



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA



MICHEL DA SILVA LIMA

**ESTUDO COMPARATIVO DO AÇO ABNT 1020, FERRO FUNDIDO
NODULAR E FERRO FUNDIDO VERMICULAR, NA EFICIÊNCIA DE
FRENAGEM UTILIZANDO ENSAIOS TRIBOLÓGICOS**

Uberlândia, junho de 2017

MICHEL DA SILVA LIMA

**ESTUDO COMPARATIVO DO AÇO ABNT 1020, FERRO FUNDIDO
NODULAR E FERRO FUNDIDO VERMICULAR, NA EFICIÊNCIA DE
FRENAGEM UTILIZANDO ENSAIOS TRIBOLÓGICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à
Banca Examinadora da Universidade Federal de
Uberlândia para a obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr.
José Antônio F.Borges.

**UBERLÂNDIA
2017**

AGRADECIMENTOS

É com muita honra e alegria, que estou chegando ao fim de mais uma etapa da minha vida.

Agradeço primeiramente a Deus por me dar forças para realizar este trabalho.

Agradeço aos meus pais, pelo apoio que sempre me foi dado, pelo carinho, pela educação e exemplo de perseverança para realizar meus sonhos, agradeço também a minha irmã que sempre me ajudou dando apoio como pode neste trabalho.

Agradeço ao Prof. Rafael Ariza Gonçalves, por cada ensinamento que tive ao longo da realização deste trabalho, pelo exemplo de seriedade, honestidade e profissionalismo que sempre me passou. Com certeza irei levar seu exemplo tanto para minha vida pessoal, como profissional.

Agradeço ao Prof. José Antônio, por ter me apresentado o Rafael Ariza, e por ter me incentivado a fazer um trabalho sobre um tema inédito.

Agradeço ao Prof. Sinésio coordenador do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste - LTAD por disponibilizar todos equipamentos e a infra-estrutura do laboratório para a realização deste trabalho, pelo enorme aprendizado e oportunidade.

Agradeço ao técnico Rafael Pires, pela paciência em me ensinar a utilizar os equipamentos do LTAD, e a cada técnico e pessoas do LTAD, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço a Equipe Cerrado Baja-SAE e ao coordenador do projeto Prof. Daniel, pela oportunidade de crescer tanto pessoalmente quanto profissionalmente. Aqui foi onde tudo começou. Lá entrei inexperiente e cheio de dúvidas, e saí cheio de experiências e sabendo agir, diante das adversidades. Vi na prática a aplicação do que é passado na sala de aula, vi a Engenharia de Verdade.

RESUMO

Os veículos mini baja desenvolvidos por equipes de estudantes de engenharia apresentam muitos desafios e dentre esses o sistema de freio e os materiais de sua confecção. Neste trabalho são testados através de ensaios abrasométricos quatro materiais utilizando-se um abrasômetro (*Drill Pipe*) projetado e construído no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste da UFU. Os materiais escolhidos foram dois Aços ABNT 1020, Ferro Fundido Vermicular e Ferro Fundido Nodular Ferrítico. Os materiais foram caracterizados metalograficamente, medidas as durezas e ensaiados por deslizamento contra um corpo de fricção especialmente montado na condição a seco e imersos em água. Foram obtidos os coeficientes de atrito e as taxas de desgaste. Não foi possível identificar o melhor material em virtude da elevada dispersão dos resultados.

Palavras-chave: mini baja; ensaios abrasométricos; *Drill Pipe*; coeficientes de atrito; taxas de desgaste.

ABSTRACT

The mini Baja vehicles developed by teams of engineering students present many challenges and among these the brake system and the materials of its manufacture. In this work, four materials are tested through abrasive tests using an abrasive (*Drill Pipe*) designed and built in the Laboratory of Technology in Friction and Wear of UFU. The materials chosen were two ABNT 1020 Steels, Vermicular Cast Iron and Ferritic Nodular Cast Iron. The materials were characterized metallographically, the hardness was measured and tested by sliding against a friction body specially mounted in dry condition and immersed in water. The coefficients of friction and the wear rates were obtained. It was not possible to identify the best material due to the high dispersion of the results.

Keywords: mini baja, abrasometric tests; *Drill Pipe*; Coefficients of friction; Wear rates.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	SISTEMAS DE FRENAGEM POR DISCO	11
2.1.1	<i>Freio a Disco</i>	11
2.1.2	<i>Discos de Freio</i>	13
2.1.3	<i>Composição básica do disco de freio:</i>	16
3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DOS DISCOS	17
3.1	METALOGRAFIA	17
3.1.1	<i>Exame Metalográfico</i>	17
4	DESGASTE	19
4.1	ENSAIOS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO	19
4.2	TIPOS DE CONTATO E DESGASTE POR DESLIZAMENTO	19
5	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	21
5.1	CARACTERIZAÇÃO METALOGRÁFICA	21
5.1.1	<i>Preparação da amostra para análise metalográfica</i>	21
5.1.2	<i>Procedimentos</i>	21
5.2	ENSAIOS ABRASOMÉTRICOS	23
5.2.1	<i>Ensaio Drill Pipe</i>	23
5.2.2	<i>Confecção dos corpos de prova e contra corpo de fricção</i>	24
5.2.3	<i>Cálculo da Força de Frenagem no Ensaio</i>	25
5.2.4	<i>Avaliação do desgaste</i>	26
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
6.1	MICROGRAFIAS	27
6.2	ENSAIOS ABRASOMÉTRICOS	28
6.2.1	<i>Coefficientes de Atrito</i>	29
6.2.2	<i>Taxa de Desgaste</i>	43
6.2.3	<i>Dureza</i>	46
6.2.4	<i>Correlações</i>	47
7	CONCLUSÃO	51
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pinça de freio do Tipo Fixa.	12
Figura 2: Pinça de freio do Tipo Flutuante.	12
Figura 3: Disco de freio sólido.	13
Figura 4: Disco de freio ventilado.	14
Figura 5: Disco de freio perfurado.	14
Figura 6: Disco de freio ranhurado.	15
Figura 7: Disco de freio ventilado-perfurado-ranhurado.	15
Figura 8: Geometrias utilizadas nos ensaios por deslizamento.	19
Figura 9: Esquema ilustrativo de amostras a seco ou parcialmente lubrificadas no ensaio por deslizamento.	20
Figura 10: Diagrama esquemático mostrando a evolução de um único trecho de contato quando as duas asperezas se movem uma sobre a outra.	20
Figura 11: Serra de corte.	21
Figura 12: Amostra embutida.	21
Figura 13: Mini-som.	22
Figura 14: Politriz.	22
Figura 15: Dessecador à vácuo.	23
Figura 16: Máquina de ensaio por deslizamento - <i>Drill Pipe</i>	24
Figura 17: - Dimensões dos corpos de prova.	24
Figura 18: Dimensões contra corpo de fricção.	25
Figura 19: Balança analítica.	26
Figura 20: Microestrutura obtida do Aço ABNT 1020 - Baja após ataque: Nital: 2%.	27
Figura 21: Microestrutura obtida do Aço ABNT 1020 após ataque: Nital: 2%.	27
Figura 22: Microestrutura obtida do FoFo Nodular Ferrítico após ataque: Nital: 2%.	28
Figura 23: Microestrutura obtida do FoFo Vermicular após ataque: Nital: 2%.	28
Figura 24: Ensaio 1 - Aço ABNT 1020 a seco.	30
Figura 25: Ensaio 2 - Aço ABNT 1020 a seco.	30
Figura 26: Ensaio 3 - Aço ABNT 1020 a seco.	31
Figura 27: Ensaio 4 - Aço ABNT 1020 - Molhado.	31
Figura 28: Ensaio 5 - Aço ABNT 1020 - Transição Seco/Molhado.	32
Figura 29: Ensaio 1 - Aço ABNT 1020 - Baja a seco.	32
Figura 30: Ensaio 2 - Aço ABNT 1020 - Baja a seco.	33
Figura 31: Ensaio 3 - Aço ABNT 1020 - Baja a seco.	33
Figura 32: Ensaio 4 - Aço ABNT 1020 - Baja - Molhado.	34
Figura 33: Ensaio 5 - Aço ABNT 1020 - Baja - Transição Seco/Molhado.	34
Figura 34: Ensaio 1 - FoFo Nodular a seco.	35
Figura 35: Ensaio 2 - FoFo Nodular a seco.	35
Figura 36: Ensaio 3 - FoFo Nodular a seco.	36
Figura 37: Ensaio 4 - FoFo Nodular - Molhado.	36
Figura 38: Ensaio 5 - FoFo Nodular - Transição Seco/Molhado.	37
Figura 39: Ensaio 1 - FoFo Vermicular a seco.	37
Figura 40: Ensaio 2 - FoFo Vermicular a seco.	38

Figura 41: Ensaio 3 - FoFo Vermicular a seco.....	38
Figura 42: Ensaio 4 - FoFo Vermicular - Molhado.....	39
Figura 43: Ensaio 5 - FoFo Vermicular - Transição Seco/Molhado.....	39
Figura 44: Coeficientes de atrito a seco e molhado dos Materiais Ensaados contra o corpo de fricção.....	41
Figura 45: Taxa de Desgaste dos Materiais Ensaados nas condições a seco e molhado.	44
Figura 46: Dureza Brinell dos Materiais Ensaados.....	46
Figura 47: Taxa de Desgaste X Coeficiente de Atrito a seco.....	47
Figura 48: Taxa de Desgaste X Coeficiente de Atrito Molhado.....	48
Figura 49: Taxa de Desgaste a seco X Dureza Brinell.....	48
Figura 50: Taxa de Desgaste - Molhado X Dureza Brinell.....	49
Figura 51: Coeficiente de Atrito a seco X Dureza Brinell	49
Figura 52: Coeficiente de Atrito Molhado X Dureza Brinell	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros dos ensaios realizados no tribômetro (<i>Drill Pipe</i>).....	29
Tabela 2: Coeficientes de atrito médio nos ensaios realizados a seco.....	41
Tabela 3: Coeficientes de atrito médio obtidos na condição molhado.....	41
Tabela 4: Comparação dos coeficientes de atrito obtidos nas diversas condições utilizando o teste de hipótese.....	42
Tabela 5: Taxa de desgaste dos ensaios realizados a seco.....	43
Tabela 6: Taxas de desgaste obtidas na condição molhado.....	43
Tabela 7: Comparação da taxa de desgaste utilizando o teste de hipótese.....	44
Tabela 8: Dureza Brinell dos Materiais Ensaados.....	46
Tabela 9: Comparação de Dureza Brinell dos Materiais Ensaados.....	47

1 INTRODUÇÃO

As competições Baja-SAE apresentam enormes desafios para estudantes de engenharia e demais cursos e levam esses estudantes a aprender a trabalhar em equipe, a sair da zona de conforto e superar os próprios limites, além de oferecer uma experiência única, e oportunidades de desenvolvimento pessoal e profissional inigualáveis.

Esse ambiente competitivo e bastante desafiador, mostra o quão importante é o estudante de engenharia buscar novos desafios, e chegar mais preparado para o mercado de trabalho.

No projeto e construção do veículo mini Baja, são utilizados componentes muito específicos que se adequam ao modelo. Muitas vezes não são encontrados componentes comerciais sendo então necessário o projeto e fabricação destes.

A utilização de componentes não comerciais tem se tornado cada vez mais comum nos veículos off-road mini Baja. Ao longo do desenvolvimento do projeto, percebemos a necessidade de um estudo mais detalhado sobre os materiais utilizados no veículo.

Neste estudo foi escolhido o sistema de frenagem e particularmente o disco de freio devido a crescente necessidade de fabricação desses componentes sob medida.

Os materiais utilizados em discos de freio têm evoluído bastante desde o surgimento do sistema de freio a disco em função da performance exigida. Atualmente os veículos de competição de alta velocidade utilizam discos confeccionados com cerâmica, fibra de carbono, carbono cerâmica e outros, mas de alto custo.

O mini Baja é um veículo de baixa velocidade e que as exigências de frenagem não são comparáveis aos veículos de competição de alta velocidade. Além do mais o orçamento da equipe é bem limitado. Desse modo os materiais escolhidos para o estudo são o aço ABNT 1020, um ferro fundido nodular ferrítico e um ferro fundido cinzento vermicular que são tradicionalmente usados em discos de freio de veículos leves.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS DE FRENAGEM POR DISCO

2.1.1 Freio a Disco

O primeiro freio a disco foi inventado por Browett & Harrison para bicicletas em 1876, e que foi mais tarde “reinventado” pelo inglês Frederick Lanchester em 1902, equipando em 1910 o Lanchester 20 HP, o primeiro automóvel com freio a disco traseiro.

Os freios a disco entraram em produção seriada de automóveis na Europa a partir 1955, e nos Estados Unidos a partir de 1960.

Um fato bastante curioso ocorrido nos Estados Unidos no início dos anos 60, é que os primeiros carros equipados com freios a disco vinham com um aviso colocado na parte traseira do veículo que dizia; “*Warning - Disc Brakes*” (Cuidado – Freio a Disco). Essa sinalização informava que aquele veículo era equipado com um novo sistema de freios que poderia parar muito mais rapidamente do que os veículos que não o possuíam.

Muitos automóveis atualmente equipados com freios a disco podem possuir discos ventilados ou não. Os discos ventilados permitem que o ar passe através das aletas construídas especialmente para essa finalidade, propiciando uma refrigeração mais rápida do sistema.

Freios a disco são sistemas construtivamente mais simples que os freios a tambor, uma vez que além de utilizarem menos componentes para montagem, possuem melhores performances do que os freios a tambor, melhor resposta de frenagem, um sistema de auto-ajuste bem dimensionado, menor propensão ao *fade* (vitrificação) do material de fricção uma vez que possuem maior grau de recuperação térmica, pois dissipam mais rapidamente o calor para o ambiente em função de serem sistemas abertos.

Os freios a disco são comumente produzidos em ferro fundido nodular e alguns até mesmo em alumínio. Os materiais utilizados para a produção de um freio a disco possuem enorme importância, e o alto módulo de elasticidade é fundamental para que durante a utilização do freio não haja deformações e flexões, o que resultaria em perda de eficiência de frenagem.

Basicamente podemos encontrar duas configurações construtivas de freios a disco atuados hidraulicamente, o freio a disco fixo e o freio a disco flutuante.

2.1.1.1 Freio a Disco Fixo

A Figura 1 mostra a forma construtiva da pinça de freio fixa e a forma como o fluido percorre seu interior.

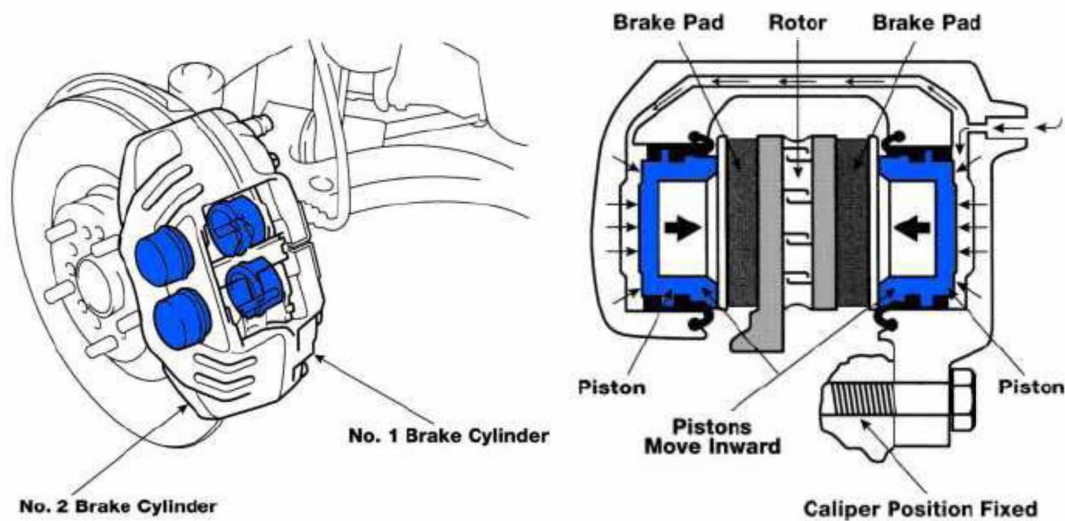


Figura 1: Pinça de freio do Tipo Fixa. (Fonte: Ebah)

Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAFYIIAA/freios?part=3>>. Acesso em março 2017.

No tipo de freio a disco com pinça fixa são exigidos dois pistões de acionamento das pastilhas contra o disco (uma de cada lado). Neste, há uma interligação do circuito de óleo através da carcaça de modo a equalizar a pressão em ambos os pistões. Esse sistema de pinça fixa é mais complexo e caro em relação ao sistema de pinça flutuante. Outro problema técnico que o sistema apresenta é o fato de gerar mais calor e menor dissipação. Como vantagem utiliza menor volume de fluido de freio e apresenta melhor eficiência comparativamente ao sistema de pinça flutuante e por esse motivo é mais utilizado em veículos de alta performance.

2.1.1.2 Freio a Disco Flutuante

A Figura 2 mostra a forma construtiva da pinça de freio flutuante, e a forma como o fluido percorre seu interior.

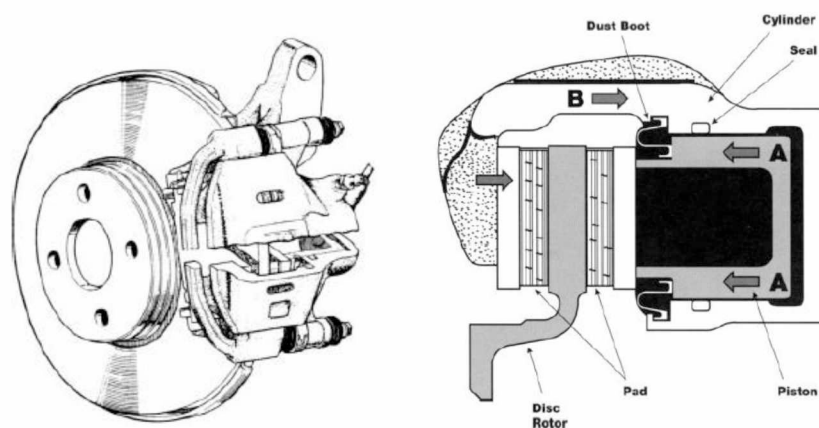


Figura 2: Pinça de freio do Tipo Flutuante. (Fonte: Ebah)

Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAFYIIAA/freios?part=3>>. Acesso em março 2017.

O desenho construtivo da pinça flutuante permite que ele seja mais leve e econômico, requerendo assim um menor número de peças para a sua montagem e funcionalidade. A pinça flutuante não é uma estrutura rígida, mas desliza para frente e para trás sobre buchas ou pinos, e uma grande vantagem desse princípio é que um mínimo de *runout* (desalinhamento do eixo) do disco de freio será compensado pela flutuação característica da ponte sem criar nenhuma instabilidade. Seu design permite uma sangria do sistema mais fácil, porém requer mais volume de fluido de freio em função do tamanho do pistão, e mais pressão de linha para efetuar o trabalho de reação da ponte.

Dependendo da aplicação requerida, a pinça flutuante pode ser equipada com dois pistões. O pistão, que é localizado em apenas um lado da pinça (lado interno da roda), recebe a pressão hidráulica de linha, originando assim a força de aplicação sobre a pastilha interna. Assim que a pastilha interna toca o disco, por reação da ponte (reação à força aplicada pelo pistão), faz com que a pastilha externa entre também em contato com o disco de freio. Esse freio utiliza o recurso de molas de fixação da pastilha interna e mola estabilizadora, que propiciam um funcionamento seguro e silencioso, impedindo assim a geração do efeito “*Rattle*”, que consiste na batida da pastilha de freio na pinça quando o veículo trafega em pisos irregulares.

2.1.2 Discos de Freio

É um disco plano que propicia a superfície de atrito necessária para um freio a disco efetuar seu trabalho. Quando a pressão hidráulica é aplicada aos pistões da pinça, as pastilhas de freio são pressionadas contra ambos os lados do disco de freio ocasionando através desse par de contato, a redução de sua rotação através do atrito, e consequente geração de calor.

Os discos de freios possuem várias configurações construtivas e de acabamento, tais como o disco sólido, o disco ventilado, o disco perfurado, o disco ranhurado, e finalmente uma combinação dos últimos três.

2.1.2.1 Disco de Freio Sólido

São os que dissipam menos calor, e normalmente equipam veículos pequenos com baixa potência de motor. Na Figura 3, podemos ver o disco de freio sólido.



Figura 3: Disco de freio sólido. (Fonte: Apostila - Introdução a freios automotivos – UNICAMP)

2.1.2.2 Disco de Freio Ventilado

Foram desenvolvidos para melhor dissipar o calor gerado pelo atrito e são comumente utilizados em veículos com maior potência de motor. Os discos ventilados são na realidade duplos com aletas ligando as duas partes de modo permitir a entrada de ar e promover uma dissipação de calor mais eficiente em relação ao disco sólido. Na Figura 4, podemos ver o disco de freio ventilado, bem como sua diferença construtiva em relação ao disco sólido.



Figura 4: Disco de freio ventilado. (Apostila - *Introdução a freios automotivos* – UNICAMP)

2.1.2.3 Disco de Freio Perfurado

Durante o processo de frenagem, em virtude do atrito entre as pastilhas e o disco, é gerado muito calor principalmente nos veículos de alta performance. Para minimizar o problema foram introduzidos furos no disco para auxiliar na dissipação de calor e também na eliminação dos gases gerados que prejudicam a frenagem. Essa solução começou a ser utilizada em carros de corrida a partir dos anos 1960, mas provoca também um maior desgaste nas pastilhas de freio o que desencadeou o desenvolvimento de novas pastilhas com resinas mais termo estáveis. Os furos podem melhorar a frenagem mas podem por outro lado aumentar o stress mecânico. Na Figura 5, podemos ver o disco de freio perfurado.



Figura 5: Disco de freio perfurado. (Fonte: Apostila - *Introdução a freios automotivos* – UNICAMP)

2.1.2.4 Disco de Freio Ranhurado

Possuem grande aplicação em veículos de alta performance. As ranhuras superficiais permitem que o calor gerado durante a frenagem seja dissipado rapidamente, pois constantemente ocorre uma limpeza da superfície, devido a renovação das condições superficiais do disco e eliminação dos gases gerados pelas altas temperaturas nessa superfície. Não é usado em veículos de serie devido ao desgaste acelerado Na Figura 6, podemos ver o disco de freio ranhurado.



Figura 6: Disco de freio ranhurado. (Fonte: *Fundamentos de freios e seus componentes*)

Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/21549177/br---fundamentos-de-freios-e-seus-componentes-2>>. Acesso em abril 2017

2.1.2.5 Disco de Freio Ventilado-Perfurado-Ranhurado

Reúne as características dos três tipos em um só, ou seja, apresentam ótima dissipação de calor, e são utilizados em veículos de alta performance. Na Figura 7, podemos ver o disco de freio ventilado-perfurado-ranhurado.



Figura 7: Disco de freio ventilado-perfurado-ranhurado. (Fonte: *Fundamentos de freios e seus componentes*)

Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/21549177/br---fundamentos-de-freios-e-seus-componentes-2>>. Acesso em abril 2017

2.1.3 Composição básica do disco de freio:

Os discos de freio atuais são produzidos em ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular, e até mesmo em ferro fundido vermicular.

Em testes feitos por fabricantes de freios em veículos de 1300 kg com os materiais citados, em condições de frenagem de 140 Km/h até a parada total com uma desaceleração de 60%g, apresentaram altas temperaturas em curtos intervalos de tempo podendo chegar até 800°C na superfície, o que gera uma potência de 152 kW. Desta forma, as variações bruscas de temperatura provocam um gradiente térmico significativo da superfície do disco para o seu interior. Os materiais utilizados para confecção dos discos de freio, devem ser resistentes à fadiga térmica, apresentar boa resistência mecânica, ser de fácil fundição e usinagem para que tenham um baixo custo além de proporcionar frenagens eficientes.

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DOS DISCOS

A caracterização dos materiais é imprescindível porque a eficiência do freio é influenciada pelo material de fabricação dos discos e também pela sua microestrutura. Uma técnica de caracterização eficiente e barata é a metalografia.

3.1 METALOGRAFIA

A metalografia, um dos principais ramos da metalurgia física, estuda a constituição, a estrutura e a textura dos metais. A observação das estruturas metálicas é de importância considerável tanto para os engenheiros, como para os pesquisadores e estudantes. É necessário ressaltar que tão-somente a análise química não permite concluir sobre as propriedades mecânicas e físicas de uma liga metálica, e que a metalografia preenche, pelo menos em grande parte, essa lacuna.

3.1.1 Exame Metalográfico

O exame metalográfico encara o metal sob o ponto de vista de sua estrutura, procurando relacioná-la às propriedades físicas, composição, processo de fabricação, etc., de modo a poder esclarecer, ou prever seu comportamento numa determinada aplicação. O exame metalográfico pode ser feito à vista desarmada (exame macrográfico) ou com o auxílio de um microscópio (exame micrográfico). Esses exames são feitos em secções do material, polidas e atacadas com reativos adequados.

Em síntese, o exame metalográfico fornece dados sobre a microestrutura e como o material ou peça foram fabricados e também sobre sua homogeneidade.

A micrografia estuda os produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, visando à determinação de seus constituintes e de sua textura. Este estudo é feito em superfícies previamente polidas e, em geral, atacadas por um reativo adequado. O exame micrográfico é importante devido ao fato de as propriedades mecânicas de um metal dependerem não só da sua composição química como da sua microestrutura. Com efeito, um mesmo aço pode tornar-se mole, duro, duríssimo, quebradiço, elástico, tenaz, etc., conforme a microestrutura que apresentar e que lhe pode ser dada por meio de trabalhos mecânicos ou tratamentos térmicos adequados. Se por um lado, a análise química revela a composição do metal, os exames macro e micrográficos fornecem precisas informações sobre como o metal adquiriu as propriedades que apresenta. (COLPAERT, 1974). Informações deste gênero são extremamente importantes para os fabricantes, para o controle e melhoria de seus produtos, e na orientação a seguir para a fabricação de peças de qualidade.

Através das análises macrográficas e das análises micrográficas é possível a determinação de diversas características do material, inclusive a determinação das causas de fraturas, desgastes prematuros e outros tipos de falhas.

4 DESGASTE

No estudo do desgaste, a maneira que produz os melhores resultados é a realização de ensaios nas reais condições de uso. Essa forma é muito cara e a realização de ensaios de bancada que reproduzam aproximadamente as condições reais, economizam tempo e dinheiro no sentido de que os melhores resultados são os que deverão ser submetidos a ensaios reais.

4.1 ENSAIOS DE DESGASTE POR DESLIZAMENTO

O desgaste por deslizamento é o que acontece nos sistemas de freio porque ocorre a fricção de duas superfícies animadas de movimento relativo, ou seja, o deslizamento.

Antes de abordarmos os ensaios de desgaste por deslizamento, devemos entender primeiramente quais os tipos de contato podem ocorrer.

4.2 TIPOS DE CONTATO E DESGASTE POR DESLIZAMENTO

A resistência ao desgaste não é uma propriedade intrínseca do material e sim do tribossistema, ou seja, o desgaste depende das propriedades do material, das características do projeto, das condições operacionais e dos abrasivos. Neste sentido, algumas considerações devem ser feitas a respeito do contato entre duas superfícies como por exemplo as geometrias de contato como mostrado na Figura 8.

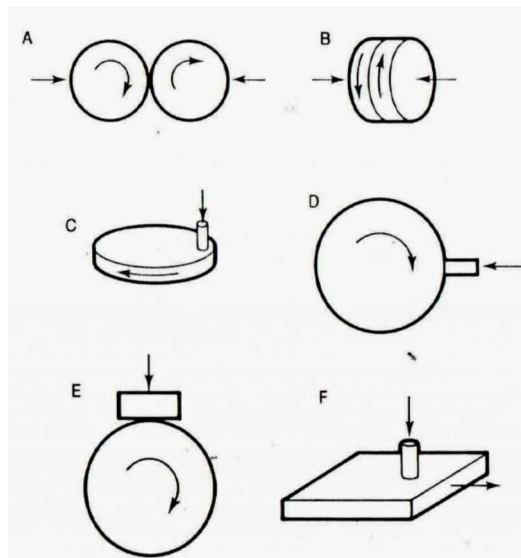


Figura 8: Geometrias utilizadas nos ensaios por deslizamento. (Fonte: HUTCHINGS, 1992, p.7)

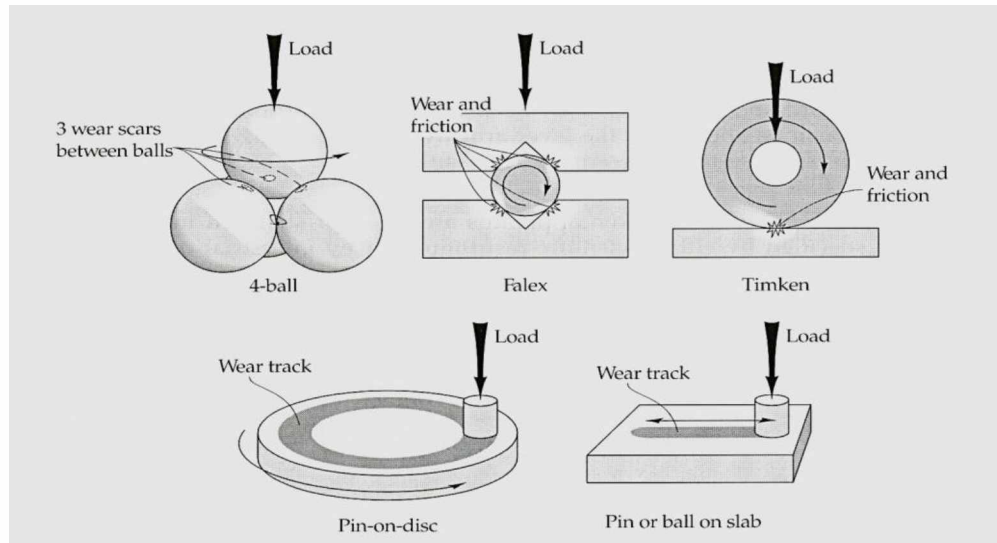


Figura 9: Esquema ilustrativo de amostras a seco ou parcialmente lubrificadas no ensaio por deslizamento. (Fonte: ANDREW, 2004, p.27)

O contato de duas superfícies ocorre entre as asperezas. A área total de contato, soma das áreas destas asperezas, é proporcional à carga normal e, nos metais, as asperezas sofrerão deformação plástica.

O deslizamento contínuo leva à formação e destruição de asperezas e a formação de fragmentos de material que se soltam (princípio do desgaste). Na Figura 10, podemos ver a evolução do contato entre duas asperezas que se movem uma sobre a outra.

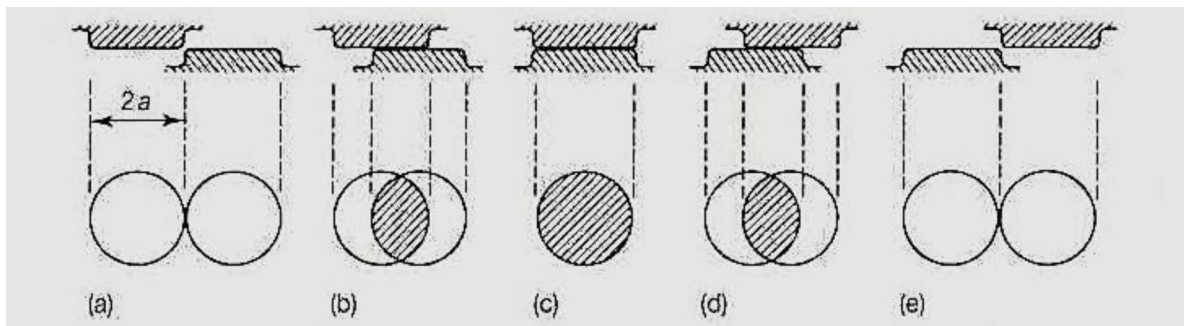


Figura 10: Diagrama esquemático mostrando a evolução de um único trecho de contato quando as duas asperezas se movem uma sobre a outra. (Fonte: HUTCHINGS, 1992, p.83)

Além do mais, o contato direto entre metais, dependendo da velocidade pode provocar oxidação e/ou formação de partículas na interface de desgaste interferindo sobremaneira no comportamento tribológico.

No caso de sistemas de freios, o excessivo calor gerado pode provocar o fenômeno de fading que nada mais é do que a vitrificação das pastilhas ou das lonas de freio, provocando alterações sensíveis no desempenho da frenagem.

5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

5.1 CARACTERIZAÇÃO METALGRÁFICA

5.1.1 Preparação da amostra para análise metalográfica

A preparação da amostra foi feita usando o procedimento operacional padronizado (POP), para garantir confiabilidade e a reprodutividade dos resultados.

5.1.2 Procedimentos

5.1.2.1 Corte da amostra:

Foi utilizada a serra de corte, Figura 11, para obtenção de uma amostra do material, utilizando fluido de corte para não causar alterações nas propriedades do material.



Figura 11: Serra de corte

5.1.2.2 Embutimento

As respectivas amostras obtidas foram embutidas para facilitar o manuseio nas etapas seguintes.



Figura 12: Amostra embutida.

5.1.2.3 Lixamento

As amostras foram embutidas em baquelite, Figura 12, lixadas sequencialmente com lixas d'água de granulometrias #400, #600 e #1200 mesh, utilizando uma lixadeira rotativa, com operações de limpeza pra retirar fragmentos de desgaste e giradas de 90° quando da passagem de uma lixa para outra.

5.1.2.4 Limpeza da amostra

Após o término do lixamento com a lixa #1200, cada amostra foi lavada com água, secada e lavada novamente com álcool sob ultra som para a retirada de eventuais partículas deixadas pelo lixamento. A Figura 13 mostra o equipamento de limpeza ultrassonora Mini Som, utilizado.



Figura 13: Mini-som.

5.1.2.5 Polimento

Após as operações de lixamento, as amostras foram polidas utilizando-se uma politriz, Figura 14, e pastas de diamante com as granulometrias: 9 μm , 6 μm , 3 μm e 1 μm e sílica coloidal com 0,04 μm , cada abrasivo de polimento com o seu respectivo pano. Após cada operação de polimento, as amostras foram lavadas em banho de ultrassom e também ao final.



Figura 14: Politriz.

5.1.2.6 Revelação da Microestrutura

Para a revelação das microestruturas, as amostras foram atacadas por imersão com o reativo Nital 2%, por 10 segundos. Os ataques químicos foram interrompidos por água corrente, em seguida lavadas com álcool e secadas com jato de ar quente.

5.1.2.7 Aquisição de imagem

Após o ataque químico, as amostras foram observadas ao microscópio ótico e com uma câmera digital acoplada e através de um software de aquisição de imagens, foram obtidas as respectivas microestruturas.

5.1.2.8 Armazenamento das Amostras

Para evitar oxidação das superfícies para eventual observação microscópica posterior, as amostras foram armazenadas em um dessecador a vácuo, Figura 15.



Figura 15: Dessecador à vácuo.

5.2 ENSAIOS ABRASOMÉTRICOS

Considerando que a configuração de desgaste envolvendo a pastilha de freio e o disco é o deslizamento de uma superfície sobre outra, foi escolhido como tribômetro para a realização dos ensaios abrasométricos o abrasômetro denominado *Drill Pipe*, desenvolvido e construído pelo LTAD, Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste que promove exatamente o movimento relativo de duas superfícies sob contato. Vale ressaltar que a posição da pinça e do disco no veículo é vertical e nos ensaios realizados no equipamento *Drill Pipe* a posição do corpo e contra corpo é horizontal.

5.2.1 Ensaio *Drill Pipe*

A Figura 16, mostra o tribomêtro (*Drill Pipe*) que foi utilizado para realizar os ensaios de deslizamento entre o material da pastilha de freio e os materiais estudados, para obter os

respectivos coeficientes de atrito dos materiais, submetidos as diferentes condições de funcionamento.

Este tribomêtro possui uma base fixa, onde tem uma haste que é colocado os pesos (A) que pressiona o contra corpo de fricção (B) contra a superfície do corpo de prova (C). O corpo de prova é fixado no porta amostra (D) sobre uma base que realiza o movimento de deslizamento alternado através de um sistema biela-manivela (E) acionado por um moto redutor elétrico (F) com controle de velocidade e ajuste da amplitude do movimento de translação. A célula de carga (G) mede as forças de translação.

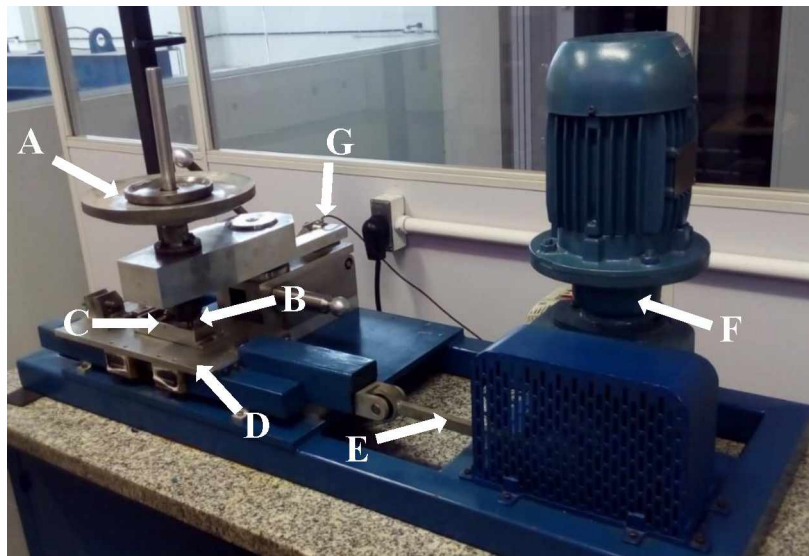


Figura 16: Máquina de ensaio por deslizamento - *Drill Pipe*.

Em um microcomputador dedicado são inseridos a força normal e o tempo de ensaio. Durante o ensaio são registrados num arquivo .txt a carga normal, as forças tangenciais obtidas da célula de carga e calculados os coeficientes de atrito.

5.2.2 Confeção dos corpos de prova e contra corpo de fricção

Os corpos de prova utilizados nos ensaios, foram padronizados, conforme a Figura 17 e confeccionados com os seguintes materiais: Aço ABNT 1020 extraído de um disco de freio usado do mini Baja denominado doravante de Aço ABNT 1020 - Baja, Aço ABNT 1020 (extraído de uma chapa), Ferro Fundido Vermicular e Ferro Fundido Nodular.



Figura 17: Dimensões dos corpos de prova.

O contra corpo de fricção dos ensaios abrasométricos foi colado em um pino de Aço ABNT 1020, por uma empresa especializada em recondicionamento de discos de embreagem e pastilhas de freio fora de padrão. A Figura 18 mostra um pino com a pastilha colada.



Figura 18: Dimensões contra corpo de fricção.

Para estabelecer uma condição igual para todos ensaios, os corpos de prova, antes de serem realizados os ensaios de desgaste, foram retificados em ambos lados, para garantir que as superfícies estejam paralelas entre si e a superfície do material de fricção foi condicionada com uma lixa #400 mesh colocada entre o corpo de prova e o contra corpo de fricção com a superfície abrasiva voltada para o segundo e realizando ciclos de deslizamento até o completo assentamento.

5.2.3 Cálculo da Força de Frenagem no Ensaio

Para o cálculo da força de frenagem do Ensaio *Drill Pipe*, recorremos aos dados calculados no dimensionamento do sistema de freio do mini Baja, presente no Relatório de Projeto da Equipe Cerrado 2015-1 mostrado no Apêndice.

Conforme mostrado no Apêndice, obteve-se uma pressão aplicada nas duas pastilhas de freio de $P = 1.365.173,23 \text{ Pa}$. A pressão exercida em apenas uma pastilha = 682.586 Pa .

Os ensaios foram utilizados com um contra corpo de fricção com $\varnothing 10 \text{ mm}$, de modo que com a área desse contra corpo de fricção, foi obtida a força de atuação equivalente ao freio do mini Baja $F = 53,61 \text{ N}$.

Para a realização dos ensaios em condições mais severas aplicou-se $F = 70,952 \text{ N} = 7,24 \text{ kgf}$.

5.2.4 Avaliação do desgaste

Após o condicionamento das superfícies de contato, os corpos de prova foram limpos com álcool, secos com ar quente, pesados em balança analítica para obtenção das massas e realizados os ensaios de desgaste. Os corpos de prova foram novamente lavados com álcool, secos e pesados para obtenção das perdas de massa, utilizando-se uma balança analítica, como mostrada na Figura 19.



Figura 19: Balança analítica.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultados do trabalho são apresentadas as caracterizações dos materiais através de suas micrografias, os resultados dos ensaios abrasométricos *Drill Pipe* (coeficientes de atrito e taxas de desgaste), dureza e correlações entre as propriedades obtidas.

6.1 MICROGRAFIAS

As micrografias foram obtidas segundo os procedimentos descritos anteriormente (5.1 Caracterização Metalográfica) e os resultados apresentados a seguir.

A Figura 20 mostra a micrografia do Aço ABNT 1020 - Baja. Percebe-se que a microestrutura é composta por perlita fina e ferrita, e possui orientação, devido à laminação.

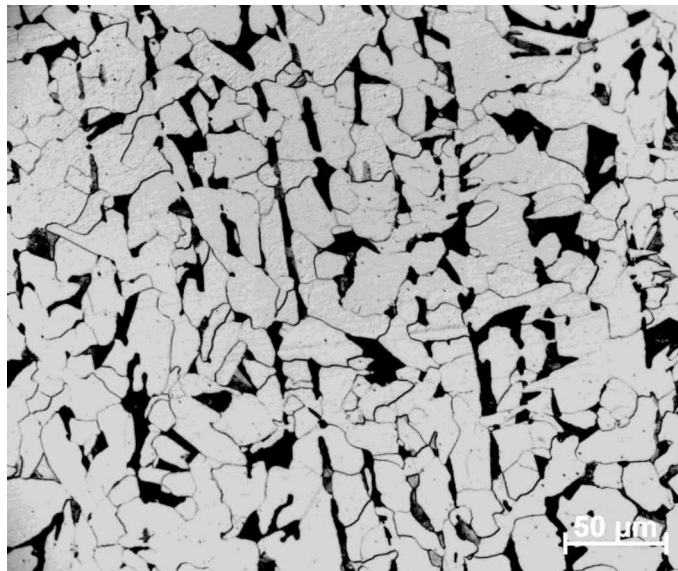


Figura 20: Microestrutura obtida do Aço ABNT 1020 - Baja após ataque: Nital: 2%.

A Figura 21 mostra a micrografia do Aço ABNT 1020 onde se vê a microestrutura formada por perlita fina e ferrita. Não se nota orientação da microestrutura.

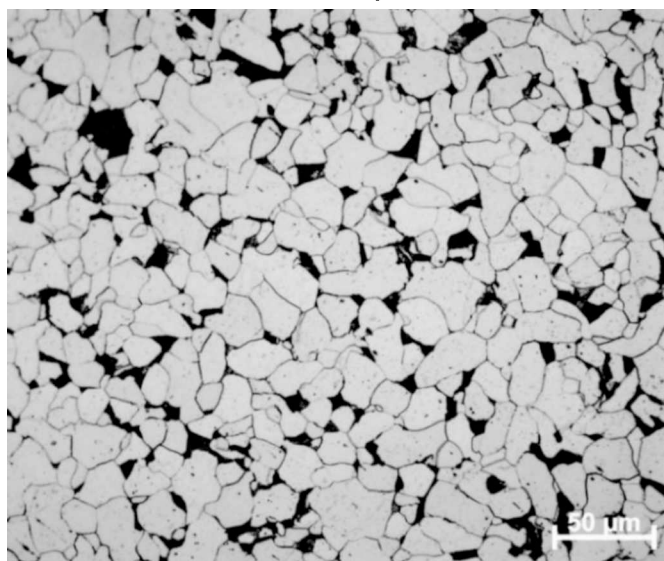


Figura 21: Microestrutura obtida do Aço ABNT 1020 após ataque: Nital: 2%.

A Figura 22 mostra a microestrutura do Ferro Fundido Nodular Ferrítico, com destaque para os nódulos arredondados e compactos de grafita inclusos numa matriz ferrítica.

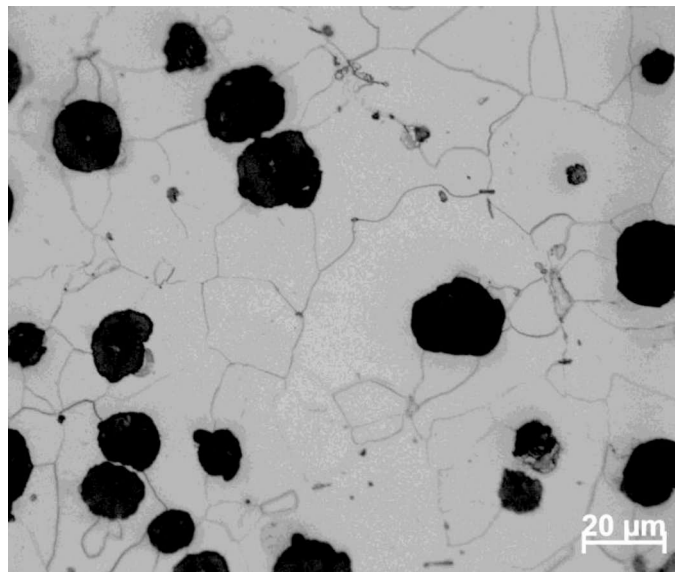


Figura 22: Microestrutura obtida do FoFo Nodular Ferrítico após ataque: Nital: 2%.

A Figura 23 mostra a microestrutura do Ferro Fundido Vermicular. A matriz é perlítica com veios fragmentados de grafita.

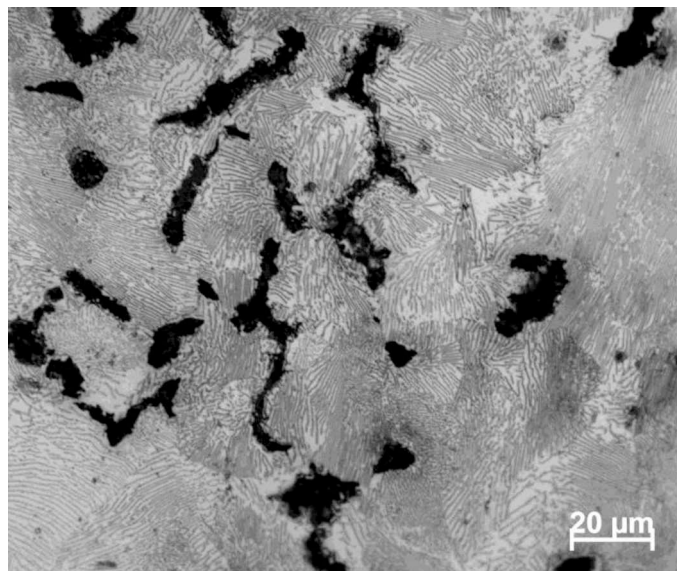


Figura 23: Microestrutura obtida do FoFo Vermicular após ataque: Nital: 2%.

6.2 ENSAIOS ABRASOMÉTRICOS

Os ensaios abrasométricos foram realizados no abrasômetro *Drill Pipe*, a seco e molhado e também na condição seco com transição para molhado.

Ensaio a Seco: realizado por uma hora sendo os primeiros 20 minutos considerados para ajuste da superfície do contra corpo de fricção à superfície do corpo de prova e os 40 minutos restantes considerados como o ensaio em si.

Ensaio Molhado: realizado com o corpo de prova submerso em água e o tempo de ensaio como na condição a Ensaio a Seco.

Ensaio com transição da condição a seco para a condição molhado, realizado em duas etapas em sequência sem interrupção da seguinte maneira: primeira etapa a seco como na condição Ensaio a Seco sendo que ao término de uma hora foi adicionado água e continuado o ensaio como na condição Ensaio Molhado.

No trabalho foram realizados três ensaios a seco, um ensaio molhado e um ensaio de transição seco para molhado para cada material. A Tabela 1 sumariza os parâmetros dos ensaios realizados.

Tabela 1: Parâmetros dos ensaios realizados no tribômetro (*Drill Pipe*).

Força Normal: 7,24 Kg	Amplitude: 100 mm
Velocidade: 10,00 mm/s	Tempos: Ensaio a Seco - 60 minutos, Ensaio Molhado - 60 minutos e Ensaio Seco + Molhado - 120 minutos

6.2.1 Coeficientes de Atrito

O abrasômetro *Drill Pipe* é equipado com uma célula de carga bidirecional que permite o registro das forças tangenciais nos movimentos de ida e de volta, a força normal é aplicada através de peso morto, de modo permitir o cálculo do coeficiente de atrito.

Os coeficientes de atrito são calculados diretamente pelo computador acoplado ao abrasômetro, utilizando a força normal aplicada (N) (parâmetro de entrada) e as forças tangenciais (F_{at}) adquiridas a cada instante

Cálculo do coeficiente de atrito:

$$\mu = F_{at} / N$$

Onde:

μ : coeficiente de atrito (adimensional)

F_{at} : Força de atrito (N)

N: Força normal (N)

As Figuras 24 a 43 mostram os coeficientes de atrito obtidos durante os ensaios abrasométricos, realizados nas condições mostradas na Tabela 1.

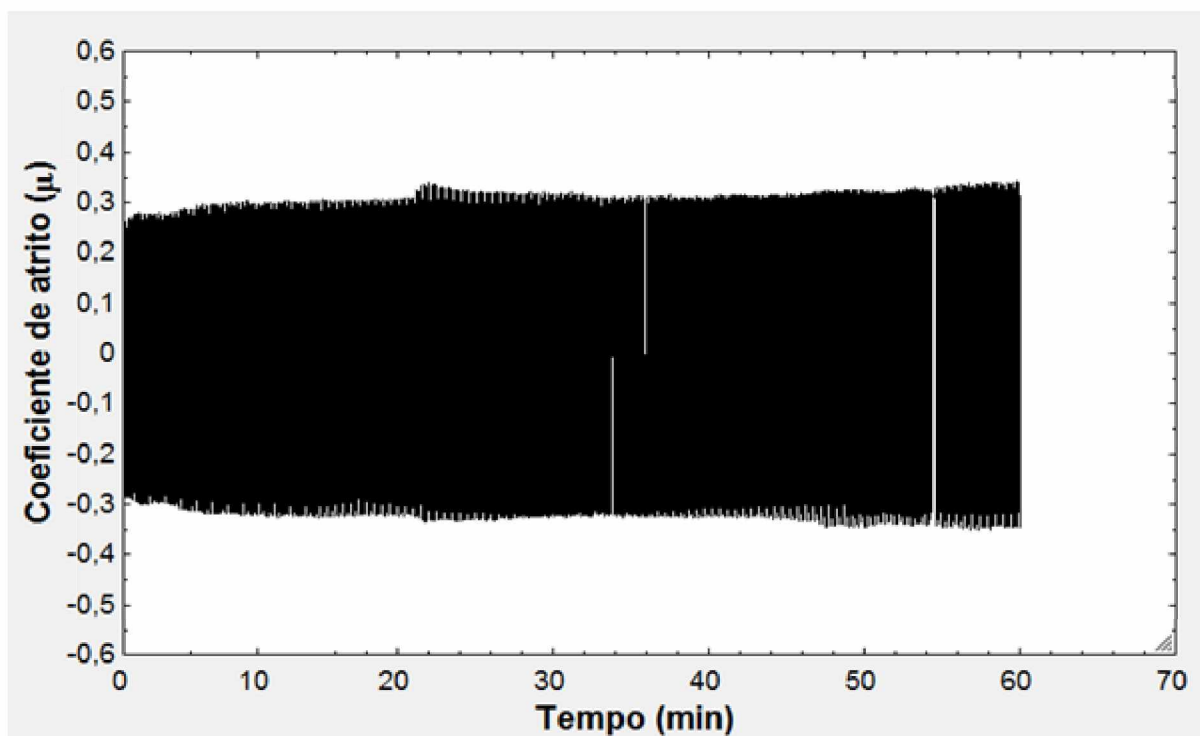


Figura 24: Ensaio 1 - Aço ABNT 1020 a seco.

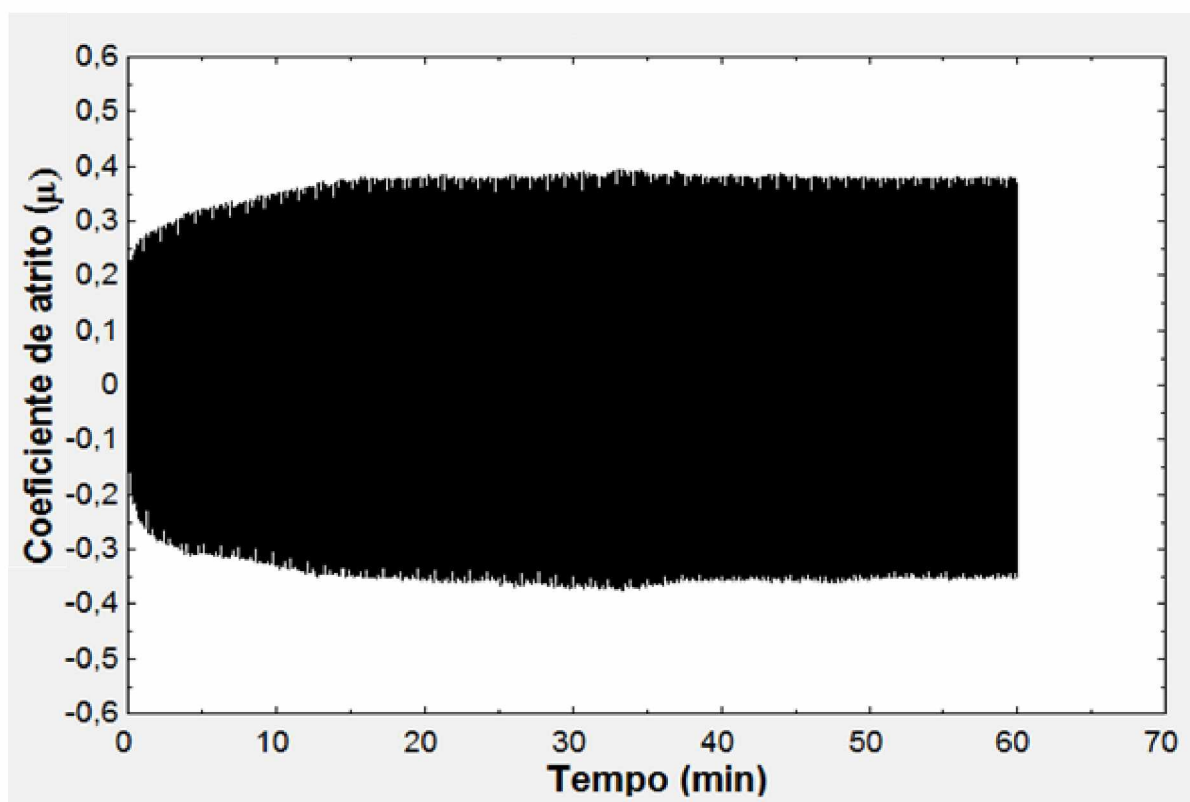


Figura 25: Ensaio 2 - Aço ABNT 1020 a seco.

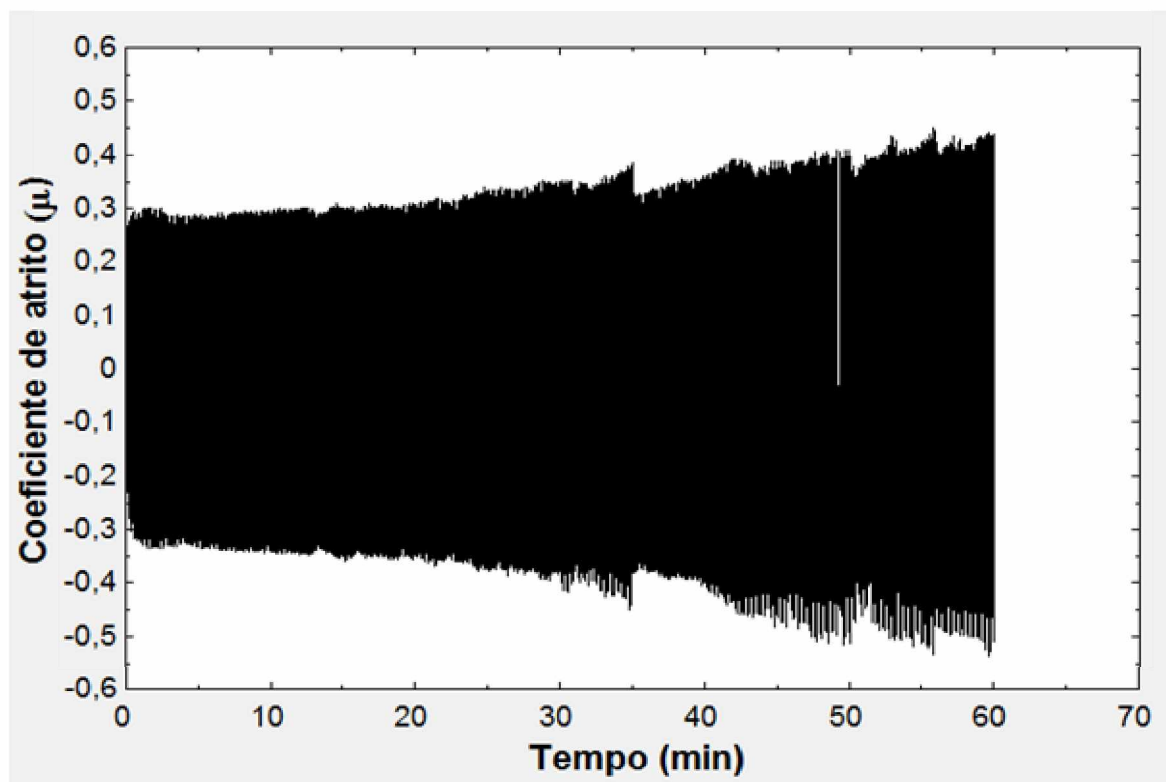


Figura 26: Ensaio 3 - Aço ABNT 1020 a seco.

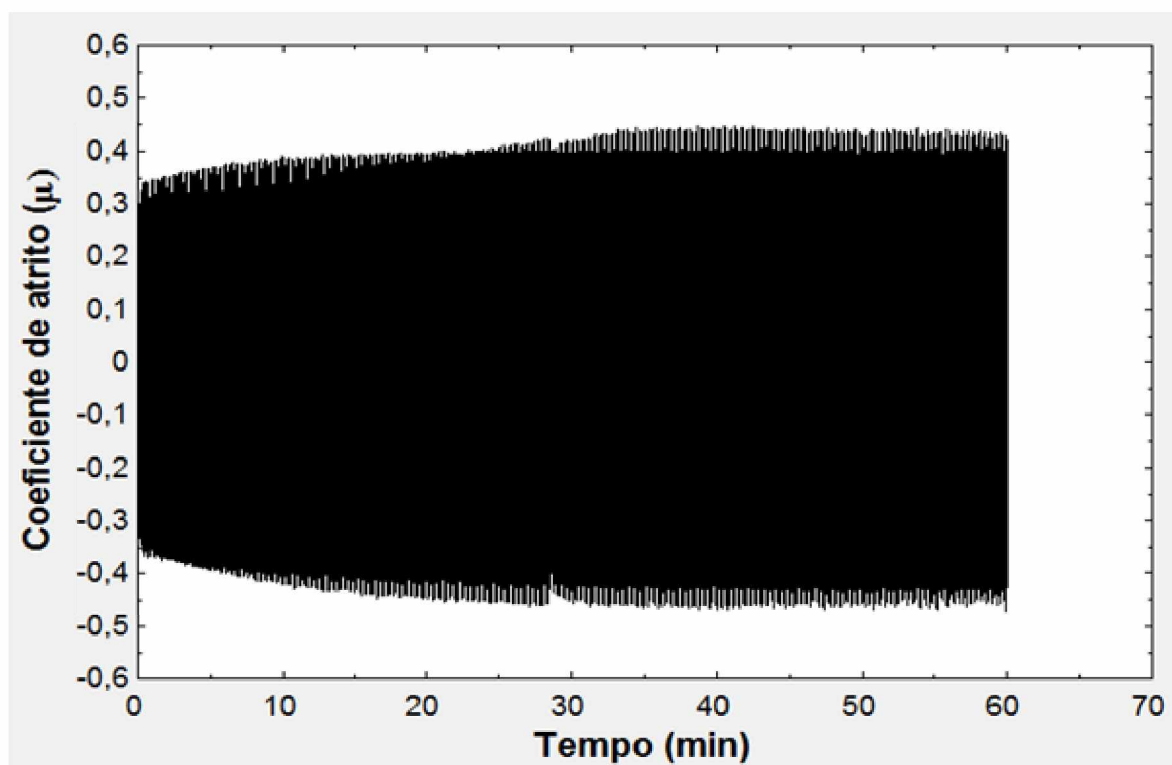


Figura 27: Ensaio 4 - Aço ABNT 1020 - Molhado.

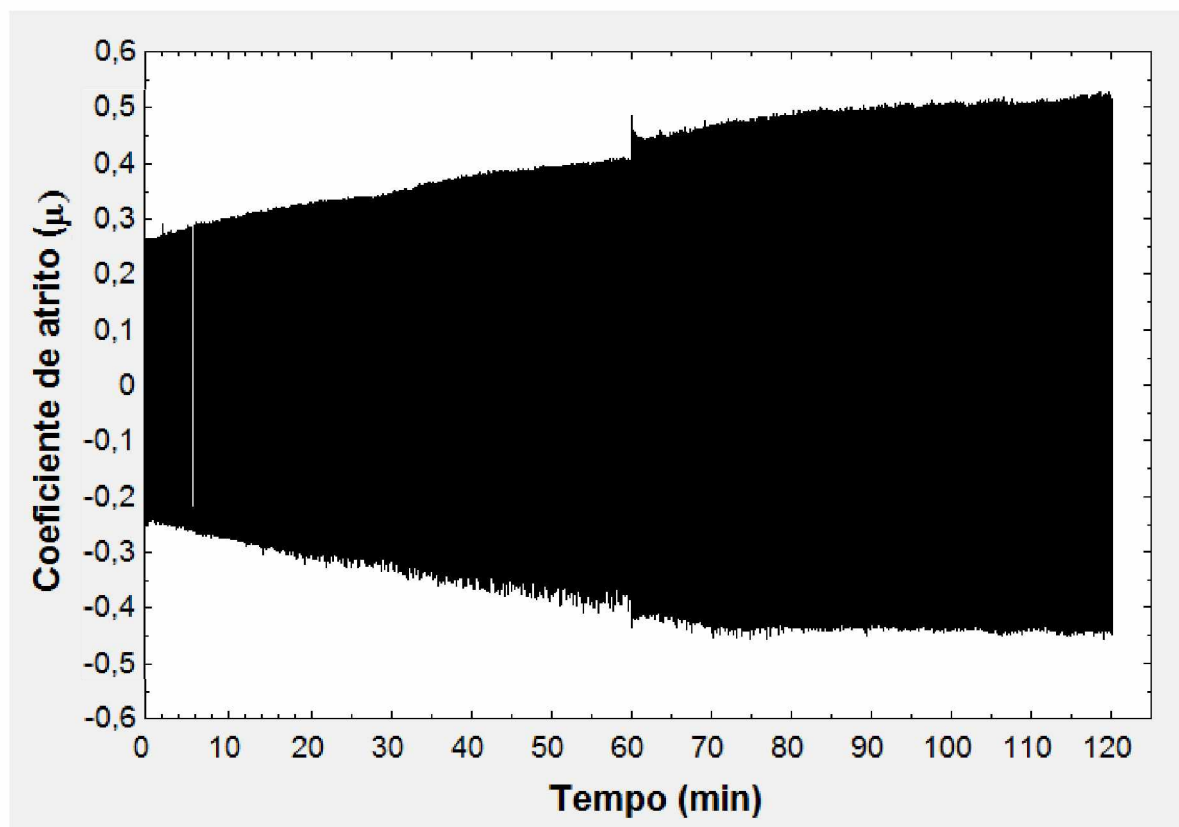


Figura 28: Ensaio 5 - Aço ABNT 1020 - Transição Seco/Molhado.

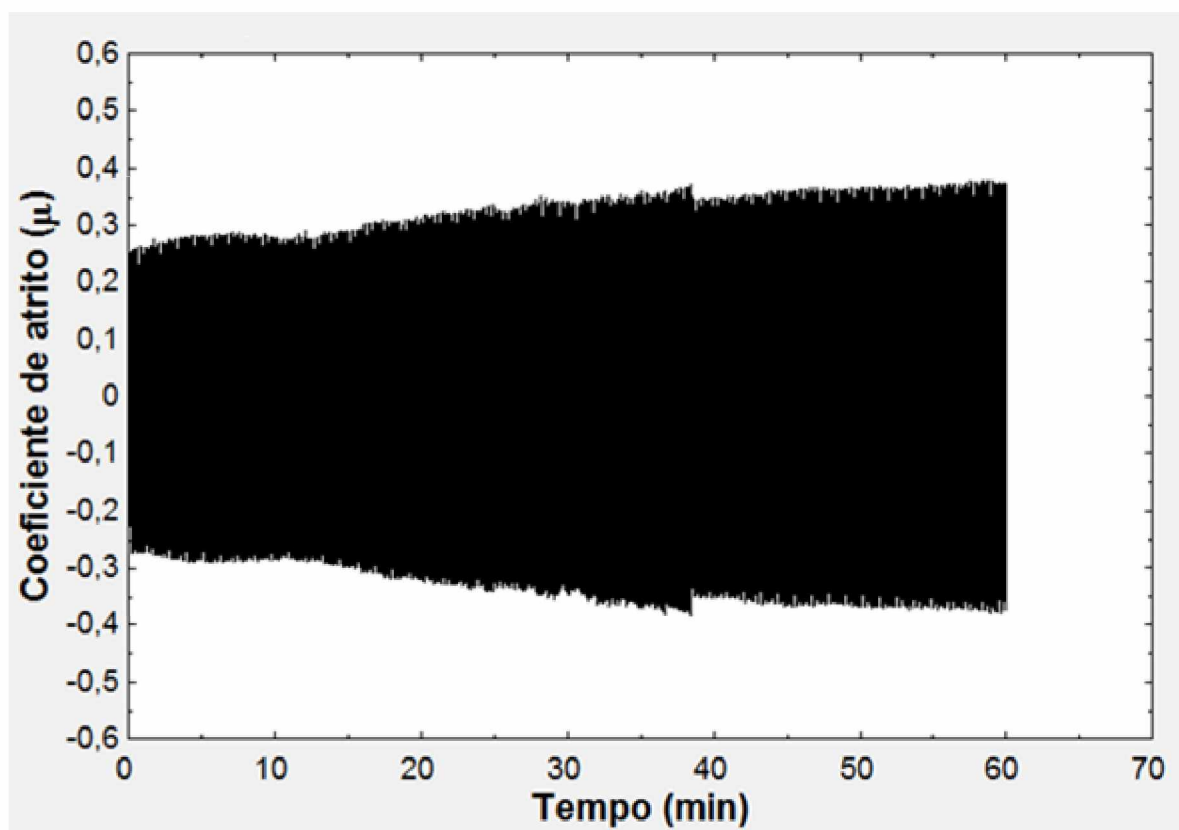


Figura 29: Ensaio 1 - Aço ABNT 1020 - Baja a seco.

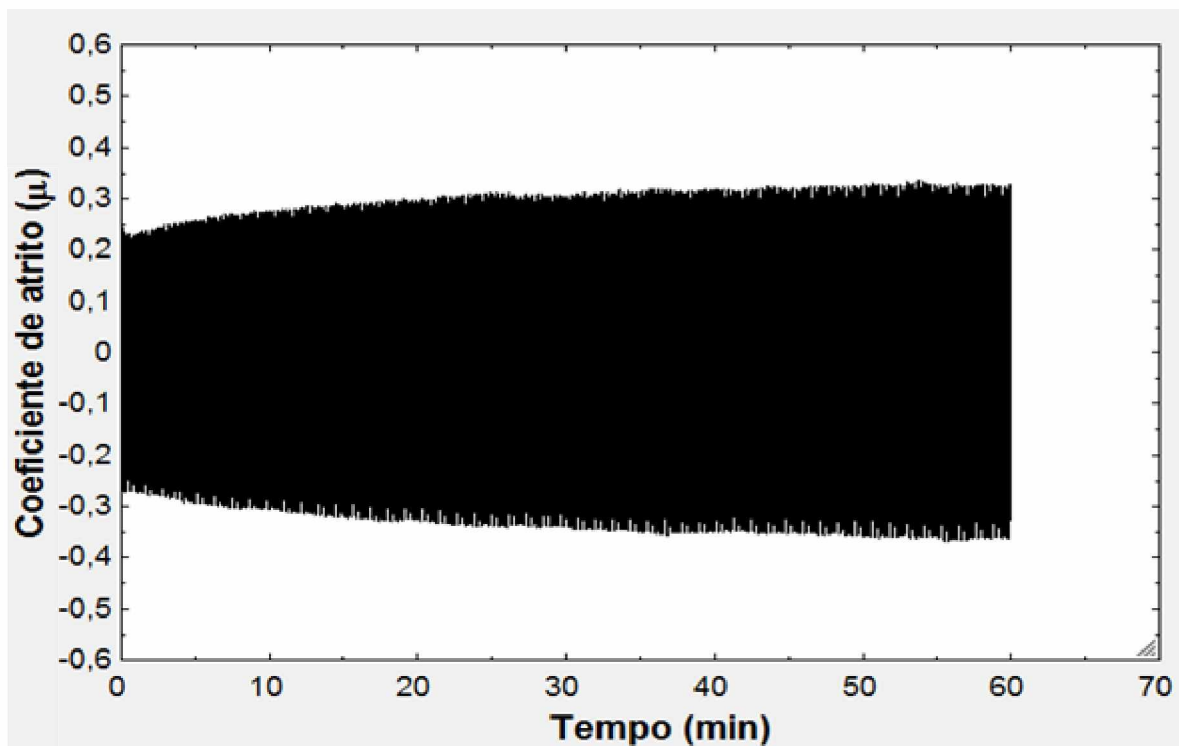


Figura 30: Ensaio 2 - Aço ABNT 1020 - Baja a seco.

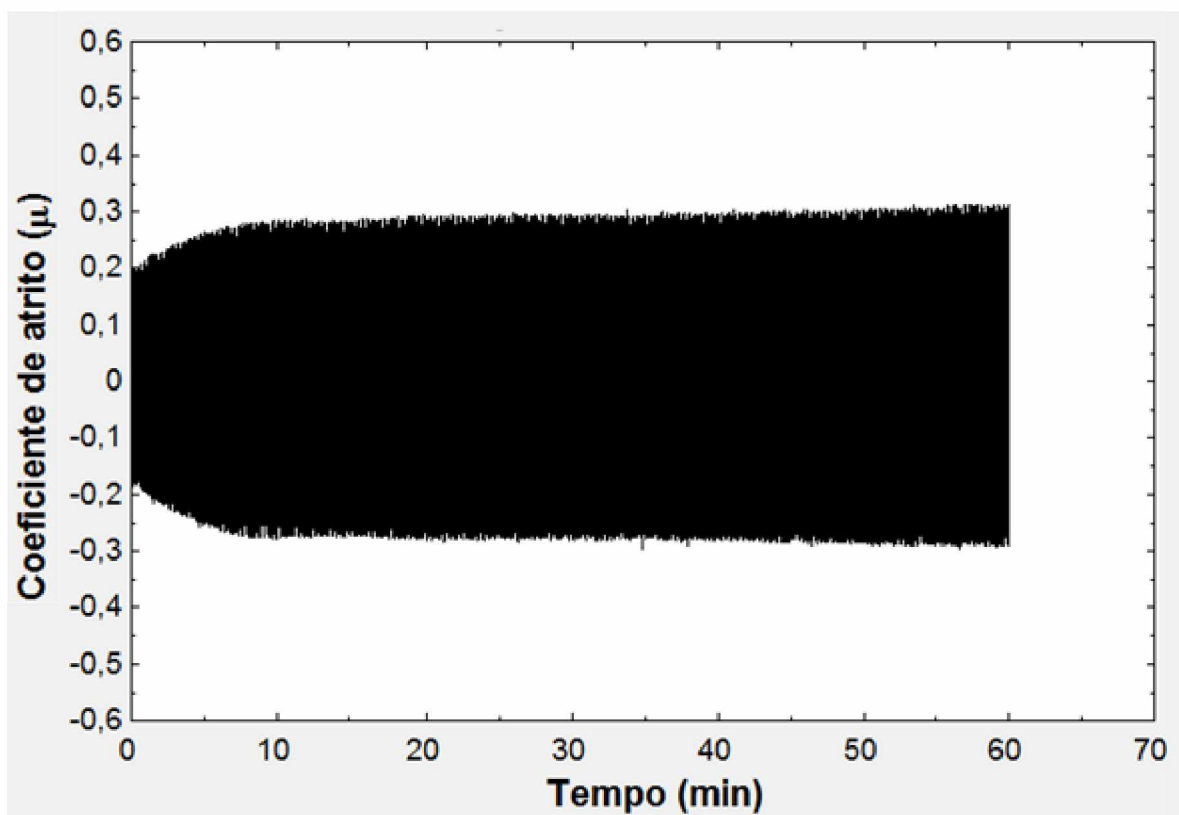


Figura 31: Ensaio 3 - Aço ABNT 1020 - Baja a seco.

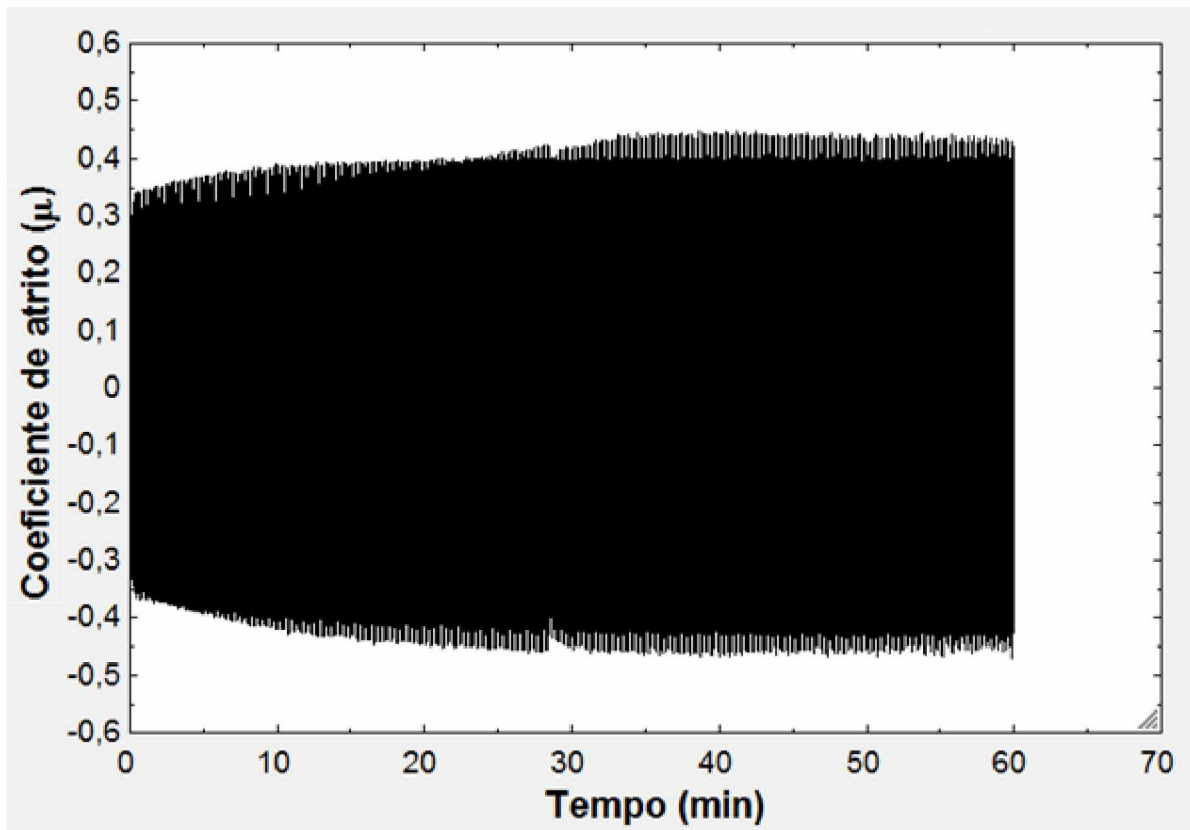


Figura 32: Ensaio 4 - Aço ABNT 1020 - Baja - Molhado.

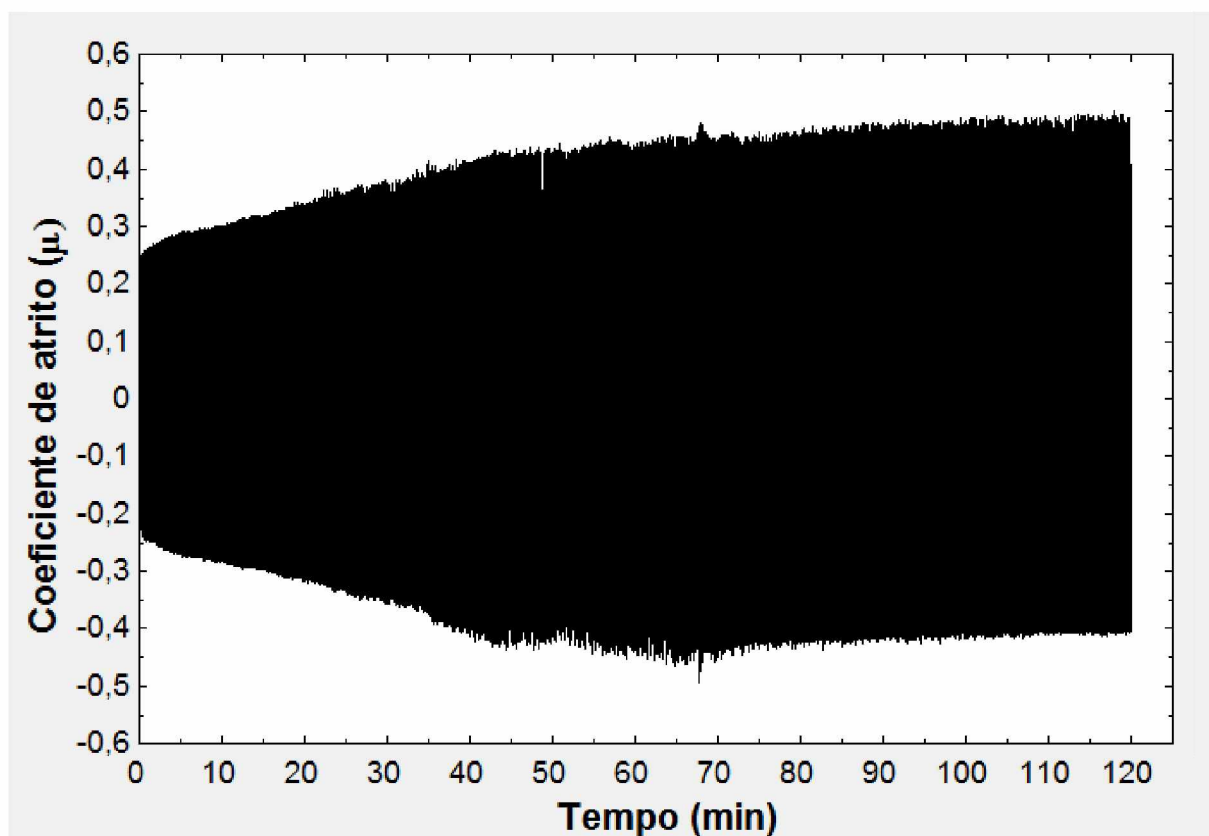


Figura 33: Ensaio 5 - Aço ABNT 1020 - Baja - Transição Seco/Molhado

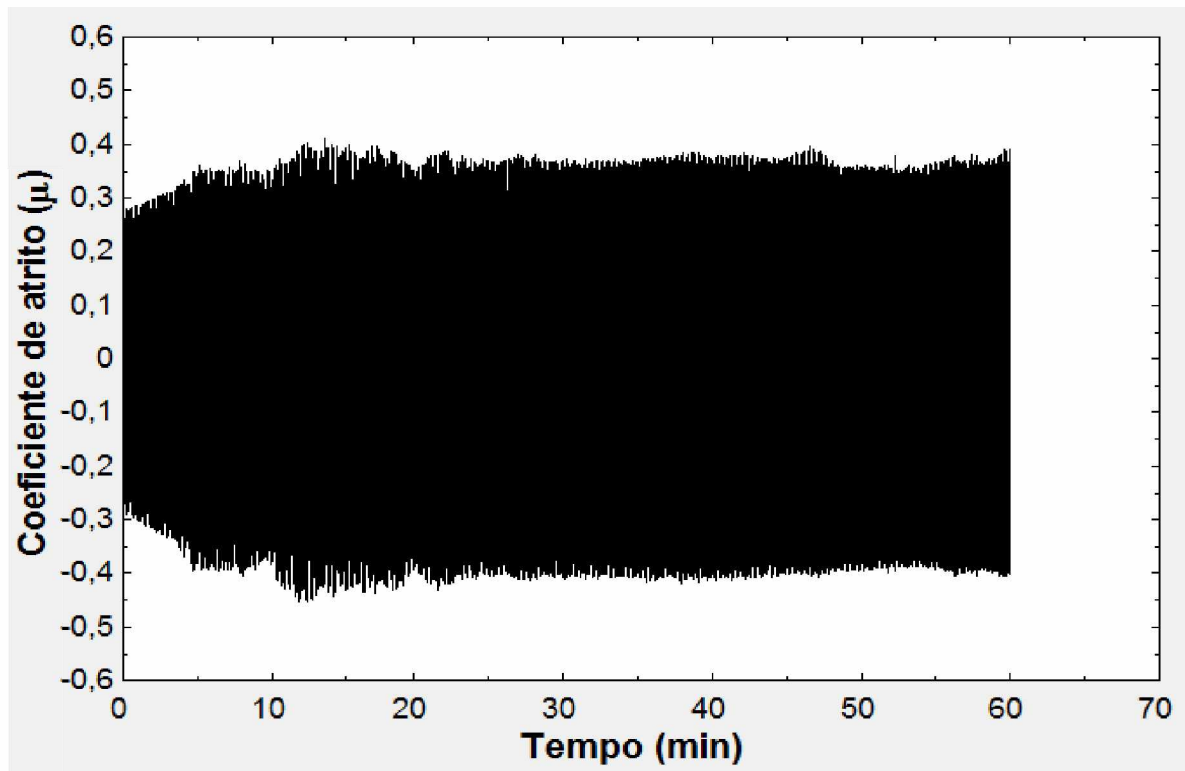


Figura 34: Ensaio 1 - FoFo Nodular a seco.

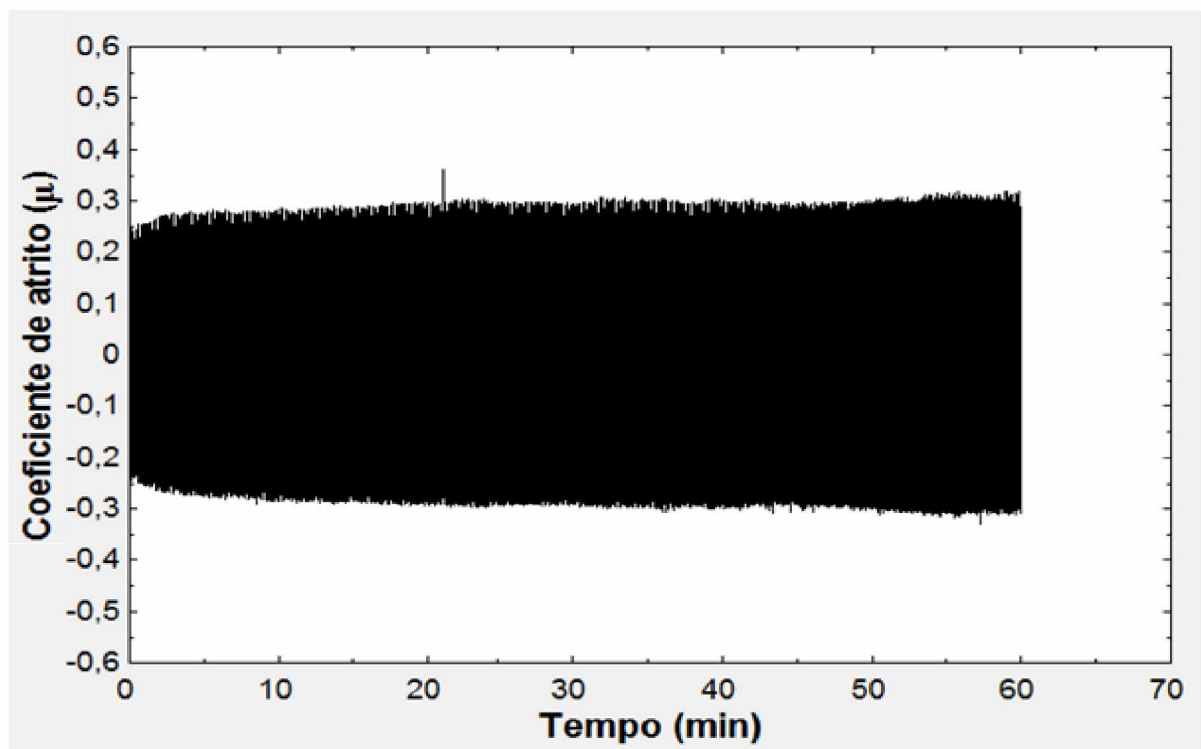


Figura 35: Ensaio 2 - FoFo Nodular a seco.

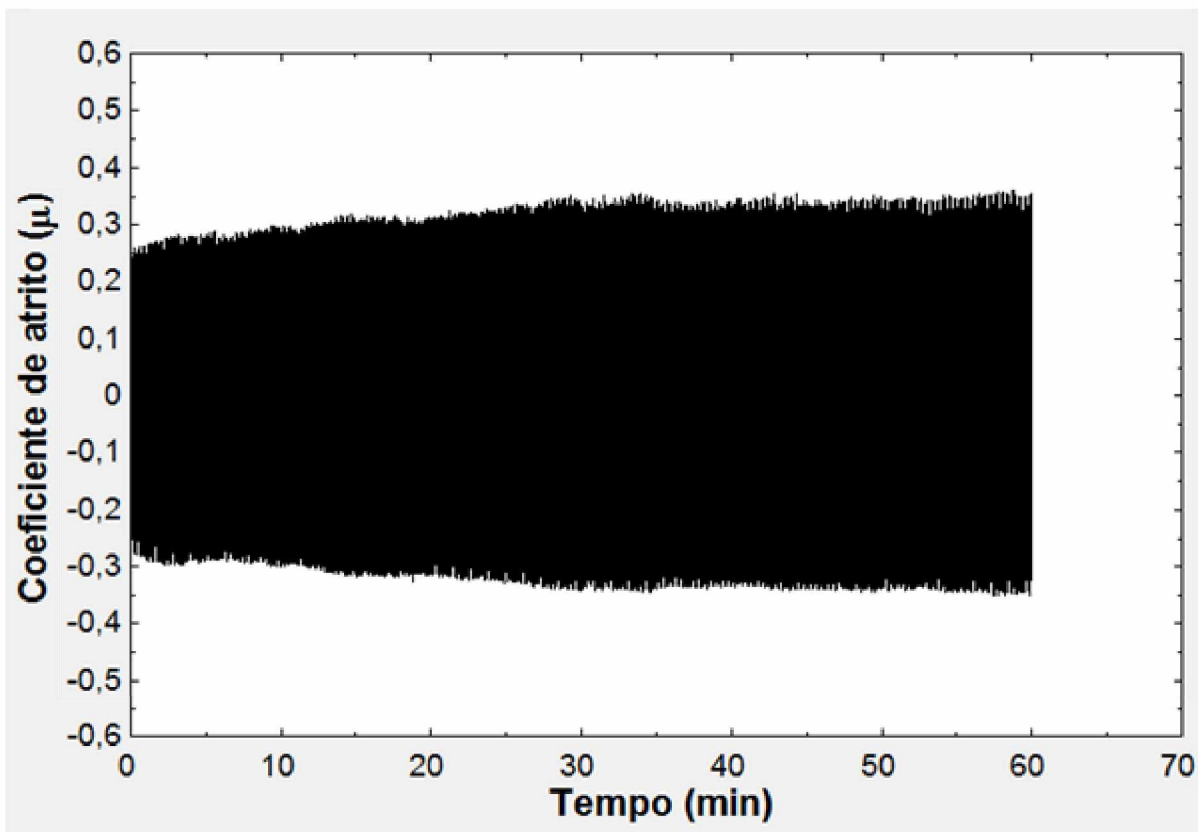


Figura 36: Ensaio 3 - FoFo Nodular a seco.

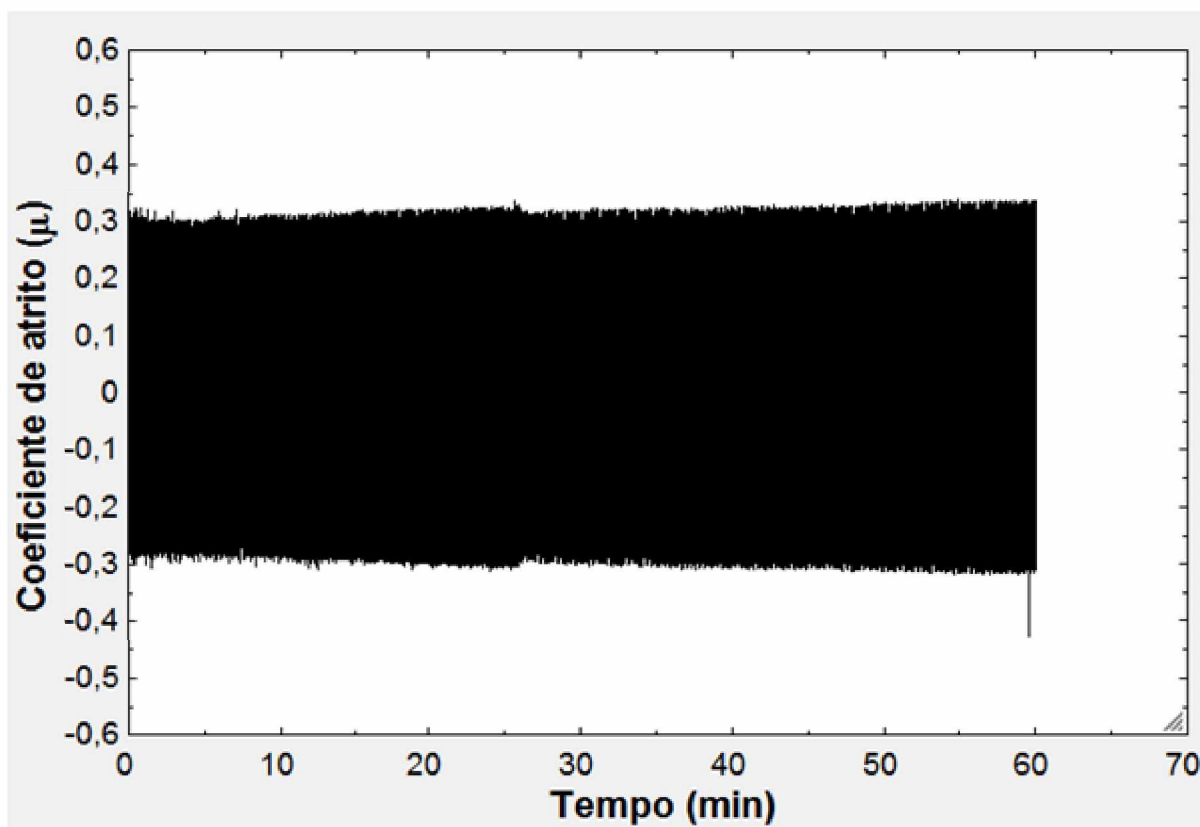


Figura 37: Ensaio 4 - FoFo Nodular - Molhado

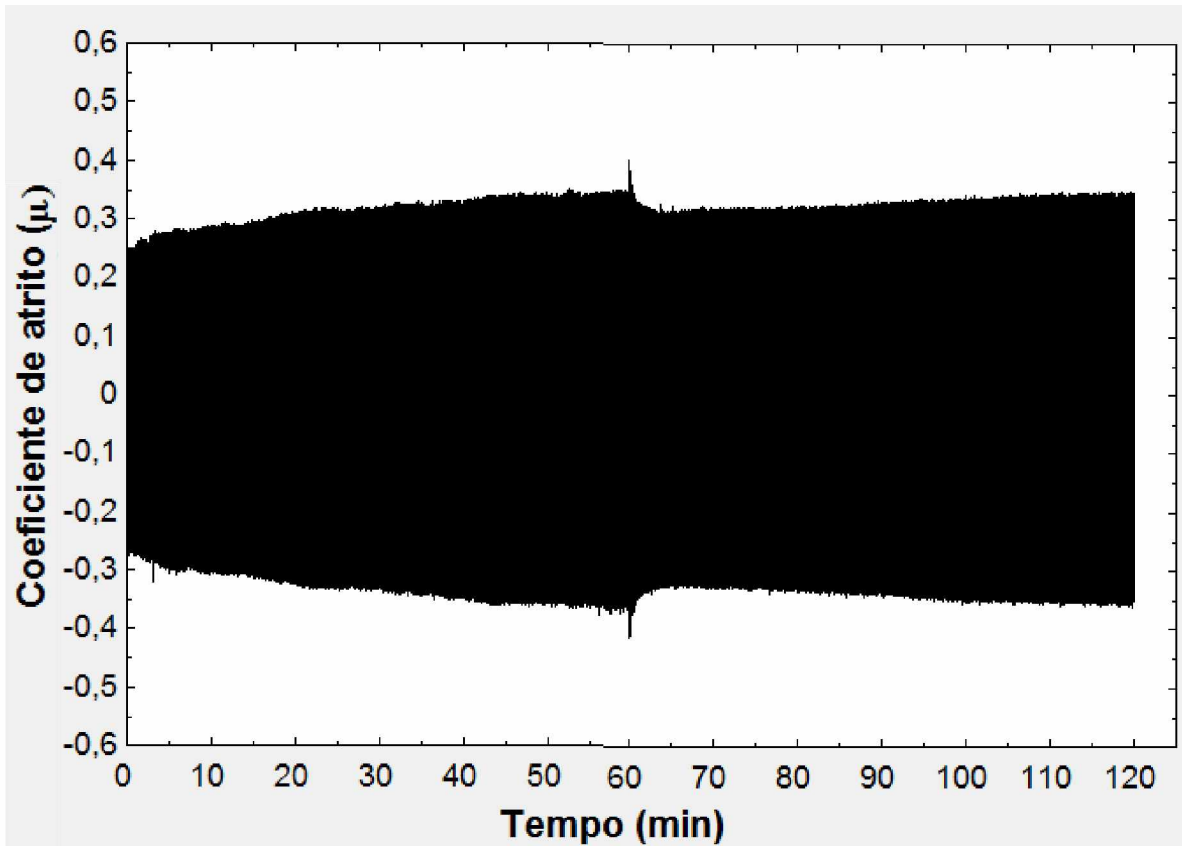


Figura 38: Ensaio 5 - FoFo Nodular - Transição Seco/Molhado.

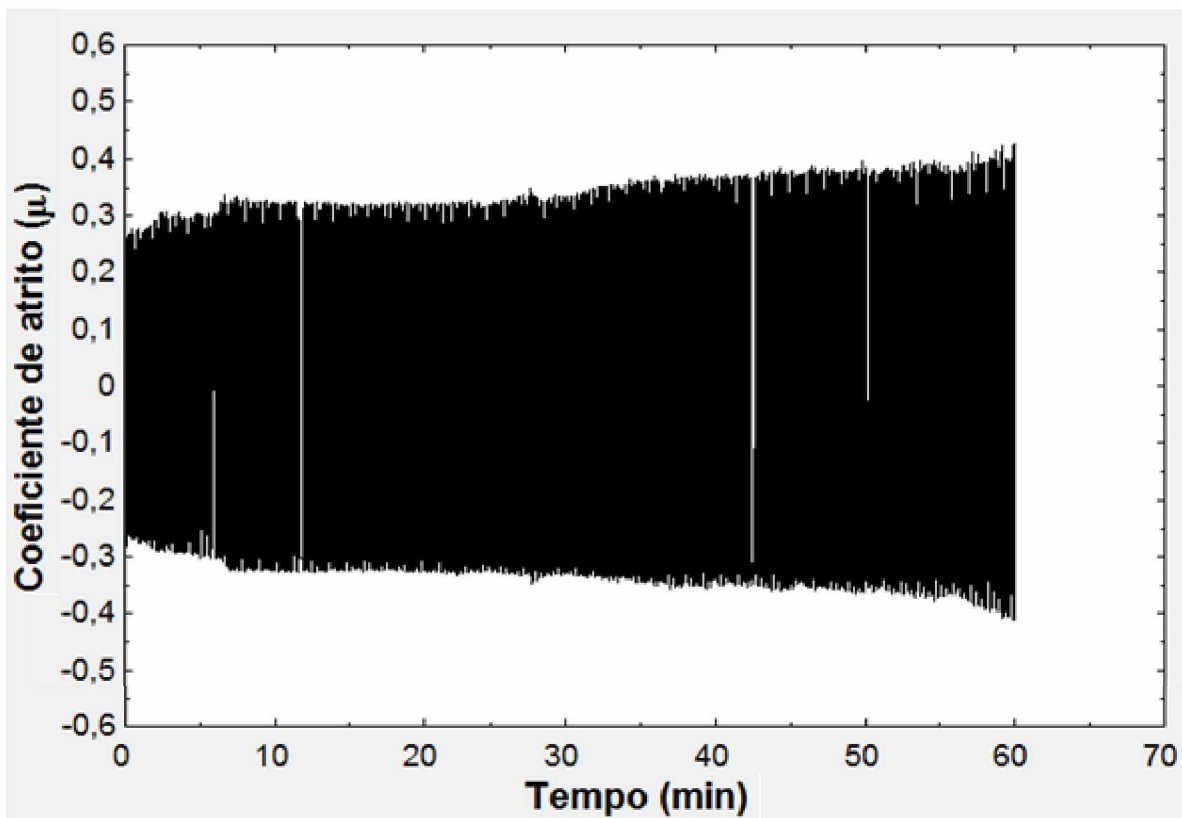


Figura 39: Ensaio 1 - FoFo Vermicular a seco.

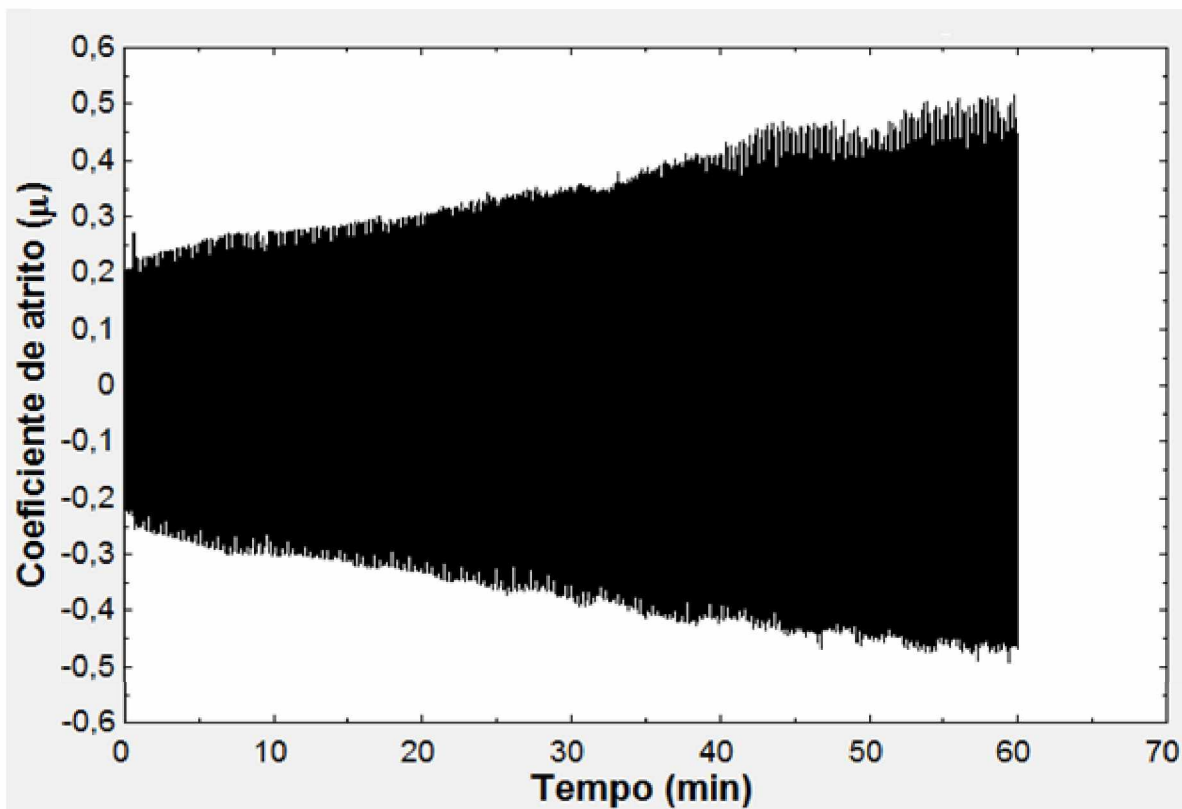


Figura 40: Ensaio 2 - FoFo Vermicular a seco.

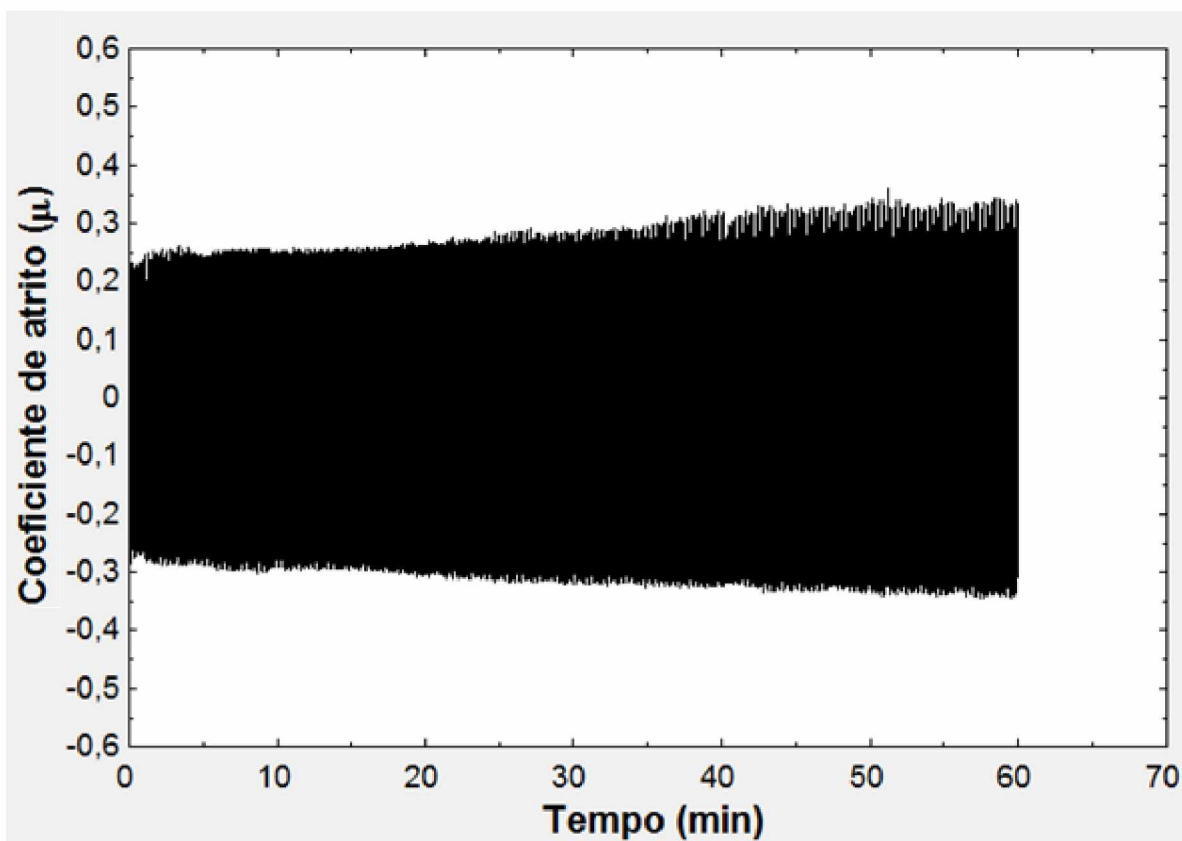


Figura 41: Ensaio 3 - FoFo Vermicular a seco.

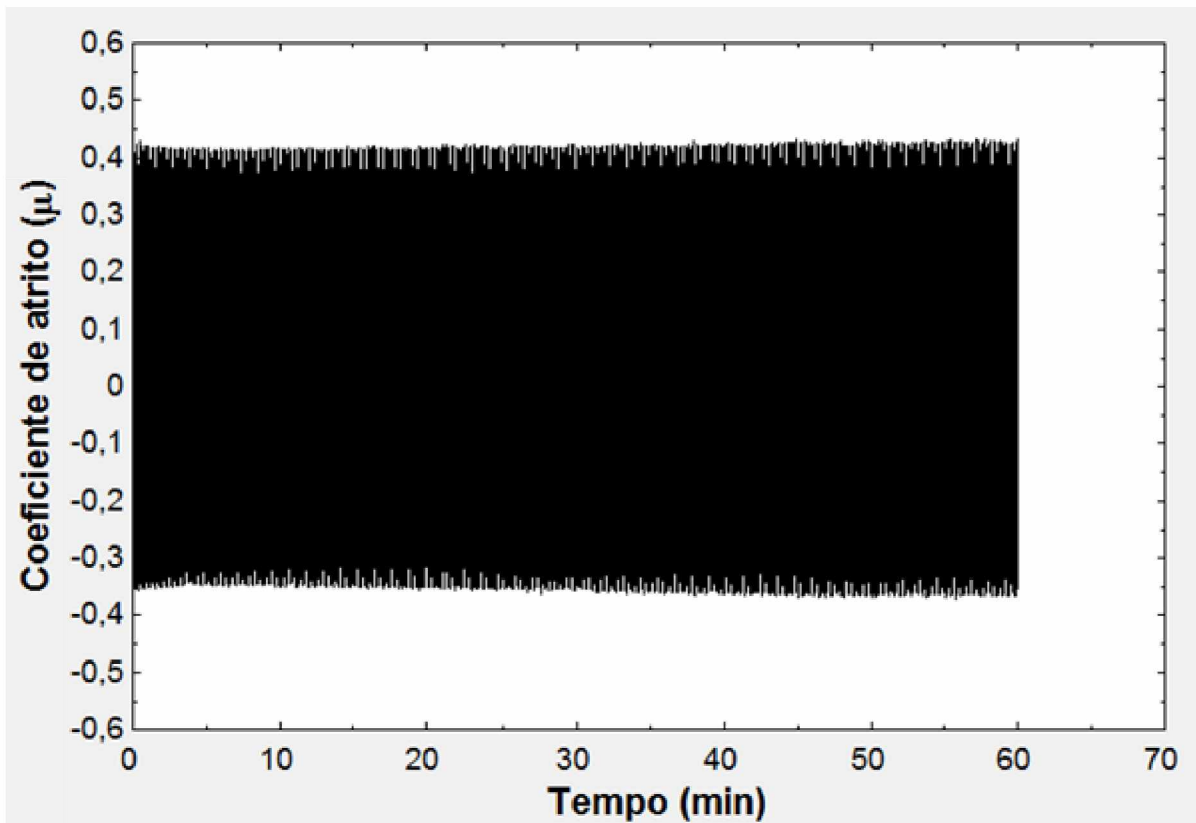


Figura 42: Ensaio 4 - FoFo Vermicular - Molhado.

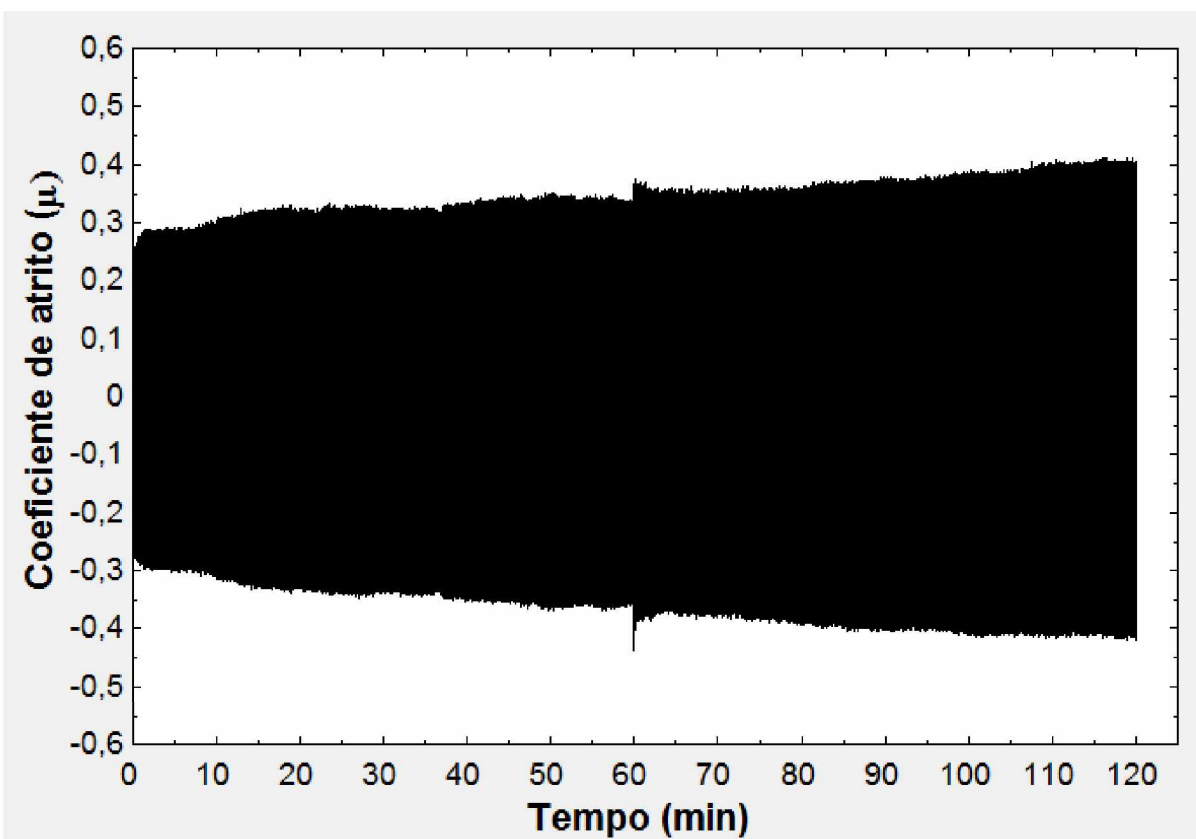


Figura 43: Ensaio 5 - FoFo Vermicular - Transição Seco/Molhado.

Os gráficos mostram a partir dos inícios dos ensaios uma variação dos coeficientes de atrito com tendência a se estabilizar a partir de 20 minutos. Isso ocorre devido as áreas reais de contato sofrerem aumento à medida que ocorre o desgaste devido o movimento relativo das superfícies. Este intervalo inicial, faz com que haja o assentamento das superfícies, gerando o regime estacionário.

Observando os gráficos gerados vemos que os ensaios mostrados nas Figuras 24, 25, 27, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 41 e 42 apresentaram regime estacionário após 20 minutos de ensaio.

Uma provável explicação é a heterogeneidade das pastilhas de fricção que tem composição complexa e que apresentam variações à medida que o desgaste prossegue de modo a não apresentar coeficientes de atrito constantes para cada superfície de contato com o mesmo.

Uma observação importante é que os coeficientes de atrito gerados na condição a seco são menores que na condição molhado, também revelados nos ensaios de transição seco / molhado. No caso do Ferro Fundido Nodular (Figura 38), não se observa tal variação.

Nos ensaios a seco, partículas de desgaste podem ficar interpostas às superfícies de contato e rolar entre ambas de modo abaixar os coeficientes de atrito. Tal observação pode ser explicada devido ao ensaio ser feito na horizontal, e as partículas de desgaste ficarem confinadas entre ambas as superfícies. Nos veículos, os discos de freio e as pastilhas são instaladas na vertical o que favorece a remoção das partículas de desgaste. As altas velocidades de rotação dos discos também favorecem a remoção das partículas.

Os gráficos dos ensaios abrasométricos molhados, mostram que os coeficientes de atrito são maiores que na condição a seco. As correntes de convecção da água podem contribuir para a retirada das partículas de desgaste que podem rolar de modo aumentar os coeficientes de atrito.

Durante os ensaios de transição seco/molhado ficou evidente no Aço ABNT 1020 (Figura 28), no Aço ABNT 1020 - Baja (Figura 33) e no Ferro Fundido Vermicular (Figura 43) que os coeficientes de atrito molhado foram maiores do que o coeficiente de atrito a seco.

Os coeficientes de atrito a seco e molhado foram calculados utilizando os dados coletados, sendo desprezados os primeiros vinte minutos para acomodação entre as superfícies de contato embora não se observa o regime estacionário a partir dos 20 minutos para os ensaios mostrados nas Figuras 26, 29, 39 e 40.

As Tabela 2 e 3 mostram respectivamente os coeficientes de atrito obtidos na condição a seco e na condição molhado.

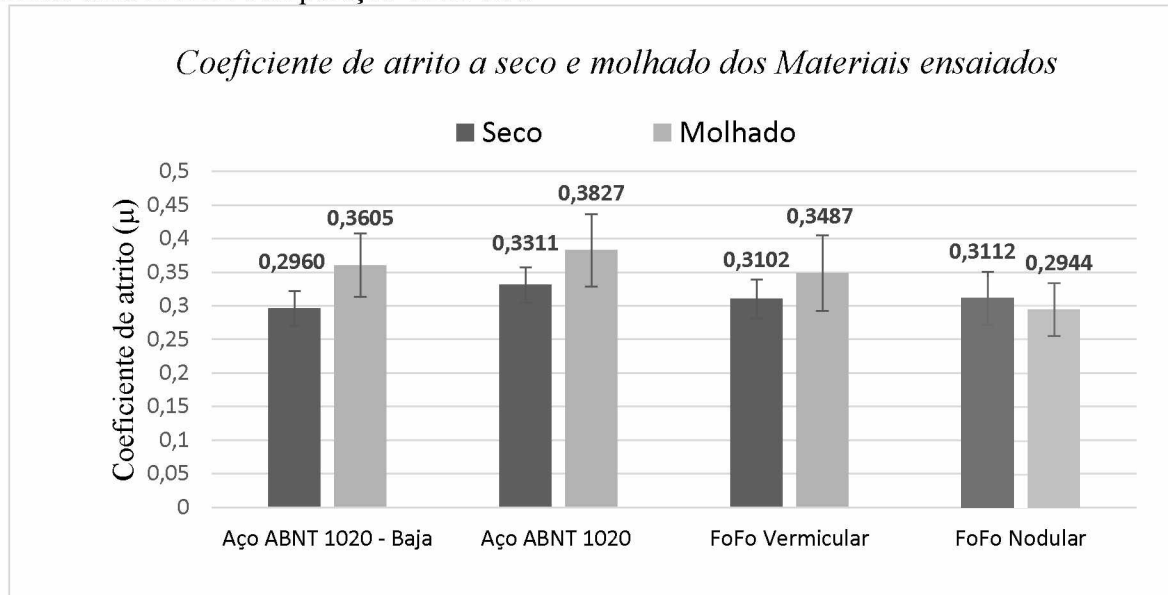
Tabela 2: Coeficientes de atrito médio nos ensaios realizados a seco.

Amostra	Coeficiente de atrito a seco (μ)	Desvio Padrão
Aço ABNT 1020 - Baja	0,2960	0,0256
Aço ABNT 1020	0,3311	0,0260
FoFo Vermicular	0,3102	0,0292
FoFo Nodular	0,3112	0,0396

Tabela 3: Coeficientes de atrito médio obtidos na condição molhado.

Amostra	Coeficiente. Atrito Molhado (μ)	Desvio Padrão
Aço ABNT 1020 - Baja	0,3605	0,0473
Aço ABNT 1020	0,3827	0,0538
FoFo Vermicular	0,3487	0,0563
FoFo Nodular	0,2944	0,0388

A Figura 44 mostra em forma de gráfico os coeficientes de atrito obtidos, o que permite uma melhor comparação entre eles.

**Figura 44:** Coeficientes de atrito a seco e molhado dos Materiais Ensaçados contra o corpo de fricção.

Comparações diretas das médias dos coeficientes de atrito obtidos na condição a seco e na condição molhado mostram:

A seco: $\mu_{\text{Aço ABNT1020}} > \mu_{\text{FoFo Nodular}} > \mu_{\text{FoFo Vermicular}} > \mu_{\text{Aço ABNT1020 Baja}}$

Molhado: $\mu_{\text{Aço ABNT1020}} > \mu_{\text{Aço ABNT1020 - Baja}} > \mu_{\text{FoFo Vermicular}} > \mu_{\text{FoFo Nodular}}$

Seco e Molhado: $\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Molhado}} > \mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Molhado}} > \mu_{\text{FoFo Vermicular - Molhado}}$
 $> \mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Seco}} > \mu_{\text{FoFo Nodular - Seco}} > \mu_{\text{FoFo Vermicular - Seco}} > \mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Seco}} >$

$\mu_{\text{FoFo Nodular - Molhado}}$

A observação dos coeficientes de atrito com seus respectivos desvios padrão (Figura 44) revela superposição indicando igualdade entre os mesmos. Para esclarecer esta dúvida, foi aplicado o teste de hipótese.

O teste de hipótese foi montado da seguinte forma:

$H_0: \eta_a - \eta_b \leq 0,05$ (as amostras têm médias estatisticamente iguais)

$H_1: \eta_a - \eta_b \neq 0$ (as amostras têm médias estatisticamente diferentes)

A distribuição utilizada foi *t-student*, uma vez que o número de medias de coeficientes de atrito é menor que 30. O índice de confiabilidade é de 95%. Os cálculos foram realizados através do programa STATISTICA e os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 4: Comparação dos coeficientes de atrito obtidos nas diversas condições utilizando o teste de hipótese.

Comparação dos coeficientes de atrito na condição a seco		
$\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}}$	=	$\mu_{\text{Aço ABNT 1020}}$
$\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Vermicular}}$
$\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Nodular}}$
$\mu_{\text{Aço ABNT 1020}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Vermicular}}$
$\mu_{\text{Aço ABNT 1020}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Nodular}}$
$\mu_{\text{FoFo Vermicular}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Nodular}}$
Comparação dos coeficientes de atrito na condição molhado		
$\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}}$	=	$\mu_{\text{AçoABNT1020}}$
$\mu_{\text{Aço ABNT1020 Baja}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Vermicular}}$
$\mu_{\text{Aço ABNT1020 Baja}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Nodular}}$
$\mu_{\text{AçoABNT1020}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Vermicular}}$
$\mu_{\text{AçoABNT1020}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Nodular}}$
$\mu_{\text{FoFo Vermicular}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Nodular}}$
Comparação dos coeficientes de atrito entre a condição seco e molhado		
$\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Seco}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Vermicular - Molhado}}$
$\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Seco}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Nodular - Molhado}}$
$\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Seco}}$	=	$\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Molhado}}$
$\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Seco}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Vermicular - Molhado}}$
$\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Seco}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Nodular - Molhado}}$
$\mu_{\text{FoFo Vermicular - Seco}}$	=	$\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Molhado}}$
$\mu_{\text{FoFo Vermicular - Seco}}$	=	$\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Molhado}}$
$\mu_{\text{FoFo Vermicular - Seco}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Nodular - Molhado}}$
$\mu_{\text{FoFo Nodular - Seco}}$	=	$\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Molhado}}$
$\mu_{\text{FoFo Nodular - Seco}}$	=	$\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Molhado}}$
$\mu_{\text{FoFo Nodular - Seco}}$	=	$\mu_{\text{FoFo Vermicular - Molhado}}$

Com os dados revelados pelo teste de hipótese mostrados na Tabela 4 conclui-se que, nas condições dos ensaios realizados, não houve diferenças sensíveis entre os coeficientes de atrito medidos, ou seja:

$$\text{A seco: } \mu_{\text{Aço ABNT1020}} = \mu_{\text{Aço ABNT1020 - Baja}} = \mu_{\text{FoFo Vermicular}} = \mu_{\text{FoFo Nodular}}$$

$$\text{Molhado: } \mu_{\text{Aço ABNT1020}} = \mu_{\text{Aço ABNT1020 - Baja}} = \mu_{\text{FoFo Vermicular}} = \mu_{\text{FoFo Nodular}}$$

$$\text{Seco e Molhado: } \mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Molhado}} = \mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Molhado}} = \mu_{\text{FoFo Vermicular - Molhado}} =$$

$$\mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Seco}} = \mu_{\text{FoFo Nodular - Seco}} = \mu_{\text{FoFo Vermicular - Seco}} = \mu_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Seco}} = \mu_{\text{FoFo Nodular - Molhado}}$$

6.2.2 Taxa de Desgaste

A avaliação da vida dos discos de freio pode ser feita, na condição real, pela redução da espessura. Nas condições de laboratório, as vidas podem ser mais facilmente mensuradas através das perdas de massa, como falado anteriormente, dividida pela distância deslizada, ou seja, através da taxa de desgaste.

As Tabelas 5 e 6 mostram as taxas de desgaste médias para todos os pares ensaiados nas condições a seco e molhado.

Tabela 5: Taxa de desgaste dos ensaios realizados a seco.

Amostra	ΔU_{seco} (mg/m)	Desvio Padrão
Aço ABNT 1020 - Baja	0,5741	0,3295
Aço ABNT 1020	0,7130	0,5317
FoFo Vermicular	1,3611	0,7192
FoFo Nodular	0,3426	0,2330

Tabela 6: Taxas de desgaste obtidas na condição molhado.

Amostra	$\Delta U_{\text{molhado}}$ (mg/m)	Desvio Padrão
Aço ABNT 1020 - Baja	0,7778	0,4618
Aço ABNT 1020	0,5278	0,3951
FoFo Vermicular	0,5833	0,3579
FoFo Nodular	0,7893	0,4813

Para melhor comparação entre taxas de desgaste dos quatro materiais nas condições a seco e molhado, é mostrado o gráfico da Figura 45.

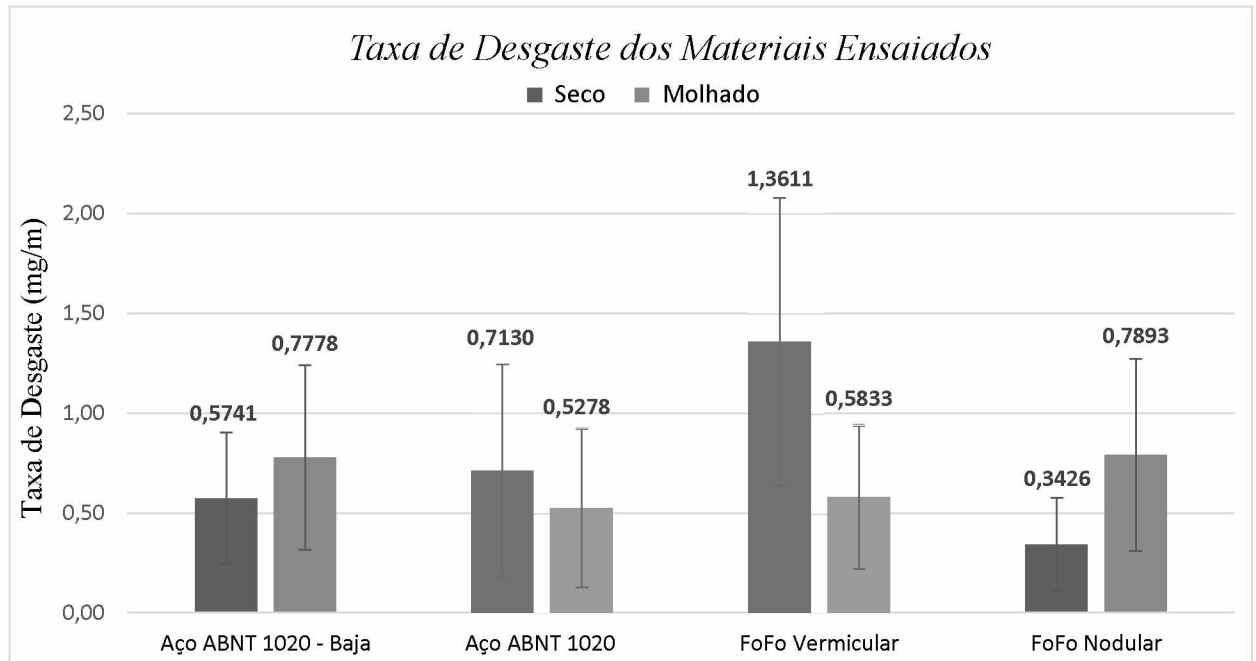


Figura 45: Taxa de Desgaste dos Materiais Ensaaiados nas condições a seco e molhado.

Comparações diretas das médias das taxas de desgaste obtidos nas condições a seco e molhado mostram:

A seco: $\Delta U_{\text{FoFo Vermicular}} > \Delta U_{\text{Aço ABNT 1020}} > \Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}} > \Delta U_{\text{FoFo Nodular}}$

Molhado: $\Delta U_{\text{FoFo Nodular}} > \Delta U_{\text{FoFo Vermicular}} > \Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}} > \Delta U_{\text{Aço ABNT 1020}}$

Seco e Molhado: $\Delta U_{\text{FoFo Vermicular - Seco}} > \Delta U_{\text{FoFo Nodular - Molhado}} > \Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Molhado}} > \Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Seco}} > \Delta U_{\text{FoFo Vermicular - Molhado}} > \Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Seco}} > \Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Molhado}} > \Delta U_{\text{FoFo Nodular - Seco}}$

A observação das taxas de desgaste com seus respectivos desvios padrão (Figura 45) revela a superposição dos mesmos induzindo não haver diferenças. Para esclarecer esta dúvida, foi aplicado o teste de hipótese, como feito anteriormente.

Tabela 7: Comparação da taxa de desgaste utilizando o teste de hipótese.

Comparação da Taxa de Desgaste na condição a seco		
$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}}$	=	$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020}}$
$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Vermicular}}$
$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Nodular}}$
$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Vermicular}}$
$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Nodular}}$
$\Delta U_{\text{FoFo Vermicular}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Nodular}}$

Comparação da Taxa de Desgaste na condição molhado		
$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}}$	=	$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020}}$
$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Vermicular}}$
$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Nodular}}$
$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Vermicular}}$
$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Nodular}}$
Taxa de Desgaste FoFo Vermicular	=	$\Delta U_{\text{FoFo Nodular}}$
Comparação da Taxa de Desgaste entre a condição seco e molhado		
$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Molhado}}$
$\Delta U_{\text{Aço ABNT1020 - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{Aço ABNT1020 - Molhado}}$
$\Delta U_{\text{FoFo Vermicular - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Vermicular - Molhado}}$
$\Delta U_{\text{FoFo Nodular - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Nodular - Molhado}}$
$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{Aço ABNT1020 - Molhado}}$
$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Vermicular - Molhado}}$
$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Nodular - Molhado}}$
$\Delta U_{\text{Aço ABNT1020 - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Molhado}}$
$\Delta U_{\text{Aço ABNT1020 - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Vermicular - Molhado}}$
$\Delta U_{\text{Aço ABNT1020 - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Nodular - Molhado}}$
$\Delta U_{\text{FoFo Vermicular - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Molhado}}$
$\Delta U_{\text{FoFo Vermicular - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{Aço ABNT1020 - Molhado}}$
$\Delta U_{\text{FoFo Vermicular - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Nodular - Molhado}}$
$\Delta U_{\text{FoFo Nodular - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Molhado}}$
$\Delta U_{\text{FoFo Nodular - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{Aço ABNT1020 - Molhado}}$
$\Delta U_{\text{FoFo Nodular - Seco}}$	=	$\Delta U_{\text{FoFo Vermicular - Molhado}}$

Com os dados revelados pelo teste de hipótese mostrados na Tabela 8 conclui-se que, nas condições dos ensaios realizados, não houve diferenças entre as taxas de desgaste, ou seja:

A seco: $\Delta U_{\text{FoFo Vermicular}} = \Delta U_{\text{Aço ABNT 1020}} = \Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}} = \Delta U_{\text{FoFo Nodular}}$

Molhado: $\Delta U_{\text{FoFo Nodular}} = \Delta U_{\text{FoFo Vermicular}} = \Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}} = \Delta U_{\text{Aço ABNT 1020}}$

Seco e Molhado: $\Delta U_{\text{FoFo Vermicular - Seco}} = \Delta U_{\text{FoFo Nodular - Molhado}} = \Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Molhado}} = \Delta U_{\text{Aço ABNT1020 - Seco}} = \Delta U_{\text{FoFo Vermicular - Molhado}} = \Delta U_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja - Seco}} = \Delta U_{\text{Aço ABNT1020 - Molhado}} = \Delta U_{\text{FoFo Nodular - Seco}}$

6.2.3 Dureza

A dureza é um parâmetro importante que influencia no desgaste dos materiais e também faz parte da caracterização dos mesmos.

A Tabela 9 mostra as durezas Brinell dos materiais ensaiados e a Figura 46 esses mesmos valores em forma de gráfico.

Tabela 8: Dureza Brinell dos Materiais Ensaidados.

Dureza Brinell (HB)		
Carga: 187,5 Kg	Penetrador D = 2,5 mm	
Amostra	HB Médio	Desvio Padrão
Aço ABNT 1020 - Baja	130,46	2,74
Aço ABNT 1020	134,81	2,53
FoFo Vermicular	257,43	10,33
FoFo Nodular	169,34	2,56

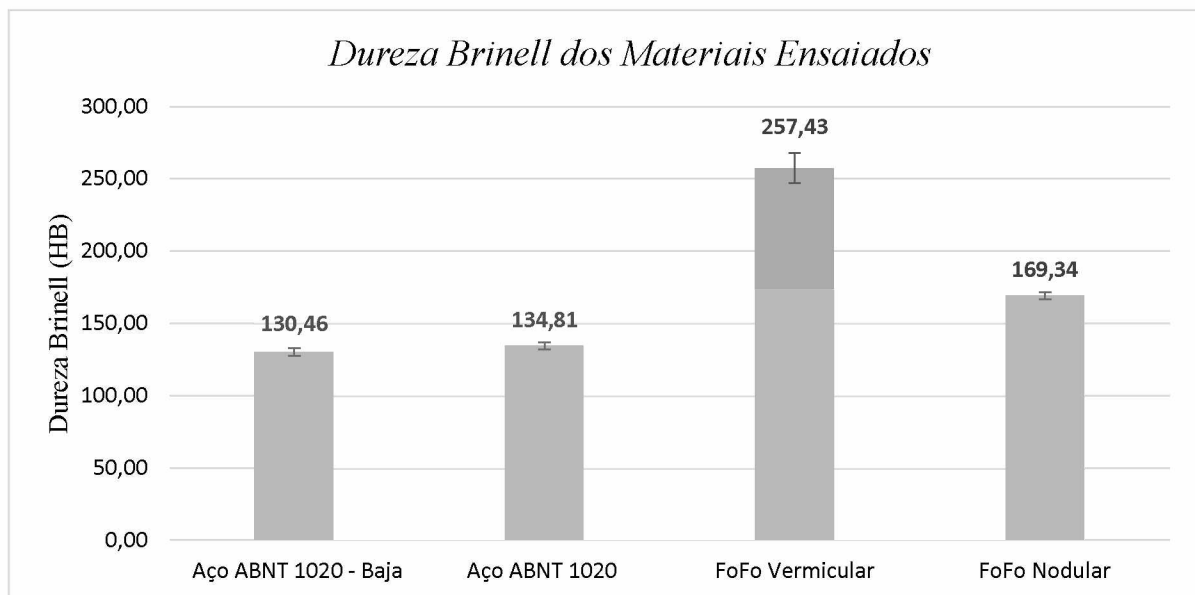


Figura 46: Dureza Brinell dos Materiais Ensaidados.

Comparações diretas das médias das durezas Brinell mostram:

$$HB_{\text{FoFo Vermicular}} > HB_{\text{FoFo Nodular}} > HB_{\text{Aço ABNT 1020}} > HB_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}}$$

A observação das durezas com seus respectivos desvios padrão (Figura 46) revela a superposição para os materiais Aço ABNT 1020 - Baja e Aço ABNT 1020, induzindo não haver diferenças de dureza deles. Para esclarecer esta dúvida, foi aplicado o teste de hipótese, como feito anteriormente, para todos os materiais.

Tabela 9: Comparação de Dureza Brinell dos Materiais Ensaçados.

Comparação pelo Teste de Hipótese		
HB Aço ABNT 1020 - Baja	<	HB Aço ABNT 1020
HB Aço ABNT 1020 - Baja	<	HB FoFo Vermicular
HB Aço ABNT 1020 - Baja	<	HB FoFo Nodular
HB Aço ABNT 1020	<	HB FoFo Vermicular
HB Aço ABNT 1020	<	HB FoFo Nodular
HB FoFo Vermicular	>	HB FoFo Nodular

Com os dados revelados pelo teste de hipótese mostrados na Tabela 10 conclui-se que, houve diferenças entre as durezas dos materiais Aço ABNT 1020 – Baja e Aço ABNT 1020 e entre todos os materiais ou seja:

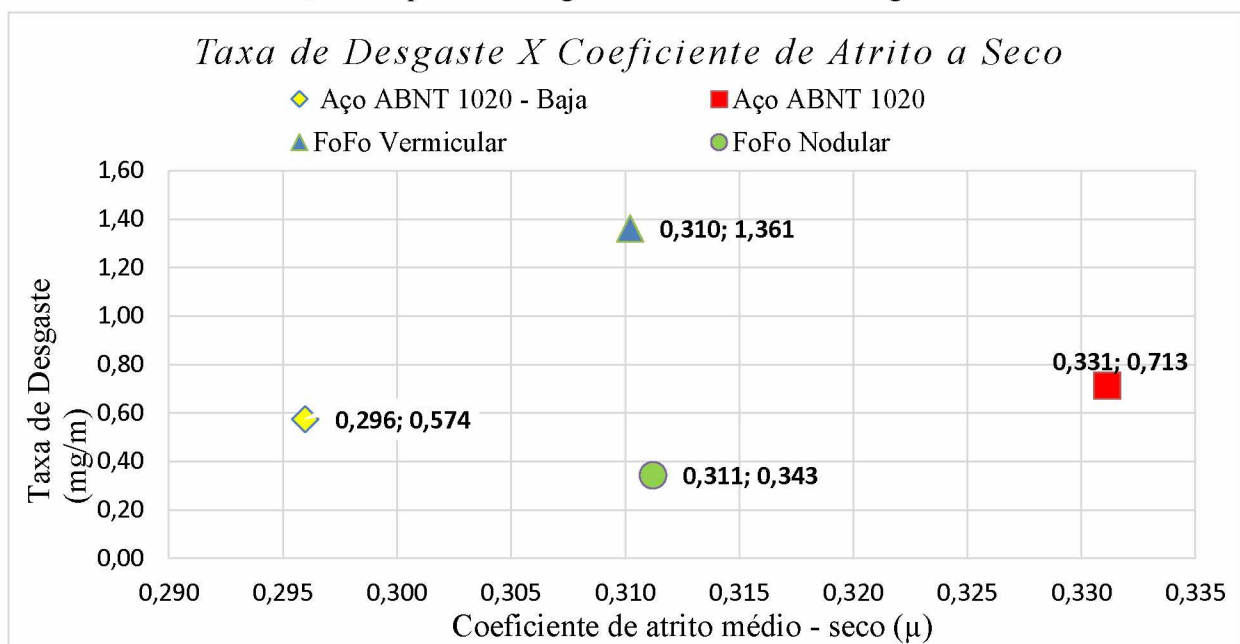
$$HB_{\text{FoFo Vermicular}} > HB_{\text{FoFo Nodular}} > HB_{\text{Aço ABNT 1020}} > HB_{\text{Aço ABNT 1020 - Baja}}$$

6.2.4 Correlações

O desempenho de um sistema de freio depende, entre outros fatores, do coeficiente de atrito e da taxa de desgaste. Em virtude disso, são plotados gráficos que correlacionam esses parâmetros e também com a dureza que por sua vez influência no coeficiente de atrito.

6.2.4.1 Correlação entre Taxa de Desgaste e Coeficiente de atrito

Para correlacionar as taxas de desgaste dos materiais com os seus respectivos coeficientes de atrito, foram plotados os gráficos mostrados nas Figuras 47 e 48.

**Figura 47:** Taxa de Desgaste X Coeficiente de Atrito a seco.

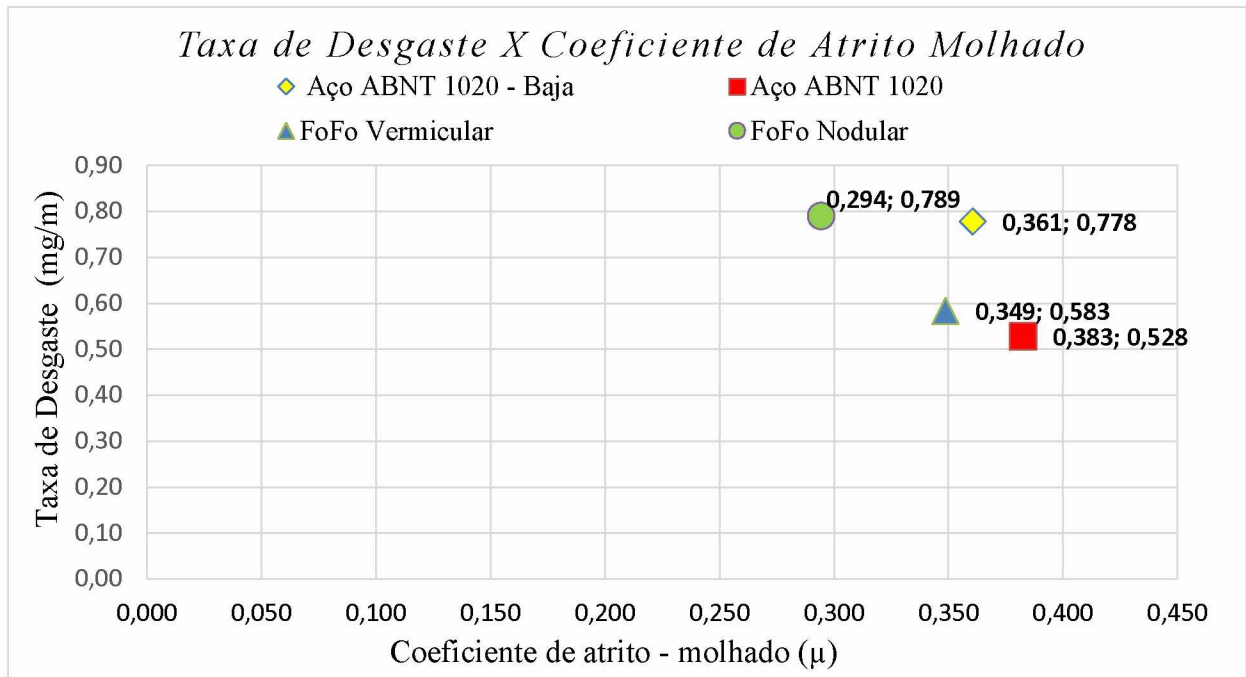


Figura 48: Taxa de Desgaste X Coeficiente de Atrito Molhado

6.2.4.2 Correlação entre Taxa de Desgaste e Dureza

As correlações entre as taxas de desgaste com as durezas são mostradas nas Figuras 49 e 50.

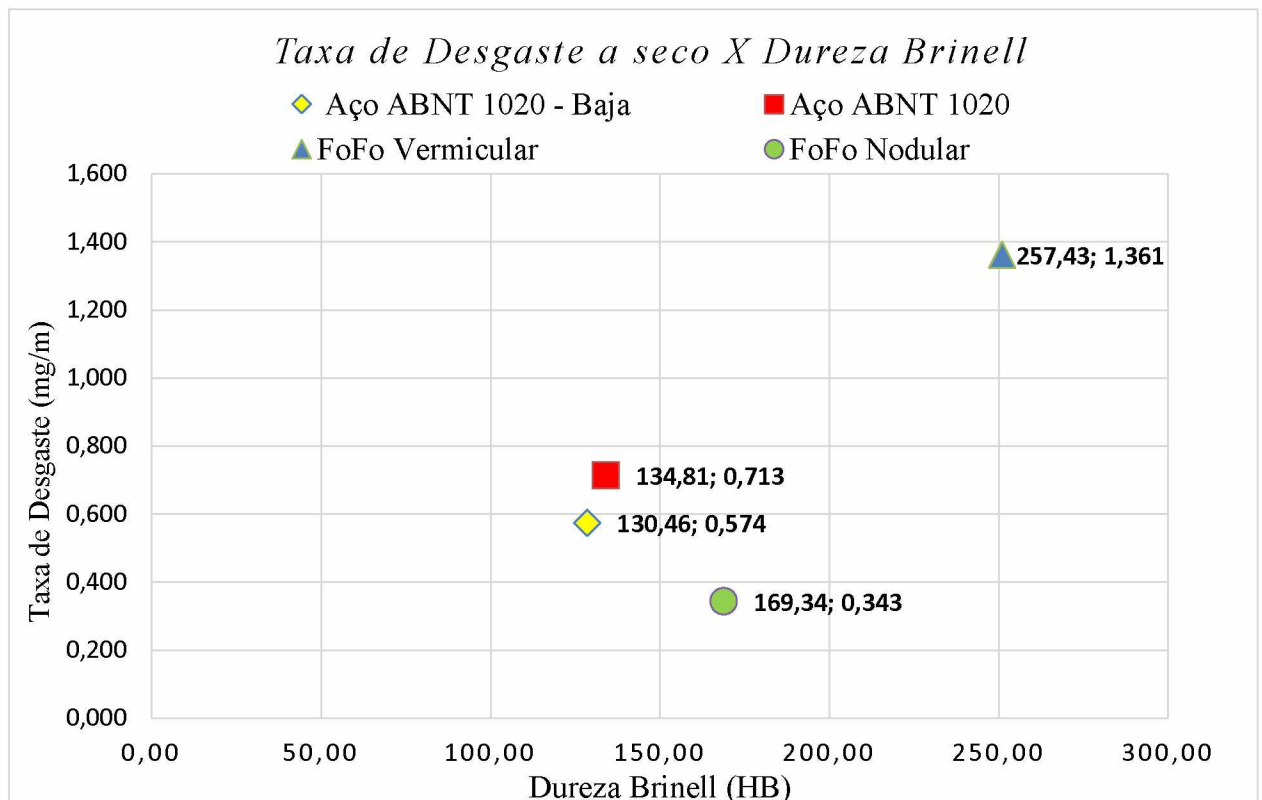


Figura 49: Taxa de Desgaste a seco X Dureza Brinell

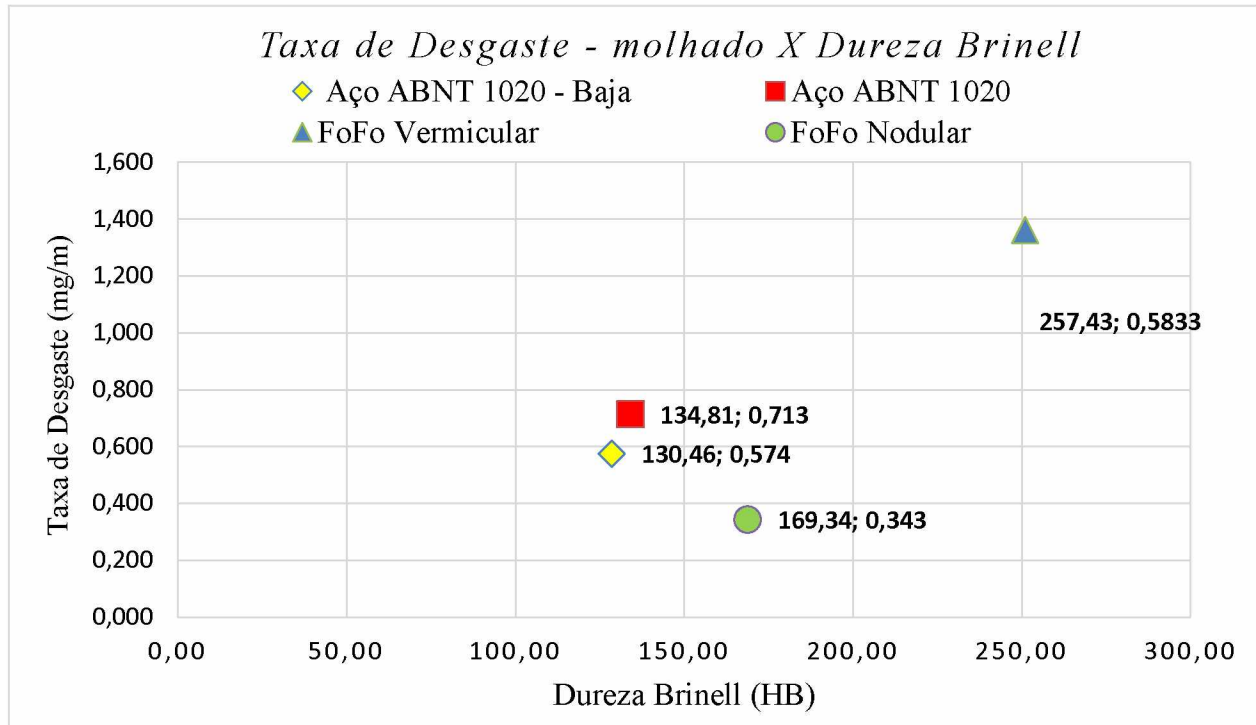


Figura 50: Taxa de Desgaste - Molhado X Dureza Brinell

6.2.4.3 Correlação entre Coeficiente de atrito e Dureza

As correlações entre os coeficientes de atrito com as durezas são mostradas nas Figuras 51 e 52.

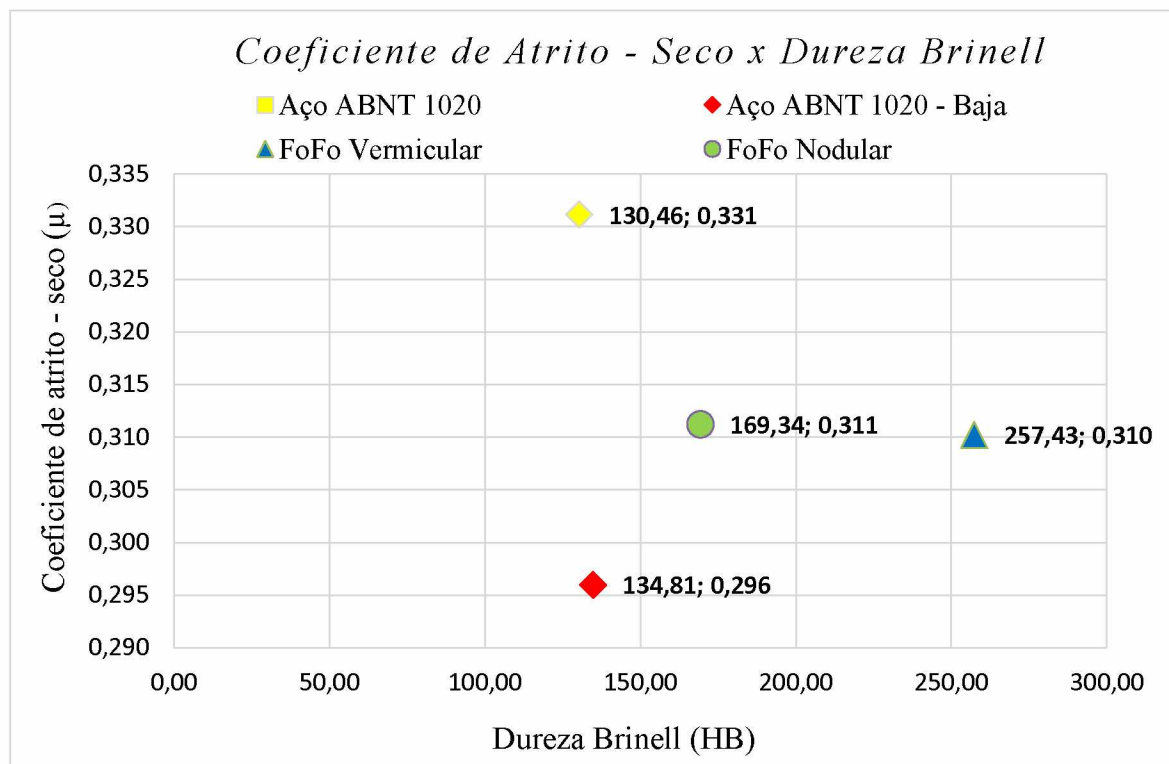


Figura 51: Coeficiente de Atrito a seco X Dureza Brinell

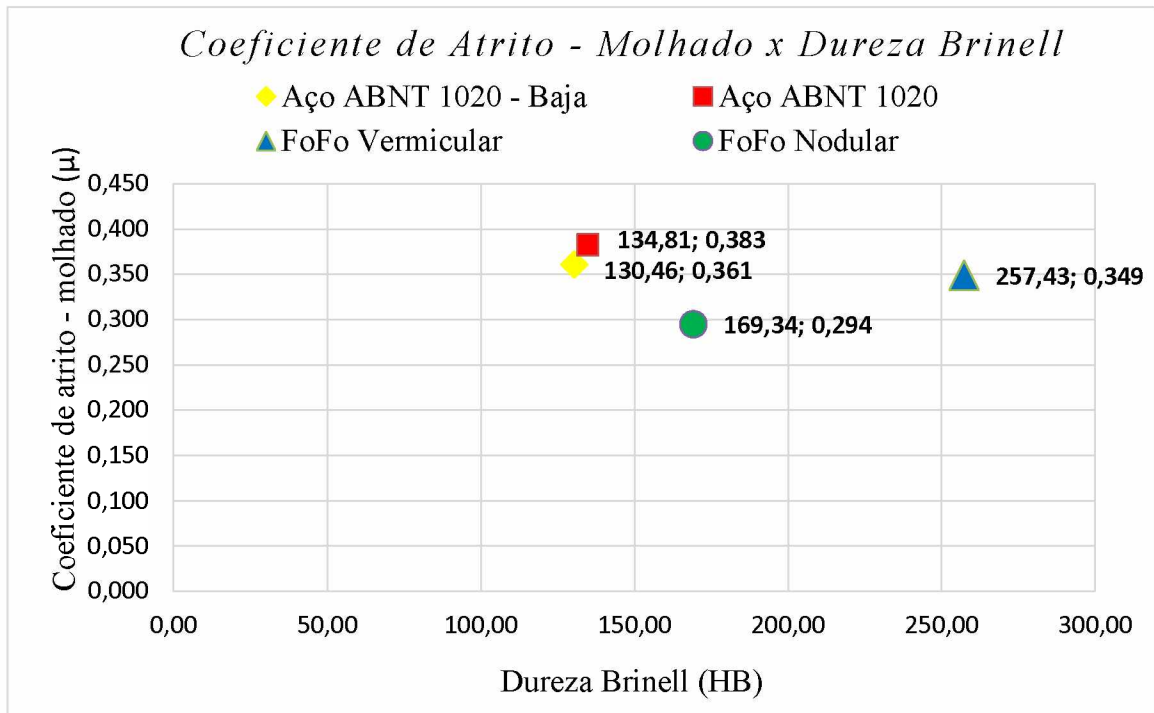


Figura 52: Coeficiente de Atrito Molhado X Dureza Brinell

As Figuras, baseadas nas médias dos parâmetros medidos mostram diferenças sensíveis de comportamento, mas em virtude dos elevados desvios padrão, há na realidade a igualdade entre os coeficientes de atrito e igualdade nas taxas de desgaste, o que não permite a correlação desses parâmetros.

Embora as durezas sejam estatisticamente diferentes, não foi possível a correlação da mesma com os coeficientes de atrito por serem estes estatisticamente iguais.

Em função dos elevados desvios padrão, houve prejuízo na análise dos resultados. Como forma de melhorar essa análise, o ideal é realizar mais ensaios de modo a diminuir os desvios padrão dos parâmetros analisados, para haver diferenças estatísticas que permitam afirmar se um material é melhor em comparação ao outro.

7 CONCLUSÃO

- Os elevados desvios padrão não permitiram uma afirmação do melhor material para a confecção dos discos de freio.
- Dentre os quatro materiais ensaiados nas condições a seco e molhado, o Ferro Fundido Nodular apresentou a menor variação do coeficiente de atrito da condição a seco para a condição molhado.
- Os ensaios realizados mostraram igualdade entre os coeficientes de atrito dos pares material do disco/contra corpo de fricção.
- Observou-se uma elevação dos coeficientes de atrito médios na condição molhado em relação a condição a seco, exceto para o Ferro Fundido Nodular. Entretanto todos os valores são estatisticamente iguais.
- Com base nas médias, a taxa de desgaste do Ferro Fundido Nodular foi menor que a taxa de desgaste do Ferro Fundido Vermicular, mas o teste de hipótese indica não haver diferença estatística.
- O Ferro Fundido Nodular não apresentou diferenças de coeficiente de atrito na transição do regime seco para o regime molhado

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar mais ensaios para tentar diminuir os desvios padrão de modo permitir uma comparação efetiva dos materiais.
- Realizar ensaios por tempos maiores para determinar a entrada do regime estacionário para todos os pares e considerar o maior deles como o tempo de pré desgaste.
- Realizar estudos mais detalhados, para identificar a causa da enorme variação do coeficiente de atrito na transição Seco/ Molhado do Aço ABNT 1020.
- Realizar ensaios de frenagem com um veículo em um dinamômetro, na condição a seco e através de um sistema de injeção de água realizar ensaios na condição molhado.
- Idealizar ensaios de laboratório na configuração vertical a seco e molhado.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COLPAERT; Hubertus. *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*, 3ª Edição, Editora Edgarg Blücher Ltda, São Paulo – 1974.

BARRETTI, Roberto S.D. *Apostila de Freios*. Publicado pelo autor. São Paulo: 1982

OLIVEIRA, Nelson de Campos Gil. *Apostila de Freios*. Escola Politécnica da USP. Elementos de Maquinas. São Paulo: Editora USP, 1984

SERBINO, Edison M. *Um estudo do mecanismo de desgaste de disco de freio automotivo ventilado*. Dissertação elaborada para Universidade de São Paulo. 2005

HUTCHINGS, I.M., *Tribology: friction and wear of engineering materials*, Edward Arnold, Great Britain, 273p., 1992

ANDREW, Batchelor, *Experimental Methods in Tribology*, Volume 44, 1st Edition, Elsevier Science, 27p., 2004

APÊNDICE: *Relatório de Projeto Equipe Cerrado Baja - 2015 - Memorial de Cálculo das Força Aplicadas no Freio do mini Baja*

APÊNDICE - Relatório de Projeto Equipe Cerrado Baja – 2015 - Memorial de Cálculo das
Força Aplicadas no Freio do mini Baja

Foram considerados para efeito de cálculo os valores máximos de peso do piloto conforme norma da competição Baja SAE do ano de 2015-1 e os parâmetros do veículo da Equipe Cerrado mini Baja também de 2015-1.

Roteiro dos cálculos para dimensionamento do sistema de freios:

Massa do piloto = 113,4 [Kg] (Valor máximo – Normas da SAE)

Massa do Veículo = 200 [Kg]

Superdimensionamento Total = 313,4 [Kg]

Distribuição de peso na dianteira = 40%

Distribuição de peso na traseira (x) = 60%

Distância do C.G. ao eixo traseiro (c) = 0,51 [m]

Distância entre eixos (L) = 1,130 [m]

Distância do C.G. ao eixo dianteiro (b) = 0,62 [m]

Altura do C.G (h) = 0,32 [m]

Peso máximo do veículo:

$$W = m.g \quad \text{Eq. (1)}$$

$$W = 3071,32 \text{ N}$$

Peso sobre o eixo dianteiro:

$$W_{fs} = m.(1-x).g \quad \text{Eq. (2)}$$

$$W_{fs} = 1228,53 \text{ N}$$

Peso sobre o eixo traseiro:

$$W_{rs} = W - W_{fs} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$W_{rs} = 1842,79 \text{ N}$$

Desaceleração máxima em uma eventual freada, onde as rodas serão travadas em uma distância de 8 metros ($V_o=9,5 \text{ m/s}$):

$$V^2 = V_o^2 + 2.ax.(S_f - S_i) \quad \text{Eq. (4)}$$

$$ax = -5,64 \text{ m/s}^2$$

Transferência de carga dinâmica para o eixo dianteiro:

$$Wf = W.(c/L - (ax/g).(h/L)) \quad \text{Eq. (5)}$$

$$Wf = 1386,33 \text{ N}$$

Transferência de carga dinâmica resultante no eixo traseiro:

$$Wr = W.((b/L) + (ax/g).(h/L)) \quad \text{Eq. (6)}$$

$$Wr = 1684,98 \text{ N}$$

Força aplicada na roda mais carregada – supondo um valor de $\mu(\text{pneu-solo})=0,95$:

$$Fp = Wf.\mu \quad \text{Eq. (7)}$$

$$Fp = 1317,01 \text{ N}$$

Momento aplicado no eixo na roda dianteira – Rp =raio do pneu:

$$Mfp = Fp.Rp \quad \text{Eq. (8)}$$

$$Mfp = 342,42 \text{ N.m}$$

Força aplicada no disco – Rd =raio do disco:

$$Fd = Mfp/Rd \quad \text{Eq. (9)}$$

$$Fd = 4334,43 \text{ N}$$

Força aplicada na pastilha da pinça – supondo um valor de $\mu(\text{pastilha})=0,4$:

$$F = Fd.\mu \quad \text{Eq. (10)}$$

$$F = 1733,77 \text{ N}$$

Pressão no sistema:

$$P = F/(A.n) \quad \text{Eq. (11)}$$

$$P = 1365173,23 \text{ Pa}$$

Força aplicada no cilindro mestre:

$$Fc = P.A \quad \text{Eq. (12)}$$

$$Fc = 1302,68 \text{ N}$$