

ANÁLISE DO DESGASTE ABRASIVO ENTRE AÇO INOXIDÁVEL AISI 420 E AÇO CARBONO SAE 1045 APLICADO EM EQUIPAMENTOS DO RAMO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Aires Pedro Junior, eng.aires.pedro@gmail.com¹

Prof. Dr. José Lúcio Gonçalves Júnior †, jlucio@ufg.br²

Prof. Dr. Daniel Fernandes da Cunha, danielcunha@ufg.br³

¹Universidade Federal de Goiás, Rua Itumbiara, 323 AP301B. Cidade Jardim, Goiânia-GO. CEP: 74413-120.

²Universidade Federal de Goiás, Alameda Ingá, Qd. B, Bl. 5, s/n. Chácaras Califórnia, Goiânia-GO. CEP: 74045-155.

³Universidade Federal de Goiás, Alameda Ingá, Qd. B, Bl. 5, s/n. Chácaras Califórnia, Goiânia-GO. CEP: 74045-155.

Resumo. O comércio de equipamentos do setor de construção civil no Brasil registrou um crescimento mais de 50% (exportação 52,8% e importação 51,8%) em comparativo com o período de setembro de 2020 a setembro de 2021, este crescimento aconteceu mesmo em época de pandemia. Em geral, o crescimento na receita líquida do setor de máquinas e equipamento foi de 16,7% no ano de 2021 mesmo perante a forte desvalorização da moeda real. A relevância deste assunto é tão importante, que as empresas que investirem em tecnologia e pesquisas, certamente terão as melhores oportunidades e os resultados. Esses números tendem a sinalizar que qualquer avanço sobre o custo de produção, impacta diretamente na lucratividade da empresa. Portanto, esse estudo pretende analisar através de comportamentos tribológicos o desgaste mecânico por abrasão do aço inoxidável AISI 420 e do aço carbono SAE1045 tendo como alvo os componentes de metal mecânico do caminhão de bomba de concreto, a chapa óculos e anel de desgaste. Ambos componentes são fabricados em aço carbono SAE1045. Com a análise e comparativo destes materiais, será possível comprovar a suspeita de superioridade ao desgaste mecânico do aço inoxidável AISI 420 sobre o aço carbono SAE1045.

Palavras chave: tribologia; abrasão; aço inoxidável AISI 420; aço carbono SAE 1045.

Abstract. The equipment's trade in the civil construction sector in Brazil registered a growth of more than 50% (exports 52.8% and imports 51.8%) compared to the period from September 2020 to September 2021, this growth occurred even in pandemic season. In general, the growth in net revenue of the machinery and equipment sector was 16.7% in 2021, despite the strong devaluation of the real currency. The relevance of this subject is so important that companies that invest in technology and research will certainly have the best opportunities and results. These numbers tend to indicate that any advance on the cost of production directly impacts the company's profitability. Therefore, this study intends to analyze, through tribological behavior the mechanical wear by abrasion of AISI 420 stainless steel and SAE1045 carbon steel, targeting the mechanical metal components of the concrete pump truck, the spectacle plate and the wear ring. With the analysis and comparison of these materials, it will be possible to prove the suspicion of superiority to mechanical wear of stainless steel AISI 420 over carbon steel SAE1045.

Keywords: tribology; abrasion; AISI 420 stainless steel; SAE 1045 carbon steel.

1. INTRODUÇÃO

Apesar do aço inoxidável e o aço carbono ter a sua origem em uma liga de ferro e carbono, as suas principais diferenças estão relacionadas a composição, principalmente na variação do teor de carbono e a presença do cromo no caso do inox (COBB, 1999). No entanto, os materiais deste estudo como o aço inoxidável AISI 420 e o aço carbono SAE 1045 possuem em comum características químicas e mecânicas convergentes, tendo como exemplo, a capacidade de suportar processos de tratamentos térmicos e o carbono em sua composição química, consistindo em 0,45% para AISI 420 e 0,30% SAE 1045 (CASTRO et al, 2016; ISFAHANY et al., 2011), além do que foi mencionado anteriormente. Existe outra propriedade que deve ser destacada, que trata sobre as características distintas do aço inoxidável AISI 420 em relação aos demais aços inoxidáveis. Essa característica em destaque trata-se de suas propriedades mecânicas, que podem ser

modificadas através do tratamento térmico em consequência do seu principal atributo que é pertencer a liga de aço inoxidável martensítico, portanto, esses aços geralmente são usados para uma ampla gama de aplicações (DODDS et al., 2013), tornando este material principal candidato para uma análise e comparativo com o aço carbono SAE 1045. Estes são materiais que possuem propriedades interessantes na visão das indústrias e amplamente utilizados de forma generalizada, tendo em vista que, em grande maioria da opção de compra acaba sendo pelo aço carbono SAE 1045 devido a facilidade de ser encontrado no mercado brasileiro segundo o blog da Aço Nobre (2020).

Os objetos deste estudo operam em meio a massa de concretagem, ou seja, trabalham com um fluido extremamente abrasivo (FABBRO et al., 2021). Portanto, é de grande importância uma investigação do comportamento tribológico referente à degradação dos componentes metálicos, principalmente em consequência de o meio de operação ser úmido e/ou molhado, juntamente com partículas abrasivas (BUYUKSAGIS e GOKTAN, 2005; GUPTA, 2018; HUANG et al., 2013). É justamente o que acontece em ambiente de construção civil onde os componentes deste estudo são empregados. Um estudo de LAGUNA-CAMACHO et al., (2013), demonstrou que o desempenho por desgaste de erosão por partículas sólidas no aço inoxidável AISI 420 comparando com os aços AISI 316 e AISI 304, apresentou números superiores e satisfatórios, ou seja, são indícios que o aço inoxidável AISI 420 tem propriedades que devem ser investigadas e observadas. Ainda segundo os autores, o motivo desse desempenho é em função do comportamento dúctil no aço inoxidável AISI 420, o mesmo comportamento que é apresentado no aço carbono SAE 1045 (NEVES et al., 2020).

De um modo geral, algumas propriedades do aço inoxidável possuem superioridade mecânica e química em comparação com aço carbono, como por exemplo, abrasão mecânica, acabamento e resistência a corrosão (PRAMANIK e BASAK, 2015). Estas propriedades e outras características do aço inoxidável, tornam-no utilizado em diversos seguimentos, tais como, indústria farmacêutica, alimentícia, eletrodomésticos, máquinas operatrizes e equipamentos industriais (SALAHY et al, 2021). As indústrias de metalurgia têm averiguado as propriedades mecânicas dos materiais com objetivo de obter aprimoramento e conseqüentemente prover benefícios para indústria metalmeccânica (SILVA, 2006).

Como o crescimento de vendas no setor de máquinas e equipamento foi significativo no ano de 2021 (BOEHM, 2021), as empresas tem buscado realizar investimentos em pesquisas para elaborar soluções de melhorias, sobre tudo, com assuntos relacionados a custo de produção, que impacta diretamente na qualidade, processo e lucratividade (BODENDORF et al., 2021; JOST, 1966). De fato, pretende analisar e comparar através de comportamentos tribológicos, os materiais fabricados em aço carbono SAE 1045 visando a substituição por aço inoxidável AISI 420 relacionado aos componentes do equipamento de construção civil, sem comprometer o custo de produção diretamente e indiretamente, sem prejudicar as condições do trabalho e conseqüentemente aumentando a vida útil dos componentes de estudo, além de beneficiar a empresa com características que apenas o aço inoxidável possui, como por exemplo, a eliminação do custo de pintura.

2. REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS

Um evento de falha mecânica pode ser ocasionado em função de corrosão, formação e propagação de trincas, deformação plástica e desgaste (ZUM GAHR, 1987). Em diversas literaturas, citam que existe quatro tipos de desgaste, sendo, desgaste adesivo, desgaste abrasivo, desgaste corrosivo e desgaste por fadiga superficial (RABINOWICZ, DUNN e RUSSEL, 1961). O desgaste por abrasão é considerado a base de diversos processos importantes como acabamento de materiais, laminação, lapidação e polimento (STACHOWIAK et al., 2004; WILLIAMS e XIE, 1992). Portanto, neste tópico o foco será no processo do desgaste mecânico por abrasão, e apresentado através de revisão de literatura. Abrangendo os princípios, características, e o processo abrasivo no campo mecânico.

2.1. Princípio de desgaste mecânico

O fundamento básico do desgaste mecânico se dá por meio de abrasão onde há a retirada do material através de fragmentos do corpo que resulta em partículas endurecidas que pode ser proveniente de movimentos relativos de dois ou três corpo com a mesma dureza ou superior, promovendo sulcamento no material de dureza inferior (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017; STACHOWIAK et al., 2004; ZUM GAHR, 1987). Esta característica mecânica tem sido desafio de muitos pesquisadores, tendo em vista, que a abrasão desconstrói a originalidade da peça ou máquina e causa danos ao sistema em questão. A observação de partículas abrasivas é importante para controle da taxa de desgaste nos mecanismos criados pelos engenheiros projetistas (GÄHLIN, AXÉN, JACOBSON, 1998).

Os autores HUTCHINGS e SHIPWAY (2017) representaram graficamente o mecanismo da abrasão, conforme figura 1.

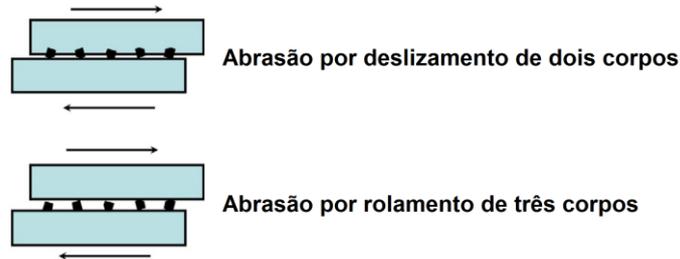


Figura 1. Representação gráfica do mecanismo de abrasão (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017)

O autor GATES (1998) fez uma análise crítica aos demais autores ao adicionar terminologias ampliando as variáveis que ocorre no desgaste por abrasão conforme tabela 1.

Tabela 1. Classificação baseada na severidade do desgaste abrasivo (GATES, 1998)

Situações típicas	Tipo de desgaste abrasivo		
	Pequeno	Moderado	Grande
Tamanho da partícula			
Limitação	Sem restrições	Parcialmente limitado pela contraface	Fortemente limitado
Forma da partícula	Arredondada	Afiado	Afiado
Estresse de contato	Baixo - insuficiente para fraturar partículas	Moderado - suficiente para fraturar partículas	Muito alto – pode causar deformação macroscópica ou fratura frágil do material sendo usado
Mecanismos dominantes	Microsulcamento	Microcorte	Microcorte e/ou microfatura
Termos equivalentes	Abrasão de baixa tensão	Abrasão de alta tensão	Abrasão por Goivagem
	Abrasão por arranhões	Abrasão de desgaste	
	Três corpos de baixa tensão	Corpos de alta tensão	Dois corpos de alta tensão
		Corpos de baixa tensão	

Ao realizar o ensaio de abrasão na roda de borracha, será possível averiguar em qual regime abrasivo será enquadrado de acordo com a tabela proposta pelo GATES (1998).

2.2. Características do desgaste mecânico

Nas investigações de HOKKIRIGAWA, KATO (1988) a topografia e o perfil do corpo que sofreu abrasão mecânica são características singulares, os sulcamentos e micro sulcamentos geradas segue padrão de formação corpo deformador. Tamanho da amostra, tipo do material e a carga (força) aplicada são variáveis que interferem nos sulcamentos e micro sulcamentos. Oscilações nessas variáveis pode alterar a geometria do perfil e a topografia do sulcamento da amostra em questão.

Os autores HOKKIRIGAWA, KATO, LI (1988) e GÅHLIN, AXÉN, JACOBSON (1998), definem três mecanismos de desgaste diferentes em experimentos de abrasão, levando em consideração a abrasão de dois corpos (ponta de desgaste e a amostra), que são eles: corte, formação de cunha e sulcos. No mecanismo de desgaste observado por corte, houve remoção do material onde um cavaco formado, foi removido pela ponta de abrasão. E no mecanismo de desgaste por formação de cunha, formou-se um acúmulo de material na ponta do corpo abrasivo. No experimento que o movimento foi contínuo na formação de cunha, foi produzido uma partícula de desgaste que cresce continuamente e eventualmente cai. Já no mecanismo de formação de sulcamento, o material é deformado plasticamente e produz sulcos em ambos os lados do corte, mas não necessariamente formando detritos de desgaste. As observações realizadas, são demonstradas na figura 2.

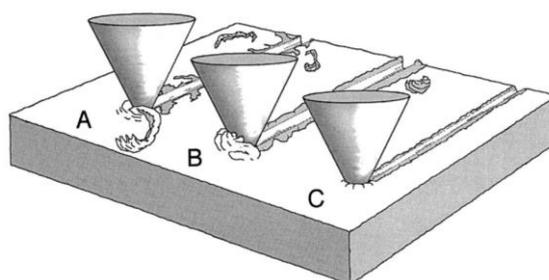


Figura 2. Modos de abrasão por corte (a), cunha (b) e sulcamento (c) (GÅHLIN, AXÉN e JACOBSON, 1998)

A taxa de desgaste está correlacionada com o ângulo de ataque do componente abrasivo, isto é, em superfícies plana, áspera e o componente abrasivo afiado proporcionam maiores taxas de desgaste (RABINOWICZ, DUNN e RUSSEL, 1961).

Em sistemas onde não há lubrificação adequada ou é inexistente, componentes abrasivos (como a massa de concreto) e rugosidade da superfície de contato desproporcional ao sistema mecânico em questão, geram um cenário plausível para representação mais severa de escoriações decorrente da abrasão (HOKKIRIGAWA, KATO, 1988; HOKKIRIGAWA, KATO, LI, 1988; ZUM GAHR, 1987). A terminologia em questão, representa a forma severa de problemas no componente, estando associada a danos grosseiros na superfície.

2.3 Processo abrasivo no campo mecânico

O material ligado diretamente ao processo abrasivo de um sistema mecânico, possui a resistência microestrutural diretamente afetada por partículas de segunda fase no material matriz, ou seja, o comissionamento microestrutural como fração volumétrica, morfologia, tamanho e dureza, influenciam na resistência do dispositivo mecânico (ZUM GAHR, 1998). Ainda de acordo com ZUM GAHR (1998), a dureza das superfícies de contato e a tenacidade à fratura do material abrasivo são identificados como as principais propriedades mecânicas que influenciam a abrasão. A SERIACOPI (2018) analisou que na abrasão de três corpos fica menos nítido o efeito de abrasão mecânica quando são comparados a abrasão de dois corpos, em função da rotação das partículas que tende ser reorientadas durante o deslizamento e/ou rolamento.

A transição de abrasão leve (micro sulcamento) para abrasão severa (micro corte) se dá através da dureza relativa, ou seja, corresponde à razão entre a dureza do corpo abrasivo e a dureza do corpo desgastado (SERIACOPI, 2018; ZUM GAHR, 1998). A mudança de regimes abrasivos de materiais monofásicos ocorre quando a dureza abrasiva se iguala com a dureza do material. Para materiais multifásicos com precipitados, a transição ocorre quando a dureza da matriz e da segunda fase são superadas para a dureza do abrasivo, conforme figura 3.

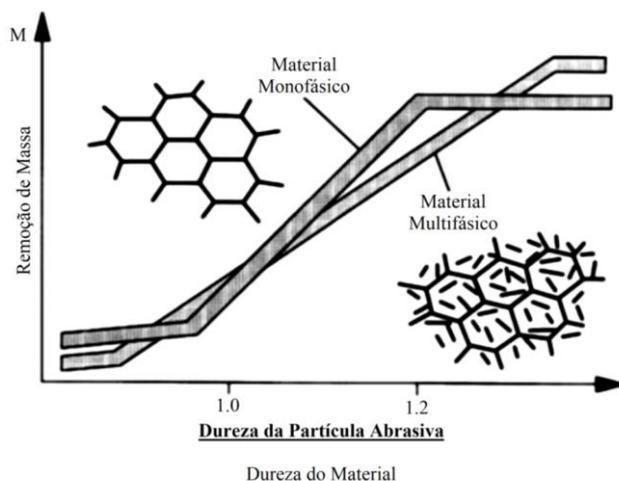


Figura 3. Razão de dureza da partícula abrasiva e dureza do material de desgaste, (ZUM GAHR, 1998)

Ambos os materiais aqui estudados são de natureza monofásica, mas, em temperaturas elevadas para tratamento térmico (aço carbono SAE1045 600°C a 700°C, aço inoxidável AISI 420 850°C a 950°C), podem sofrer precipitação de carboneto de nióbio e carboneto de cromo respectivamente (SILVA et. al., 2006; BONIARDI e CASAROLI, 2014).

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 Amostras

Os substratos que serão testados possuem geometria retangular, com as dimensões 25mm × 76mm e a espessura aproximada de 5,6mm, que passaram por processo de corte em guilhotina, retificação em uma retificadora plana, processo tratamento térmico, teste de dureza em um durômetro e o teste de abrasão em um abrasômetro. Após as etapas preliminares, as amostras serão ensaiadas com o dispositivo de abrasão denominado abrasômetro roda de borracha. Discos de borracha com a espessura e diâmetro indicado pela norma ASTM-G65-04 (2010) e partículas de abrasão sílica (SiO₂) peneirado em malha 50/70, também serão empregados. A composição química (obtidas pelos seus respectivos certificados inspeção dos fabricantes) e os ensaios de dureza por indentação dos corpos de provas estão disponíveis na Tabela 2, Tabela 3, Gráfico 1 e Gráfico 2 respectivamente:

Tabela 2. Composição química do SAE 1045 e AISI 420 (% em peso), (Usiminas, 2022 e Aperam, 2020)

Tipo de aço	C	MN	SI	CR	NI	MO	FE
Aço Carbono SAE 1045/J403	0,480	0,650	0,230	0,030	0,010	0,010	Bal.
Aço inoxidável AISI 420/P420A	0,320	0,350	0,350	13,700	0,003	0,015	Bal.

Tabela 3. Ensaios de dureza por indentação do SAE 1045 e AISI 420, (Autor, 2023)

Tipo de aço	Dureza média (HV)	Força aplicada (Kgf/cm ²)	Tempo(s)
Aço Carbono SAE 1045/J403	226,98	20	60
Aço inoxidável AISI 420/P420A	286,20	20	60

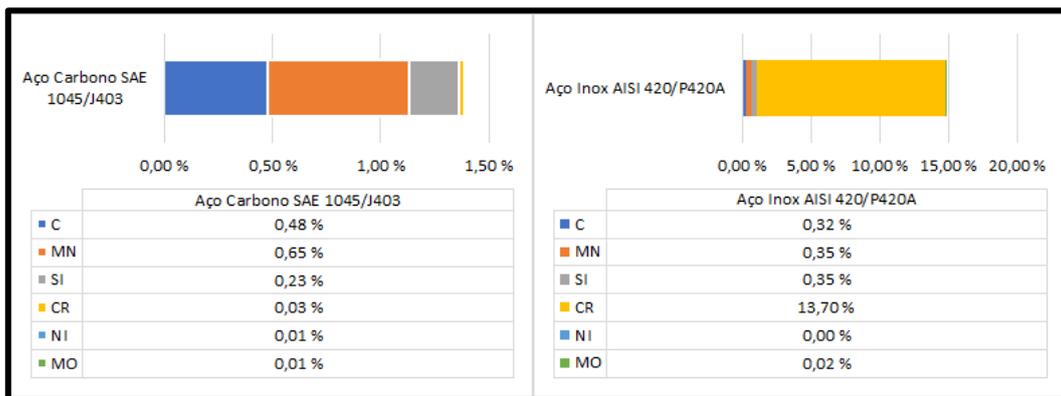


Gráfico 1. Composição química do SAE 1045 e AISI 420 (% em peso), (Usiminas, 2022 e Aperam, 2020)

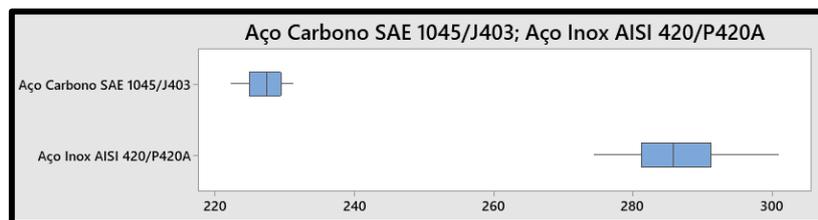


Gráfico 2. Ensaios de dureza por indentação do SAE 1045 e AISI 420, (Autor, 2023)

3.2 Dispositivos experimentais e metodologia

Para realizar o experimento, é necessário seguir os parâmetros de comissionamento e preparação das amostras de acordo com a norma ASTM-G65-04, 2010. Os equipamentos necessários para fabricação das amostras e os instrumentos para realizar as observações se-rão apresentados a seguir:

- a) Guilhotina hidráulica

A guilhotina hidráulica foi utilizada para cortar as amostras dentro das dimensões estabelecidas pela norma ASTM-G65-04, 2010. O modelo e marca da guilhotina é GHA-6.4/2500 da Atlasmaq.

b) Retífica plana

Já a retífica plana, foi empregada para garantir o paralelismo superficial e acabamento que são determinados pelas diretrizes da norma ASTM-G65-04, 2010. O modelo e marca da retífica plana é RPA-800 da Atlasmaq.

c) Forno elétrico para tratamento térmico

O forno de marca Jung modelo 3010 que tem como função realizar tratamento térmico foi utilizado para duas finalidades:

- > Endurecer através da tempera as amostras conforme indicado pelas literaturas;
- > Revenir os espécimes, garantindo assim a durabilidade e a tenacidade.

d) Durômetro

Neste procedimento foi utilizado o durômetro de marca Mitutoyo, modelo HV-100 para verificar a dureza das amostras antes e depois do processo térmico.

e) Abrasômetro

O abrasômetro e as partículas de abrasão servirão para acelerar o processo de abrasão conforme o diagrama da figura 4.

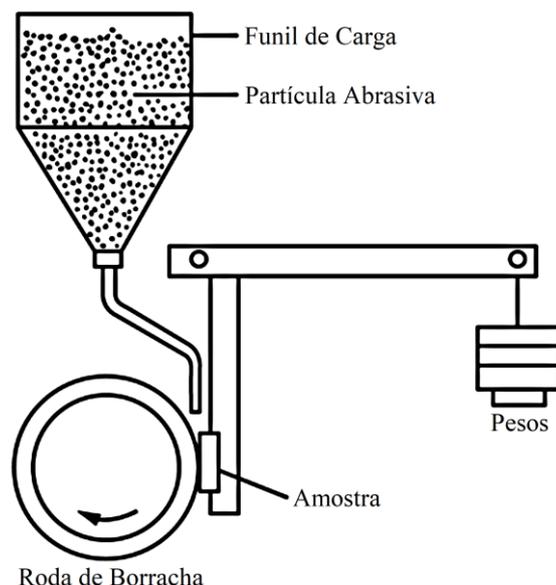


Figura 4. Diagrama de funcionamento relativo ao equipamento de teste (ASTM G65-04, 2010)

Inicialmente todos os materiais serão caracterizados por microscopia óptica para análises microestruturais.

Para assegurar a assertividade nos dados obtidos do experimento, foi necessário seguir diretrizes da norma ASTM-G65-04, 2010. Portanto, o corte na guilhotina garantiu que as amostras retiradas da chapa de aço SAE 1045, manteriam a geometria determinada.

A etapa seguir, foi garantir a padronização na espessura, paralelismo superficial e acabamento. Na norma ASTM-G65-04, 2010 no item 7.5 destaca que as amostras que passarão pelo processo de abrasão, precisariam ter a superfícies lisas, planas e livres de incrustações, tendo em vista, que porosidades e variações de rugosidades podem influenciar os resultados do teste.

Na etapa seguinte foi necessário realizar nas amostras um tratamento térmico, uma vez que o objetivo deste estudo é avaliar a resistência à abrasão dos materiais aço carbono SAE1045 e o aço inoxidável AISI 420 que são materiais que podem passar por processo térmico (CHIAVERINI, 2003). Para realizar o processo de tempera do aço SAE1045 o forno precisou atingir uma temperatura de 900°C, em seguida, foi colocada as amostras no forno. Com as amostras dentro forno o tempo de encharque foi de 1800s. O resfriamento foi feito em recipiente com água fria (temperatura ambiente). Para normalizar as tensões em função da tempera, foi necessária realizar o processo de revenimento (CHIAVERINI, 1996). Este procedimento foi realizado a uma temperatura de 600°C pelo tempo de 100s. Desta forma, as amostras do aço SAE1045 alcançaram uma dureza de média de 226,98 HV (vide tabela 3). No processo de tempera do aço inoxidável AISI420, as amostras foram colocadas no forno frio e aquecido até atingir uma temperatura de 1050°C, a uma taxa de

aquecimento de 100°C/s mantendo as amostras na temperatura programada por 1800s conforme recomendação do fabricante. O resfriamento ocorreu em recipiente aberto (resfriada pelo ar) em temperatura ambiente. Para normalizar as tensões em função da tempera, foi necessária realizar o processo de revenimento (BONIARDI e CASAROLI, 2014). Este procedimento foi realizado a uma temperatura de 600°C pelo tempo de 1800s. Desta forma, as amostras do aço inoxidável AISI 420 alcançaram uma dureza de média de 286,20 HV (vide tabela 3).

A extração dos dados referente ao experimento a abrasão, foi em função do procedimento enquadrado pela norma ASTM-G65-04 (2010). Este procedimento avalia o grau de resistência de cada amostra dos aços inox e carbono, levando em consideração o peso e as dimensões das amostras standard e resultante do teste com o abrasômetro roda de borracha.

O teste em si, envolve a abrasão de uma amostra padronizada e com grãos controlados no aspecto de tamanho e composição. A amostra e a roda de borracha são submetidas aos grãos abrasivos, dentro de uma pressão e rotação arbitrados pela norma. O tempo, a rotação da roda de borracha e o fluxo dos grãos abrasivos são controlados e a areia desgasta a superfície da amostra. Dependendo do procedimento, o tempo do teste e a pressão aplicada variam em razão da resistência a abrasão das amostras. Para determinar a abrasão que a amostra sofreu, é necessário avaliar a perda de volume (massa). Portanto, é necessário realizar o registro da massa das amostras antes e depois do procedimento. Entretanto, vale ressaltar que o ensaio de roda de borracha ainda será realizado ao longo do curso.

As informações obtidas, serão processadas e reportada em um software de modelagem estatística respeitando os métodos estáticos apresentado em literaturas do autor MONTGOMERY (2012).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mediante as investigações preliminares sobre as análises e os comparativos entre o SAE 1045 e AISI 420, ficou cognoscível que ambos materiais são incongruentes mecanicamente, ou seja, possuem propriedades distintas (vide tabela 2 e 3), no entanto, o AISI 420 pode ser aplicado em processos similares ao do SAE 1045 devido a sua aceitação ao processo de tempera (BONIARDI e CASAROLI, 2014). Um estudo de LAGUNA-CAMACHO et al., (2013) demonstrou que o desempenho por desgaste de erosão por partículas sólidas no AISI 420 comparando com os AISI 316 e AISI 304, apresentou números superiores e satisfatórios, ou seja, são indícios que o AISI 420 tem propriedades interessantes que devem ser investigados. Ainda segundo os autores, o motivo desse desempenho é em função do comportamento dúctil no AISI 420, o mesmo comportamento que é apresentado no SAE 1045 (NEVES et al, 2020).

5. CONCLUSÕES

Os testes realizados e a revisão bibliográfica mostraram que o aço inoxidável AISI 420 leva uma boa vantagem sobre as características químicas e mecânicas. No ensaio realizado de dureza por indentação no AISI 420, verificou-se uma superioridade em 26,09 % em relação ao SAE1045. Contudo, vale lembrar que o aço carbono SAE 1045 é um material comumente achado no território nacional. Outro dado importante obtido através da investigação, é em razão do aço inoxidável AISI 420 ter propriedades martensíticas, ou seja, este material pode passar por tratamento térmico com objetivo obter a tempera assim como o aço carbono 1045. Demais dados importantes serão obtidos ao longo das investigações com ensaios que serão realizado na roda de borracha, ajudando os leitores com a seleção dos materiais aqui mencionados.

4. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM-G65-04. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. 3rd ed. United States, 2010.

APERAM. Catalogue - Martensitic stainless-steel offer. 2020. 4p.

BLOG. Tipos de Aço - Tabela de Equivalências. Aço Nobre, Ferros e Aços Especiais, São Paulo, 17 de julho de 2020. Disponível em: < <https://acosnobre.com.br/blog/tipos-de-aco-tabela/>>. Acesso em: 24 de novembro de 2021.

BODENDORF F., MERKL P., FRANKE J. Intelligent cost estimation by machine learn-ing in supply management: A structured literature review. Computers & Industrial Engineering, Volume 160, 2021, 107601, ISSN 0360-8352, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107601>.

BOEHM, C. Setor de máquinas registra alta de 16,7% na receita líquida em agosto. Agencia Brasil, Brasília, 29 de setembro de 2021. Disponível em: < <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-09/setor-de-maquinas-registra-alta-de-167-na-receita-liquida-em-agosto>>. Acesso em: 24 de novembro de 2021.

BONIARDI, M.; CASAROLI, A. Stainless Steels. 1ª ed. Brescia: Lucefin. 2014. 235p.

BUYUKSAGIS I.S., GOKTAN R.M. Investigation of marble machining performance us-ing an instrumented block-cutter. J. Mater. Process. Technol., 169 (2005), pp. 258-262, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.03.014>.

CASTRO V.V., FONTOURA L. A. M., BENFICA J.D., PACHECO M. S. J. L., SANTOS C. A. Lubricated sliding wear of SAE 1045 and SAE 52100 steel against alumina in the presence of biodiesel, diesel and a 50:50 blend of those fuels. Wear, Volumes 368–369, 2016, Páginas 267-277, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.09.026>.

CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. 7. ed., Associação Brasileira de Metais, 1996. ISBN-10 8577370410.

CHIAVERINI, V. Tratamentos térmicos das ligas metálicas. 5^o edição, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003. ISBN-10 8586778621.

COBB H.M. Steel Products Manual – Stainless Steel. The Iron and Steel Society, 1999, ISBN 1886362343.

DODDS S., JONES A.H., CATER S. Tribological enhancement of AISI 420 martensitic stainless steel through friction-stir processing. *Wear*, Volume 302, Issues 1–2, 2013, Páginas 863-877, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.007>.

FABBRO S., ARAUJO L.M., ENGEL J., KONDRATIUK J., KUFFA M., WEGENER K. Abrasive and adhesive wear behaviour of metallic bonds in a synthetic slurry test for wear prediction in reinforced concrete. *Wear*, Volume 476, 2021, 203690, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203690>.

GÅHLIN R., AXÉN N., JACOBSON S. The influence of tip shape in abrasion studied by controlled multiasperity surfaces. *Wear*, Volume 223, Issues 1–2, 1998, Páginas 150-156, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00321-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00321-4).

GATES J.D. “Two-body and Three-body Abrasion: A Critical Discussion,” *Wear*, 214 (1) (1998), 139-146.

GUPTA R.K. Cutting tool for marble & granite: a review. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 377 (2018), Article 012126, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012126>.

HOKKIRIGAWA, K., KATO, K. An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear. *Tribology International*, Volume 21, Issue 1, 1988, Páginas 51-57, ISSN 0301-679X, [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(88\)90128-4](https://doi.org/10.1016/0301-679X(88)90128-4).

HOKKIRIGAWA, K., KATO, K., LI, Z. Z. The effect of hardness on the transition of the abrasive wear mechanism of steels. *Wear*, Volume 123, Issue 2, 1988, Páginas 241-251, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(88\)90102-0](https://doi.org/10.1016/0043-1648(88)90102-0).

HUANG H., HUANG G., XU X., HUANG H. An experimental study of machining characteristics and tool wear in the diamond wire sawing of granite. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J.Eng. Manuf.*, 227 (2013), pp. 943-953, <https://doi.org/10.1177/0954405413478262>.

HUTCHINGS, I. SHIPWAY, P. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. 2nd. ed. UK: Butterworth-Heinemann, 2017, Páginas 303-352, ISBN 9780081009109, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100910-9.00009-X>.

ISFAHANY A. N., SAGHAFIAN H., BORHANI G. The effect of heat treatment on mechanical properties and corrosion behavior of AISI420 martensitic stainless steel. *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 509, Issue 9, 2011, Páginas 3931-3936, ISSN 0925-8388, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.12.174>.

JOST, H.P. *Lubrication (tribology) education and research*. London, 1966.

LAGUNA-CAMACHO J.R., MARQUINA-CHÁVEZ A., MÉNDEZ-MÉNDEZ J.V., VITE-TORRES M., GALLARDO-HERNÁNDEZ E.A. Solid particle erosion of AISI 304, 316 and 420 stainless steels. *Wear*, Volume 301, Issues 1–2, 2013, Páginas 398-405, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.12.047>.

MONTGOMERY; D. C. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, Inc. 8 ed, 2012.

NEVES R.S., FERREIRA G.V., MALCHER L. Gurson-based incremental damage in fatigue life estimate under proportional and non-proportional loading: Constant amplitude and low cycle regime applications. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Volume 108, 2020, 102678, ISSN 0167-8442, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102678>.

PRAMANIK A., BASAK A. K. *Stainless Steel-microstructure, Mechanical Properties and Methods of Application*. Nova Science Publishers, New York, 2015, ISBN 97811634820813 (eBook).

RABINOWICZ, E., DUNN, L. a., RUSSELL, P. G. A study of abrasive wear under three-body conditions. *Wear*, Volume 4, Issue 5, 1961, Páginas 345-355, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(61\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(61)90002-3).

SALAH S., KAZEMPOUR M., NASIRI A. Effects of microstructural evolution on the corrosion properties of AISI 420 martensitic stainless steel during cold rolling process. *Materials Chemistry and Physics*, Volume 258, 2021, 123916, ISSN 0254-0584, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123916>.

SILVA A.L. *Aços e Ligas Especiais 2^a edição*. Editora Blucher, São Paulo, 2006, ISBN 8521203829.

STACHOWIAK G. W., BATCHELOR A.W., STACHOWIAK G.B. 2 – *Simulation of Wear and Friction*. Tribology Series, Elsevier, Volume 44, 2004, Páginas 13-23, ISSN 0167-8922, ISBN 9780444515896, [https://doi.org/10.1016/S0167-8922\(04\)80018-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8922(04)80018-X).

SERIACOPI, V. Evaluation of abrasive mechanisms in metallic alloys during scratch tests: a numerical-experimental study in micro-scale. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SILVA, A. L., MEI, P. R., *Aços e Ligas Especiais*, 2. ed. São Paulo. Edgard Blucher, 2006.

USIMINAS S.A. Certificado de Inspeção. Ipatinga, M.G, Brasil, p.1, 2022.

WILLIAMS J.A., Y. XIE. The generation of wear surfaces by the interaction of parallel grooves. *Wear*, Volume 155, Issue 2, 1992, Páginas 363-379, ISSN 0043-1648, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(92\)90095-P](https://doi.org/10.1016/0043-1648(92)90095-P).

ZUM GAHR, K. *Microstructure and Wear of Materials*. 10. ed. New York: Elsevier, 1987.

ZUM GAHR, K. Wear by hard particles. *Tribology International*, Volume 31, Issue 10, 1998, Páginas 587-596, ISSN 0301-679X, [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00079-6).