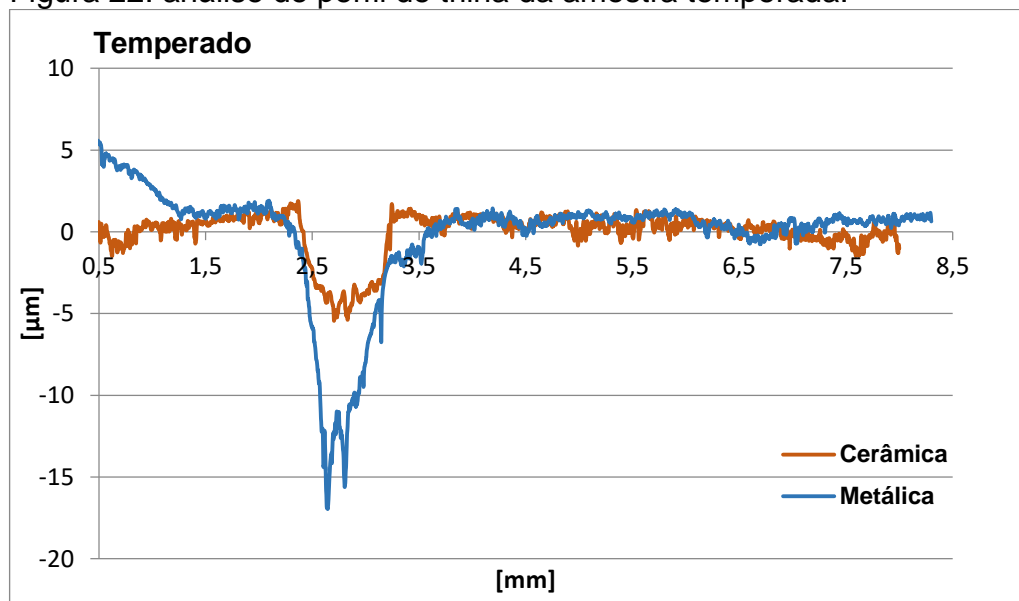
Fonte: Do autor (2023)

A Fig. 21 demonstra o perfil da trilha da amostra sem tratamento. No ensaio com a esfera metálica há uma diferença de profundidade de aproximadamente 65µm do ensaio com pino cerâmico, que não será observado nos outros casos. Também nota-se um acúmulo de material na superfície da amostra

que se utilizou o pino cerâmico. Nota-se que a largura da trilha feita pela esfera cerâmica é aproximadamente o dobro da largura feita pela esfera metálica.

A amostra temperada apresenta um quadro oposto ao da amostra sem tratamento, demonstrando diferença de aproximadamente $10\mu\text{m}$ de profundidade da amostra com pino cerâmico para o metálico e aponta acúmulo de material acima da superfície com o pino metálico. A largura da trilha não apresentou diferença significativa entre os ensaios.

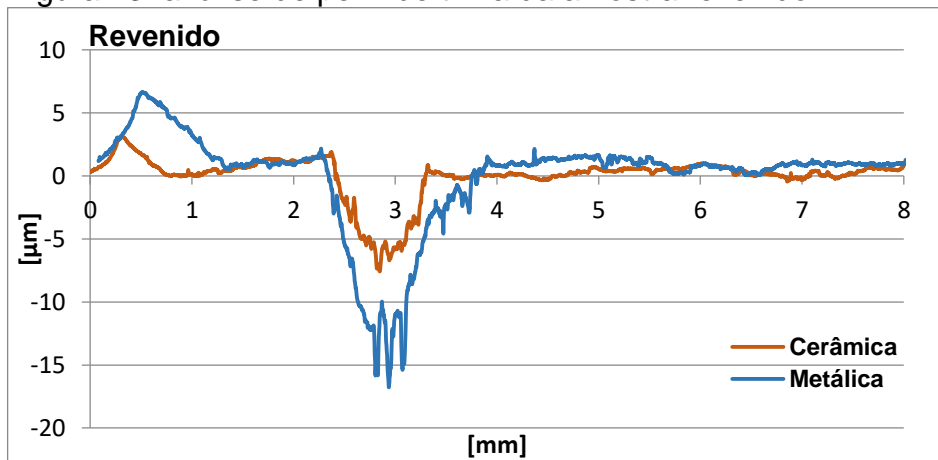
Figura 22: análise de perfil de trilha da amostra temperada.



Fonte: Do autor (2023)

O perfil da trilha da amostra revenida apresenta diferença de profundidade de aproximadamente $10\mu\text{m}$. Desta vez, houve um pequeno acúmulo de material acima da superfície também da amostra ensaiada com pino cerâmico. Há uma diferença considerável da trilha da amostra ensaiada com pino metálico para a com pino cerâmico.

Figura 23: análise de perfil de trilha da amostra revenido.



Fonte: Do autor (2023)

5 CONCLUSÃO

Este artigo que, desde o princípio, visa compreender questões sobre o atrito e desgaste do aço SAE 8640, foi de extrema importância uma vez que, atualmente, encontra-se pouca referência bibliográfica sobre o assunto, principalmente sobre como se comporta o desgaste e atrito em superfícies em deslizamento, assim como o seu consumo de energia. Tab. 4 abaixo apresenta uma síntese dos resultados obtidos.

Tabela 4: síntese dos resultados.

	Sem Tratamento Esf. Cerâmica	Sem Tratamento Esf. Metálica	Temperado Esf. Cerâmica	Temperado Esf. Metálica	Revenido Esf. Cerâmica	Revenido Esf. Metálica
Coeficiente de atrito	0,70	0,60	0,65	0,85	0,60	0,65
Perda de massa	0,075g	0,048g	0,002g	0,005g	0,005g	0,007g
Temperatura	48,2 °C	43,7 °C	38,8 °C	42,0°C	37,6 °C	37,1 °C
Consumo de corrente elétrica	1,25 A	0,89 A	0,85 A	0,88 A	0,85 A	0,84 A
Tensão de ruptura	700 MPa		1750 MPa		1500 MPa	
Dureza superficial	62,7 HRA		74,8 HRA		73,9 HRA	

Fonte: Do autor (2023)



Sugere-se como continuidade desta pesquisa, o aprofundamento sobre ensaios utilizando diferentes métodos de desgaste e diversas temperaturas de tratamento térmico, considerando que este tratamento possui capacidade de modificar propriedades de dureza e tenacidade, mas que também pode ocasionar dificuldades no processo de usinagem.

REFERÊNCIAS

- ALBERTIN, Eduardo. **Desgaste abrasivo – Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo**. In: 58º Congresso Anual da ABM: Rio de Janeiro: ABM, 2003.
- ASTM G99-04. **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**. American Society for Testing and Materials. ASM Society: Estados Unidos, p. 5, 2000.
- ASTM E8. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials. ASM Society: Estados Unidos, 2007.
- BOING, Denis. **Análise de vida de ferramentas de PcBN no torneamento do ferro fundido branco com alto teor de cromo**. p. 149. 2011. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior Tupy – IST/SOCIESC. Joinville.
- CALLISTER JR., W. D., **Ciência e engenharia de materiais: Uma Introdução**, 5ª ed., LTC Editora, 2002.
- CALLISTER JR., W. D., RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais – Uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CARUSO, E. **Informações Gerais Sobre os Aços**. Centro Federal de Educação Tecnológica de São Paulo – CEFET/SP, p. 2-5, 2001.
- COLLINS, David N. **Cryogenic Treatment of Tool Steels**. *Advanced Materials & Processes*, pp. H23-H29, 1998.
- COSTA E SILVA, A.L.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005. 599 p.
- DA SILVA JUNIOR, D.; et al. **Comparação microestrutural de dois aços para utilização em moldes de fabricação de compósitos**. 2003.
- GAHR, K. H. Z. **Microstructure and wear of materials**. Amsterdam: Elsevier, 1987.
- JONES, M. H.; SCOTT, D.; **Industrial tribology**, 1 ed. Amsterdam., Tribology Series 8, 1983.
- MACHADO, A. R.; et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. São paulo: Editora Edgar Blücher Ltda., 2009.

- O'DONOVAN, P.; et. al. ***An industrial big data pipeline for data-driven analytics maintenance applications in large-scale smart manufacturing facilities.*** Journal of Big Data, v. 2, n. 1, 2015.
- PANNONI, Fabio Domingos. **Aços estruturais.** 2005.
- PEREIRA, A. S.; et. al. **Ensaio de temperabilidade dos aços 8640, 4140 e 4340.** SITEFA-Simpósio de Tecnologia da Fatec Sertãozinho, 3(1), 79-95. 2020.
- SILVEIRA, F.; et al. **Tratamento Térmico de Têmpera em Aço ABNT 8640: análise das Propriedades Mecânicas.** HOLOS, 2018, 34.2: 49-59
- SOUZA, Gisélia Alves de. **Caracterização microestrutural de um aço médio carbono e baixa liga (com estrutura bainita/martensítica) via microscopia óptica.** Guaratinguetá, 2008.
- VERDI, Josué. **Dispositivo pino-disco para análise de desgaste na presença de diesel e biodiesel.** 2011.
- VLEUGELS, J; et al. ***Machining of steel with sialon ceramics: influence of ceramic and workpiece composition on tool wear.*** Wear, vol. 189, n. 1-2, p. 32-34, 1995.
- YUST, C. S. ***Tribology and wear.*** International Metals Reviews, v. 30, n. 3, p. 141-154, 1985.

AGRADECIMENTOS

À minha família que sempre incentivou meus estudos e compreenderam minha ausência em alguns momentos dedicados à formação acadêmica.

À Beatriz, minha namorada, pelo apoio principalmente emocional durante os momentos mais difíceis deste período.

Ao meu orientador Elvys Mercado Curi pela orientação fornecida que tornou possível a realização desta pesquisa.

Aos professores que compartilharam seus conhecimentos durante minha trajetória acadêmica, em especial aos professores Fábio Peruch e Alexandre Milanez, pelo auxílio e instruções durante a realização dos ensaios em laboratório.

Aos bolsistas do LAVITRI, Lucas, Leonardo e Everton e também à instituição da FAPESC N° 2021TR001762 pelo financiamento da pesquisa que contribui com o desenvolvimento tema.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma colaboraram com a realização deste trabalho.

LISTA DE SÍMBOLOS

N	[N]	Carga aplicada
ε	[mm/mm]	Deformação elástica
ε_f	[mm/mm]	Deformação real
σ_r	[MPa]	Limite de resistência
σ_e	[MPa]	Limite de escoamento
Ur	[N.mm/mm ³]	Módulo de resiliência
Ut	[N.mm/mm ³]	Módulo de tenacidade