



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS



Dissertação de Mestrado

Heine Stuart Moura Quintão

**DESEMPENHO TRIBOCORROSIVO DO AÇO CARBONO E INOXIDÁVEL PARA
APLICAÇÃO NO SETOR DE CONCRETO**

Timóteo

2025

Heine Stuart Moura Quintão

**DESEMPENHO TRIBOCORROSIVO DO AÇO CARBONO E INOXIDÁVEL PARA
APLICAÇÃO NO SETOR DE CONCRETO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Leonel Muniz Meireles

Coorientadores: Prof. Dr. Valmir Dias Luiz

Dr. Wilian da Silva Labiapari

Timóteo

2025

Q7d Quintão, Heine Stuart Moura.
Desempenho tribocorrosivo do aço carbono e inoxidável para aplicação no setor de concreto / Heine Stuart Moura Quintão. – 2025. 70 f. : il.
Orientador: Leonel Muniz Meireles.
Coorientadores: Valmir Dias Luiz e Wilian da Silva Labiapari

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Timóteo, 2025.
Bibliografia.

1. Aço-carbono. 2. Aço inoxidável. 3. Tribocorrosão. 4. Engenharia de Materiais. I. Meireles, Leonel Muniz. II. Luiz, Valmir Dias. III. Labiapari, Wilian da Silva. IV. Título.

CDU: 620.194-034.14



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS
GERAIS
COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE MATERIAIS - NS



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 26 / 2025 - POSMAT (11.52.07)

Nº do Protocolo: 23062.049076/2025-71

Belo Horizonte-MG, 12 de setembro de 2025.

Aos doze dias do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e cinco, às 19h00min, no Auditório do Campus Timóteo do CEFET-MG, instalou-se a banca examinadora de dissertação de mestrado do aluno **Heine Staurt Moura Quintão**. A banca examinadora foi composta pelos professores Dr. **André César Martins de Miranda**, APERAM, examinador externo, **Willian da Silva Labiapari**, APERAM, examinador externo, **Almir Silva Neto**, CEFET-MG, examinador externo, **Fernando Castro de Oliveira**, CEFET-MG, examinador interno, **Valmir Dias Luiz**, CEFET-MG, coorientador e **Leonel Muniz Meireles**, CEFET-MG, orientador. O Prof. Leonel Muniz Meireles, Presidente da sessão pública da defesa de dissertação, deu início a abertura dos trabalhos, que, após apresentar os membros da banca examinadora e esclarecer a tramitação da defesa, solicitou ao candidato que iniciasse a apresentação da dissertação, intitulada *Desempenho tribocorrosivo do aço carbono e inoxidável para aplicação no setor de concreto*. Concluída a exposição, o Presidente, passou a palavra aos examinadores para arguirem o candidato; após o que fez suas considerações sobre o trabalho em julgamento tendo sido **aprovado com modificações sugeridas pela banca** o candidato conforme as normas vigentes no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG. A versão final da dissertação deverá ser entregue ao programa, no prazo de 60 dias, contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora, conforme a Instrução Normativa POSMAT 02/23. Nada mais havendo a tratar, o Presidente declarou encerrada a sessão. Para constar, foi lavrada a presente ata que será assinada pelo Presidente e demais membros da Banca Examinadora.

(Assinado digitalmente em 15/09/2025 19:37)
ALMIR SILVA NETO
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMQTM (11.63.04)
Matrícula: 1036181

(Assinado digitalmente em 15/09/2025 19:01)
FERNANDO CASTRO DE OLIVEIRA
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMQTM (11.63.04)
Matrícula: 1544870

(Assinado digitalmente em 17/09/2025 08:53)
LEONEL MUNIZ MEIRELES
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DFGTM (11.63.03)
Matrícula: 1095529

(Assinado digitalmente em 15/09/2025 16:44)
VALMIR DIAS LUIZ
PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO
DMQTM (11.63.04)
Matrícula: 1809797

(Assinado digitalmente em 15/09/2025 16:52)
WILIAN DA SILVA LABIAPARI
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.576-##

(Assinado digitalmente em 15/09/2025 18:59)
ANDRÉ CÉSAR MARTINS DE MIRANDA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: ###.###.436-##

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **26**, ano: **2025**, tipo: **ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**, data de
emissão: **12/09/2025** e o código de verificação: **1ca9f8b508**

RESUMO

A construção civil é um dos principais segmentos da indústria nacional, devido ao seu impacto social e econômico. Notoriamente, o equipamento mais utilizado para misturar os materiais constituintes do concreto (areia, cimento, água e brita) é a betoneira planetária. Neste contexto, esta pesquisa visou estudar os fenômenos tribocorrosivos que ocorrem dentro deste tipo de betoneira, bem como analisar o desempenho de diferentes tipos de aços utilizados na fabricação de equipamentos do setor de construção civil. Testou simultaneamente, comparou e analisou o desempenho de dois aços carbono (ASTM A36 e AHSS) e dois aços inoxidáveis (AISI 410 e o ASTM 240M). Constatou-se que os aços inoxidáveis foram mais resistentes à tribocorrosão, liderado pelo ASTM 240M e seguido pelo AISI 410. O AHSS foi o terceiro melhor no experimento tribocorrosivo, confirmando que a resistência a corrosão tem mais relevância neste ambiente tribocorrosivo e a dureza superficial como segunda característica mais importante. O aço ASTM A36, o mais usado na fabricação de betoneira, foi o que sofreu maior desgaste nos experimentos, pois é muito susceptível a corrosão pela água e tem menor resistência ao desgaste do que os demais aços testados. Comparativamente o experimento a seco foi realizado, usando os mesmos parâmetros do equipamento e tipos de aço do experimento úmido, exceto por não ter a água na mistura. O resultado do experimento a seco teve o AHSS como o menos desgastado, seguido pelo ASTM 240M, AISI 410 e por último ASTM A36. Constatou-se que a dureza superficial foi determinante na resistência ao desgaste a seco. Importante ressaltar que o desgaste a seco foi inferior ao desgaste em ambiente úmido para todos os materiais. Assim foi comprovado a sinergia da corrosão com o desgaste neste sistema tribocorrosivo, pois um intensificou o outro, gerando uma maior redução de espessura.

Palavras-chave: tribocorrosão, desgaste, ASTM 240M, AISI 410, AHSS, ASTM A36, betoneira.

TRIBOCORROSIVE PERFORMANCE OF CARBON AND STAINLESS STEEL FOR APPLICATION IN THE CONCRETE SECTOR

ABSTRACT

Civil construction is a leading industrial sector due to its social and economic impact. The planetary mixer is notably the most common equipment for mixing concrete components (sand, cement, water, and gravel). This study aimed to examine corrosive phenomena in this mixer type and analyze the performance of different steels used in construction equipment manufacturing. Experimental results were compared, and observed differences were highlighted and discussed. The study experimentod, compared, and analyzed two carbon steels (ASTM A36 and AHSS) and two stainless steels (AISI 410 e o ASTM 240M). Results indicate that stainless steels exhibited superior tribocorrosion resistance, with ASTM 240M performing best, followed by AISI 410. AHSS was the third-best in tribocorrosion tests, suggesting that corrosion resistance is paramount in this environment, with surface hardness as a secondary factor. ASTM A36, the most commonly used mixer steel, showed the most wear due to its high water corrosion susceptibility and lower wear resistance than the other steels experimentod. A dry test was also conducted using the same equipment and steel types as in the wet test, excluding water in the mixture. Dry test results showed AHSS as the least worn, followed by ASTM 240M, AISI 410, and ASTM A36. Surface hardness was crucial for dry wear resistance, with all materials experiencing less wear in the dry environment. This confirmed the synergy between corrosion and wear in this tribocorrosive system, where each factor intensified the other, leading to greater thickness reduction.

Keywords: tribocorrosion, wear, ASTM 240M, AISI 410, AHSS, ASTM A36, mixer.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por todas as bênçãos que tem me proporcionado.

Agradeço aos meus saudosos pais Helton Francisco de Assis Quintão e Ana Maria de Moura Campos Quintão, que foram essenciais para minha vida, minha formação como ser humano e profissional.

Agradeço pelo apoio incondicional à minha esposa Melissa e meus filhos Rafael e Arthur.

Agradeço ao meu orientador Leonel Muniz e coorientadores Valmir Luiz e Wilian Labiapari, por todos ensinamentos, dicas, correções e estímulos. Aprendi muito com vocês!!!

Agradeço ao CEFET-MG por ter possibilitado o desenvolvimento desta dissertação de mestrado, em especial ao POSMAT, aos funcionários e professores da unidade de Timóteo.

Agradeço a empresa Aperam South America por ter liberado o meu acesso aos laboratórios do Centro de Pesquisa, assim como os equipamentos utilizados nas análises e nos experimentos. Agradeço aos funcionários Claudio Alcântara, Tarcísio Reis, Vítor Pagani, Rodrigo, Heitor e ao colaborador Gabriel Guilherme por todo apoio e prestatividade.

Agradeço à FAPEMIG, agência financiadora, pela bolsa de mestrado.

Agradeço a Fundação Cefetminas pelo apoio realizado com o pagamento da taxa de publicação do artigo, aceito na revista internacional Results in Engineering.

Por fim, agradeço a todos os colegas do POSMAT, que juntos pudemos trocar experiências e aprender muito.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - VÁLVULA DE LATÃO EM UM COMPONENTE DO TROCADOR DE CALOR.....	17
FIGURA 2 - INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE IMPACTO DAS PARTÍCULAS EM EROSÃO NA TAXA DE DESGASTE PARA MATERIAIS DÚCTEIS E FRÁGEIS.....	18
FIGURA 3 - FLUXOGRAMA DAS CAUSAS DE FALHAS EM MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS E SUAS RESPECTIVAS PERDAS RELATIVAS SOBRE A ECONOMIA.	19
FIGURA 4 - MODOS DE INTERAÇÕES DAS PARTÍCULAS COM AS SUPERFÍCIES.	21
FIGURA 5 - A) FOTO DE UM IMPLANTE REAL DE QUADRIL E B) FOTO DAS PARTES DO COMPONENTE, EVIDENCIANDO A INTERFACE HASTE-CABEÇA MAIS DESGASTADA.....	23
FIGURA 6 - BETONEIRA PLANETÁRIA.....	32
FIGURA 7 - SUPERFÍCIE 3D DE COBRE MEDIDA COM PERFILÔMETRO.	36
FIGURA 8 – VISTA DO LABORATÓRIO COM A BETONEIRA ADAPTADA PARA EXPERIMENTOS DE DESGASTE.....	39
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA ESQUEMÁTICO DOS PROCEDIMENTOS, ENSAIOS E EXPERIMENTOS.	40
FIGURA 10 - DIMENSÃO DA AMOSTRA PREPARADA APÓS OS RASGOS DE FIXAÇÃO.....	41
FIGURA 11 – AMOSTRAS ANTES DO EXPERIMENTO: A) 410T, B) 410D E C) A36 APÓS O LIXAMENTO.....	41
FIGURA 12 - A) MATRIZ E B) EQUIPAMENTO PARA MARCAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	42
FIGURA 13 - AMOSTRA A1 DE AÇO INOXIDÁVEL 410D, MARCADA COM A GRADE.	43
FIGURA 14 – TODAS AS DOZE AMOSTRAS ANTES DO PRIMEIRO EXPERIMENTO, MARCADAS COM A GRADE AO CENTRO.....	43
FIGURA 15 - AMOSTRA DE AÇO CARBONO ENVERNIZADA.	44
FIGURA 16 - FIXAÇÃO DAS AMOSTRAS NA BETONEIRA: A) VISTA INTERNA, B) VISTA EXTERNA E C) VISTA TRANSVERSAL (ESQUEMÁTICO).	45
FIGURA 17 - MEDIÇÃO DA ESPESSURA.	47
FIGURA 18 - ANÁLISE MEV DAS AMOSTRAS DE 410D, ANTES DO EXPERIMENTO.....	50
FIGURA 19 - ANÁLISE MEV DAS AMOSTRAS DE 410T, ANTES DO EXPERIMENTO.	50
FIGURA 20 - ANÁLISE MEV DAS AMOSTRAS DE A36, ANTES DO EXPERIMENTO DE BETONEIRA.	51
FIGURA 21 - ANÁLISE MEV DAS AMOSTRAS DE AHSS, ANTES DO EXPERIMENTO DE BETONEIRA.	51
FIGURA 22 - ANÁLISE MEV DA AMOSTRA 410D, APÓS O EXPERIMENTO ÚMIDO.....	52
FIGURA 23 - ANÁLISE MEV DA AMOSTRA 410T, APÓS O EXPERIMENTO ÚMIDO.....	53
FIGURA 24 - ANÁLISE MEV DA AMOSTRA ASTM 36, APÓS O EXPERIMENTO ÚMIDO.	53
FIGURA 25 - ANÁLISE MEV DA AMOSTRA AHSS, APÓS O EXPERIMENTO ÚMIDO.	54
FIGURA 26 - ANÁLISE MEV DA AMOSTRA 410D, APÓS O EXPERIMENTO SECO.	55
FIGURA 27 - ANÁLISE MEV DA AMOSTRA 410T, APÓS O EXPERIMENTO SECO.	55
FIGURA 28 - ANÁLISE MEV DA AMOSTRA A36, APÓS O EXPERIMENTO SECO.	56
FIGURA 29 - ANÁLISE MEV DA AMOSTRA AHSS, APÓS O EXPERIMENTO SECO.....	56
FIGURA 30- ANÁLISE DE PERFILOMETRIA 3D DAS AMOSTRAS APÓS EXPERIMENTO ÚMIDO.	57
FIGURA 31 - ANÁLISE DE PERFILOMETRIA 3D DAS AMOSTRAS DE AHSS, DEPOIS DO EXPERIMENTO ÚMIDO. .	58
FIGURA 32 - ANÁLISE DE PERFILOMETRIA 3D DAS AMOSTRAS DE AHSS, DEPOIS DO EXPERIMENTO SECO.	59

FIGURA 33 - PERFILOMETRIA DO 410T: A) ANTES DOS EXPERIMENTOS, B) APÓS EXPERIMENTO ÚMIDO E C) APÓS EXPERIMENTO SECO.....	60
FIGURA 34 - ANÁLISE DE PERFILOMETRIA 3D DAS AMOSTRAS APÓS EXPERIMENTO A SECO.	60
FIGURA 35- ANÁLISE COMPARATIVA DO PARÂMETRO DE RUGOSIDADE R_a , ANTES DOS EXPERIMENTOS, APÓS O EXPERIMENTO A SECO E APÓS O EXPERIMENTO A ÚMIDO.	61
FIGURA 36 - ANÁLISE DA MICROSCOPIA OPTICA DE A) 410D, B) 410T, C) A36 E D) AHSS, APÓS O EXPERIMENTO ÚMIDO.	62
FIGURA 37 - ANÁLISE DA ESPESSURA APÓS EXPERIMENTO ÚMIDO.	63
FIGURA 38 - ANÁLISE DA ESPESSURA APÓS EXPERIMENTO A SECO.	64
FIGURA 39- CORRELAÇÃO DA DUREZA COM A REDUÇÃO DE ESPESSURA DAS AMOSTRAS, APÓS O EXPERIMENTO TRIBOCORROSIVO (ÚMIDO) E A SECO.	65

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ESPESSURA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA PADRÃO (% EM PESO) DOS AÇOS UTILIZADOS.....	37
TABELA 2 - SEQUÊNCIA DE MONTAGEM DAS AMOSTRAS NO COSTADO INTERNO DA BETONEIRA.....	45
TABELA 3 - DETALHAMENTO DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS NA BETONEIRA.....	46
TABELA 4 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA PERCENTUAL EM PESO DOS AÇOS.	48
TABELA 5 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS INOXIDÁVEIS E AÇOS CARBONO.	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
IZA	International Zinc Association
USP	Universidade de São Paulo
PIB	Produto Interno Bruto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Brasileiras
ASTM	American Society for Testing and Materials
AHSS	Advanced High Stranght Steel
DIN	Deutsches Institut für Normung
AISI	American Iron and Steel Institute
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
CCC	Cubo de Corpo Centrado
TCC	Tetragonal de Corpo Centrado
ppm	Parte por milhão
Al	Alongamento total
HV	Dureza do material na escala Vickers
L _e	Limite de escoamento
L _r	Limite de resistência

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 CORROSÃO	16
3.1.1 Corrosão generalizada.....	16
3.2 DESGASTE	17
3.2.1 Desgaste abrasivo	20
3.3 TRIBOLOGIA	22
3.3.1 Definição	22
3.3.2 Tribocorrosão.....	23
3.4 MATERIAIS APLICADOS	27
3.4.1 Aço baixo carbono	27
3.4.1.1 Aço carbono de alta resistência.....	28
3.4.2 Aço inoxidável.....	29
3.4.2.1 Aços inoxidáveis ferríticos	29
3.4.2.2 Aços inoxidáveis martensíticos.....	30
3.5 BETONEIRA PLANETÁRIA.....	31
3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	33
3.7 PERFILOMETRIA DE CONTATO.....	34
4 MATERIAL E MÉTODO	37
4.1 MATERIAIS	37
4.2 TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	37
4.2.1 Caracterização Química	37
4.2.2 Caracterização mecânica e superficial	38
4.2.3 Ensaios de tribocorrosão	38
4.2.4 Análise das superfícies de desgaste	39
4.3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
4.3.1 Procedimento experimental	39

4.3.2	Caracterização mecânica	40
4.3.3	Preparação das amostras para os ensaios de tribocorrosão	40
4.3.4	Ensaio de tribocorrosão	44
4.3.4.1	Experimento úmido.....	46
4.3.4.2	Experimento a seco.....	46
4.3.5	Análise da espessura.....	46
5	RESULTADO E DISCUSSÃO.....	47
5.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	47
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICA.....	49
5.3	ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DE DESGASTE	49
5.3.1	Análise dos mecanismos de desgaste.....	49
5.3.2	Análise do perfil da superfície.....	57
5.3.3	Análise da microestrutura	61
5.3.4	Análise da redução de espessura.....	62
6	CONCLUSÕES	66
	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

Historicamente a deterioração de componentes em uso, devido principalmente à corrosão e ao desgaste, causa grandes prejuízos econômicos e sociais, pois traz danos a diversos setores da indústria, tais como construção civil, médica, naval, mineração, agrícola, entre outras. Em 2015 a *International Zinc Association* (IZA) e a USP informaram, baseado no estudo de Jost de 1966, que o Brasil gastou cerca de R\$ 236 bilhões no ano anterior, com a reposição de equipamentos causados pelo fenômeno da corrosão, o que equivale a 4 % do PIB brasileiro (DE SOUZA MORAIS *et al.*, 2023). Em valor atualizado pelo PIB de 2024, o percentual de 4% corresponde a R\$468 bilhões. Portanto as consequências deste fenômeno são bastante críticas, pois a vida útil dos equipamentos sob a ação da corrosão é diminuída drasticamente. O desgaste das partes metálicas, além de gerar custos de manutenção, também colocam em risco a segurança e o funcionamento dos dispositivos bem como a saúde das pessoas. Por exemplo na área das ciências médicas, a corrosão e o desgaste dos implantes ortopédicos alteram significativamente a qualidade de vida do ser humano, segundo Munoz; Espallargas; Mischler (2012).

Ao entender as propriedades dos materiais bem como o comportamento em um sistema específico, é possível selecionar o material mais adequado para uma determinada aplicação. Portanto a seleção de materiais é uma etapa fundamental na execução de qualquer projeto, e é neste contexto que a Engenharia de Materiais está inserida. Além disso, conhecer e saber lidar com os fenômenos e variáveis que envolvem cada aplicação de um material, incorporando questões limitadoras como custo, manutenção e logística, são cada dia mais determinantes na viabilidade de um produto. O conhecimento mais profundo da corrosão e a sinergia existente em muitos ambientes com o desgaste mecânico, é um dos alvos de estudo da tribologia.

Este projeto surgiu do interesse de estudar a aplicação de materiais metálicos diretamente na indústria, buscando compreender o problema de desgaste acelerado das partes internas da betoneira e sugerir a substituição por aços que resistssem mais aos efeitos tribológicos. Assim ficou definido entender o sistema tribológico dentro da betoneira e testar a aplicação de materiais mais avançados para resistirem à tribocorrosão, aumentando a vida útil e disponibilidade do equipamento.

A betoneira motorizada foi inventada no início do século XX, pelo engenheiro armênio-americano Stephen Sepanian (CCS, 1962). Desde então o equipamento

evoluiu relativamente pouco, até mesmo por ele ser básico e robusto. No entanto os tipos de aços ligados evoluíram muito, sendo mais específicos para cada finalidade e possibilitando maior eficiência dos equipamentos. Para este caso pode-se citar aços inoxidáveis ferríticos, aços inoxidáveis austeníticos, aços inoxidáveis martensíticos e aços carbono de alta resistência a abrasão.

Este estudo pode trazer luz para outras aplicações sujeitas a tribocorrosão, como a mineração, agricultura, petróleo e outros equipamentos da construção civil. O fenômeno da tribocorrosão começou a ser estudado com maior frequência nas últimas duas décadas (LABIAPARI; DANIEL; DE MELLO, 2015).

Com o intuito de aprofundar ainda mais esta pesquisa e devido a complexidade e particularidades resultantes de cada sistema tribocorrosivo, um protótipo em escala laboratorial foi utilizado para simular de forma mais completa este processo e permitir um estudo mais abrangente dos materiais investigados. Além do experimento em ambiente úmido (tribocorrosivo) será realizado o experimento a seco, para assim comparar os resultados e entender ainda mais os fenômenos envolvidos.

Labiapari *et al.* (2021) realizaram um estudo sobre o desempenho de diversos aços em ambiente tribocorrosivo em caminhão betoneira. Por se tratar de materiais de maior valor comercial em comparação aos aços mais comuns, obviamente houve um aumento de custo de fabricação. No entanto, a longo prazo, a substituição mostra-se mais viável devido ao aumento significativo da vida útil do equipamento e redução dos gastos com manutenção.

Desta maneira os aços a serem investigados neste trabalho foram definidos: ASTM A36 (o aço carbono de uso mais comum e foi utilizado como referência comparativa com os demais aços testados), o AHSS (aço carbono de alta resistência a abrasão), o AISI 410 (aço inoxidável ferrítico) e o ASTM 240 M (aço inoxidável de alta resistência a abrasão e corrosão). Um dos objetivos deste trabalho é verificar qual aço reduzirá menos a espessura em condições de uso, ou seja, qual aço possui melhor desempenho quando submetido à tribocorrosão.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo foi investigar qualitativamente o desempenho tribocorrosivo de aços carbono (ASTM A36 e AHSS) e inoxidáveis (AISI 410 e ASTM 240 M) com aplicação na indústria de concreto, utilizando uma betoneira planetária instrumentada em escala laboratorial.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Simular o mecanismo de desgaste por abrasão-corrosão em quatro diferentes tipos de aços (ASTM A36, AHSS, AISI 410 e ASTM 240 M) com o auxílio de uma betoneira planetária instrumentada;
- Analisar o efeito combinado da corrosão e desgaste na perda de espessura dos aços;
- Analisar os mecanismos de desgaste;
- Analisar o efeito do desgaste separadamente da corrosão, comparando-se estatisticamente o desempenho dos diferentes aços investigados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Corrosão

Callister e Rethwisch (2012) definem a corrosão em metais como a deterioração das propriedades para as quais o material foi projetado por ação eletroquímica e que geralmente começa na superfície. A corrosão metálica pode ser definida de acordo com a sua morfologia, classificada em:

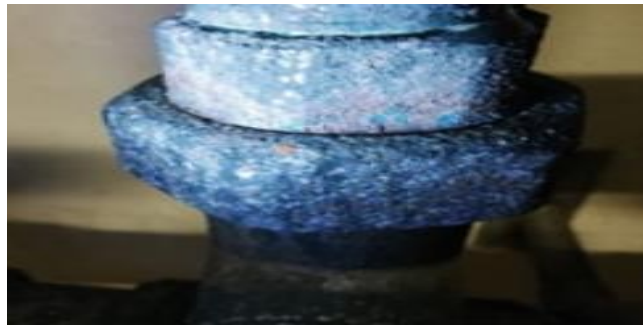
1. corrosão generalizada ou ataque uniforme;
2. erosão-corrosão;
3. corrosão galvânica;
4. corrosão em frestas;
5. corrosão por pites;
6. corrosão intergranular;
7. lixívia seletiva;
8. corrosão sob tensão.

Uma vez que a presente pesquisa aborda os efeitos do fenômeno da tribocorrosão dentro da betoneira, apenas o primeiro tipo de corrosão dos citados acima será descrito a seguir, pois é o tipo identificado por Labiapari *et al.* (2021a) como a corrosão que mais ocorre dentro do equipamento, além da corrosão-abrasão não citada.

3.1.1 Corrosão generalizada

Corrosão generalizada é o tipo mais comum segundo Callister e Rethwisch (2012), que ocorre quase uniformemente em toda a superfície exposta, formando depósitos ou incrustações, como mostrado na Figura 1. É uma forma de corrosão eletroquímica. Ocorre aleatoriamente na superfície. Geralmente é previsto nos projetos e alguma proteção adicional é programada, como por exemplo pintura ou uso de material com proteção passiva como aços inoxidáveis.

Figura 1 - Válvula de latão em um componente do trocador de calor.



Fonte: Munoz; Espallargas; Mischler (2012).

3.2 Desgaste

O desgaste é o dano causado na superfície do material devido a uma ação mecânica gerada pelo contato com gás, líquido ou sólido. O desgaste é uma das principais partes dentro da tribologia. De acordo com Zum-Gahr (1987) são quatro os mecanismos de desgaste:

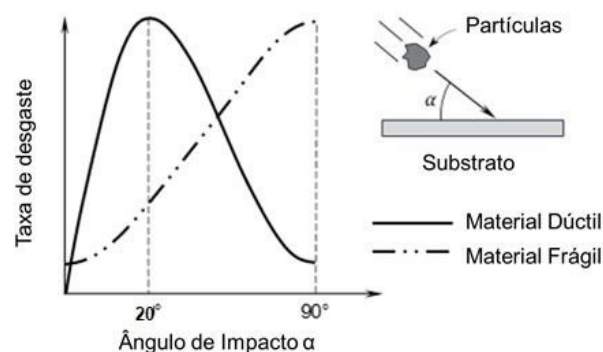
- desgaste adesivo - quando a ligação entre as superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento, tem como resultado a adesão. Ocorre então uma deformação plástica na região de contato, originando uma trinca que pode se propagar até romper e gerar um terceiro corpo;
- desgaste abrasivo – quando é removido material da superfície por contato com outro material mais duro por intermédio de microcorte, microsulcamento ou microtrincas;
- desgaste por fadiga – quando é ocasionado pelo alto número de repetições do movimento entre as partes;
- desgaste tribocorrosivo - quando é retirada uma camada de óxido na superfície, formada pela reação devido às interações químicas e eletroquímicas do meio. Ocorrem em meios corrosivos, líquidos ou gasosos.

Os mecanismos de desgaste ocorrem por intermédio de diversos fenômenos, que são definidos pelas mudanças complexas que geram na superfície durante o movimento. Stack e Chi (2003) constataram que, em determinadas condições, a medida que aumenta a velocidade entre dois corpos, aumenta o desgaste para uma mesma carga, até chegar num pico, quando começa a cair. Foi medido o potencial da

corrente por dois eletrodos. Utilizado uma solução de NaHCO_3 0,5 M + Na_2CO_3 0,5 M preparada com água desionizada. O aumento da velocidade entre o pino e o anel (produzidos a partir de um mesmo aço carbono), aumenta a temperatura do sistema, o que favorece a formação de uma película triboquímica protetora e a partir de então reduz o desgaste. Isto comprova que normalmente, o desgaste ocorre por mais de um mecanismo, portanto, o entendimento de cada mecanismo de desgaste é fundamental.

O desgaste é consequência direta da cinemática do sistema, dependendo do tipo de interação e do movimento das interfaces. É influenciado pelo modo de como é realizado o contato entre as superfícies dos corpos: deslizamento, rolamento, erosão (impacto) e oscilação. A erosão ainda tem os tipos decorrentes do estado físico do contra corpo (sólido, líquido ou gasoso) ou pelo ângulo de ação (alto ou baixo). Pesquisa realizada demonstra que o ângulo de 20 °C provoca mais desgaste do que o de 90 °C em materiais dúcteis, Figura 2. Foram selecionados os aços inoxidáveis AISI 201LN, AISI 304 e AISI 410. O jateamento foi feito com granalha de aço carbono temperada AISI 1080, variando o ângulo de 20 °C a 90 °C e mantendo a pressão do ar comprimido constante. As partículas erosivas formam sulcos no material, gerando as bordas e posteriormente são arrancadas por outras partículas erosivas (MARQUES DE OLIVEIRA *et al.*, 2019).

Figura 2 - Influência do ângulo de impacto das partículas em erosão na taxa de desgaste para materiais dúcteis e frágeis.



Fonte: adaptado de Hutchings e Shipway (2017).

A equação 1 mostrada por Archard, estabelece uma correspondência entre desgaste mecânico, a área real de contato e a distância de rolamento no caso de contato com deformação plástica. Nesta equação V_{tot} é a perda de volume de

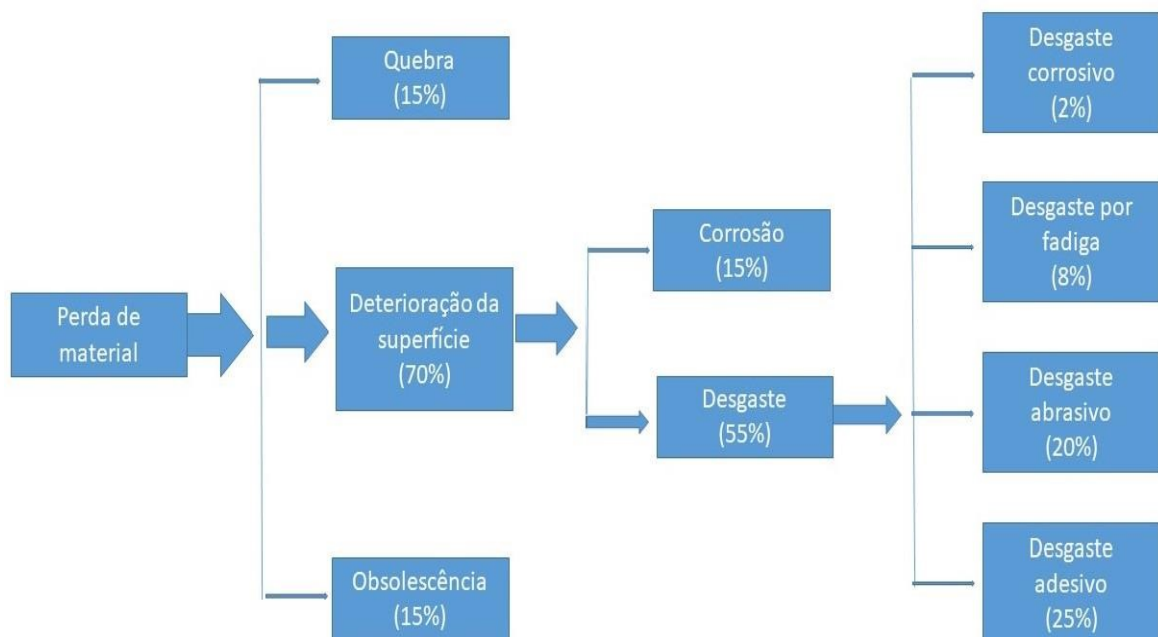
desgaste (mm^3), K é o coeficiente de desgaste adimensional, o L é a distância de deslizamento (m), F_n é a carga normal (N) e H a dureza (MPa) da superfície mais macia. O desgaste é inversamente proporcional a dureza e proporcional à força normal aplicada (F_n), à distância de deslizamento (L) e a área real de contato (A_r).

$$V_{tot} = \frac{K L F_n}{H} \quad \text{Eq. 1}$$

Outros dois fatores que também influenciam na intensidade deste mecanismo é o tamanho da partícula e a topografia da superfície. Stack e Pungwiwat (1999) demonstraram que para cada sistema de desgaste tem um tamanho ótimo da partícula que provocará mais erosão. Por outro lado, Costa *et al.* (2015) verificaram que a topografia da superfície dos corpos em contato também pode influenciar na velocidade do desgaste, principalmente quando a dureza entre os corpos é bem diferente.

O estudo dos tipos e mecanismos de desgastes são importantes, pois eles causam muito prejuízo para a economia global, gerando perdas de produtos, equipamentos e paradas para manutenção, como mostrado na Figura 3. A cada ano mais se investe no entendimento destas causas, aumentando a eficiência dos produtos e processos.

Figura 3 - Fluxograma das causas de falhas em máquinas e equipamentos e suas respectivas perdas relativas sobre a economia.



Fonte: Adaptado de Rabinowickz (1995).

3.2.1 Desgaste abrasivo

Segundo Zum-Gahr (1987), o desgaste abrasivo pode envolver perda de massa ou apenas danos na superfície. Desta forma, este desgaste pode ser definido como sendo o mecanismo que provoca a remoção de material ou o deslocamento de uma superfície, decorrente de movimento relativo com partículas duras ou por protuberâncias duras em uma ou ambas as superfícies. Estas protuberâncias podem estar na aspereza do contra corpo. Já as partículas duras encontradas no sistema podem ser oriundas do processo de desgaste de uma das partes ou externas ao sistema. Os níveis de desgaste crescem de suave até o severo, conforme a relação entre a dureza do abrasivo e a dureza da superfície desgastada.

De acordo com Hutchings e Shipway (2017), a abordagem tradicional que divide o desgaste abrasivo em dois modos (dois e três corpos) não é suficiente para descrever todos os processos de desgaste em um tribossistema. Assim sendo, o desgaste abrasivo pode ser classificado em função da dinâmica das partículas em “abrasão por deslizamento ou riscamento de partículas abrasivas” e “abrasão por rolamento de partículas abrasivas”.

Zum-Gahr (1987) e Hutchings e Shipway (2017) destacaram que as taxas de desgaste decorrentes da abrasão por deslizamento de partículas são geralmente superiores quando comparada ao desgaste causado pelo rolamento, devido ao fato das partículas livres gastarem energia rolando ao invés de removerem matéria da superfície.

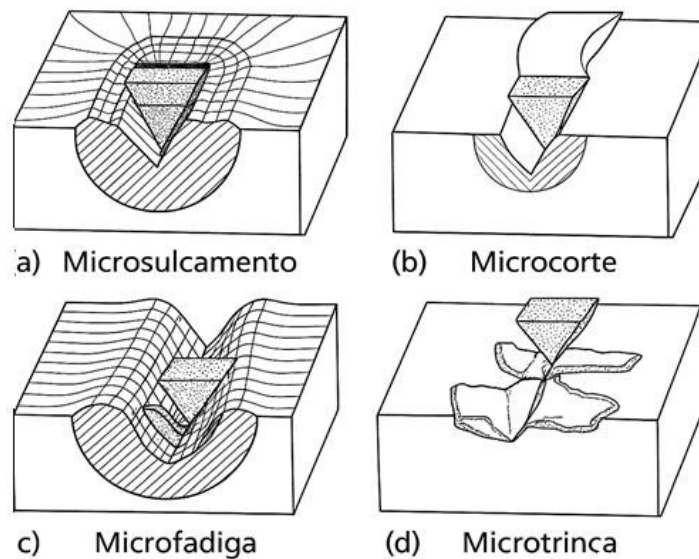
Para Cozza (2011) as denominações dos modos de desgaste podem ser simplesmente “riscamento” e “rolamento”, em função das marcas deixadas. No caso da existência mútua de ambos, ele é denominado de “modo misto” ou “desgaste abrasivo misto”.

Por outro lado, Zum-Gahr (1987) classifica o desgaste abrasivo pelo aspecto da superfície desgastada, resultante das interações físicas entre as partículas e a superfície do material. Assim sendo, as formas de remoção do material são classificadas em quatro micromecanismo: microsulcamento, microcorte, microfadiga e microtrincas.

Estes micromecanismos são descritos a seguir e ilustrados esquematicamente na Figura 4:

- a) o microsulcamento ocorre quando o material é deslocado para os lados e a frente, a interação da partícula abrasiva não resulta em retirada do material. Este micromecanismo é característico de materiais dúcteis;
- b) no microcorte ocorre a perda de material pela interação da partícula, em casos de microcorte puro ocorre a perda de volume igual ao do risco formado. Este micromecanismo é característico de materiais menos dúcteis;
- c) na microfadiga a perda de material ocorre devido a passagem sucessiva das partículas, retirando as bordas que estão no entorno dos microssulcos;
- d) nas microtrincas ocorrem a perda de massa devido a formação e propagação de trincas, resultantes de altas tensões concentradas causadas pelas partículas abrasivas. Este micromecanismo é característico de materiais com baixa tenacidade à fratura.

Figura 4 - Modos de interações das partículas com as superfícies.



Fonte: Adaptado de Zum-Gahr (1987).

3.3 Tribologia

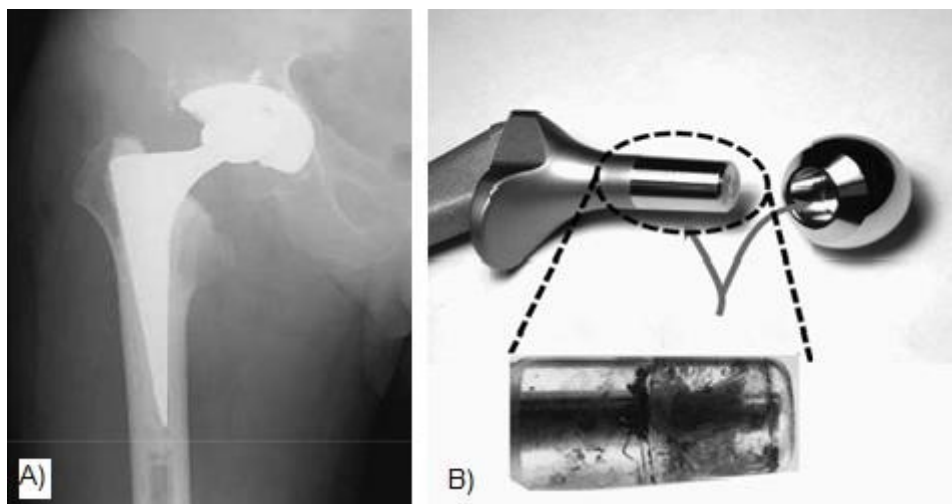
3.3.1 Definição

A tribologia é a ciência que estuda o desgaste, atrito, lubrificação e o comportamento entre superfícies interativas com outros elementos, quando em movimento relativo em sistemas naturais e artificiais. Blau (2009) explica que a origem da palavra “tribo” é grega, que significa atrito ou fricção. O termo tribologia apareceu primeiramente com o relatório de Jost (1966). Este relatório apresentava os custos com perdas relativas ao desgaste e corrosão, estimulando o surgimento de diversos centros de estudo a respeito.

Kajdas (1990) enfatiza que a tribologia é uma ciência multidisciplinar, onde envolve conhecimento das áreas de engenharia mecânica, engenharia de materiais e metalurgia, manufatura, matemática, ciência da computação, física, dentre outras. Landolt et al. (2001) citam como exemplos típicos de aplicação do aço sob efeito da tribologia o processamento de alimentos, bombas químicas e equipamentos de mineração.

Uma das vertentes da tribocorrosão é a biotribocorrosão. A biotribocorrosão é a ciência que estuda os elementos de um sistema tribológico em ambientes biológicos. Os elementos sofrem as transformações superficiais, resultantes de reações químicas/ eletroquímicas e da submissão a cargas mecânicas. A biotribocorrosão pode ser dividida em duas grandes áreas: ortopédica e odontológica. Os estudos de tribologia estão avançados nos sistemas biológicos, por isto é relevante citar a biotribocorrosão, devido principalmente a necessidade de utilização de próteses metálicas que durem mais tempo e causem o mínimo de influência no organismo (MATHEW et al., 2011). Por exemplo, na Figura 5 é mostrado um implante de quadril que desgastou com o tempo causando uma série de problemas ao paciente. Yan (2013) pontua que o perfil da superfície de um material é uma importante caracterização dos efeitos tribológicos a que foi submetido, permitindo conhecer a rugosidade, ondulação e outros aspectos superficiais.

Figura 5 - A) Foto de um implante real de quadril e B) Foto das partes do componente, evidenciando a Interface haste-cabeça mais desgastada.



Fonte: (YAN, 2013).

Em especial, a rugosidade influencia nas interações com o ambiente circundante e tem uma influência considerável sobre:

- vida útil dos materiais;
- resistência à fadiga;
- resistência à corrosão;
- lubrificação para rolamentos.

Ludema (1996) sublinha que a tribologia é dividida em quatro grandes áreas:

- mecânica dos sólidos - aborda modelos de atritos e desgaste de componentes. Enfatiza a matemática das tensões e temperatura de contato;
- mecânica dos fluidos - estuda o comportamento de lubrificantes líquidos entre superfícies em movimentos;
- ciência dos materiais - estuda os mecanismos de desgastes a nível atômico nos materiais;
- química - enfatiza na reatividade entre os lubrificantes e as superfícies em movimentos.

3.3.2 Tribocorrosão

A corrosão-abrasão é um mecanismo tribocorrosivo. Abreu *et al.* (2022) comentam mais recentemente sobre este mecanismo, que difere dos demais pelo fato

de que partículas ou protuberâncias duras em uma contraface removem o material superficial. Em seguida ocorre a corrosão do metal exposto. Inclusive em materiais metálicos que tem a formação da camada passiva, como os aços inoxidáveis e os patináveis. Nestes materiais os efeitos são importantes apesar de menos relevantes do que nos demais aços, pois sofrem com a abrasão que rompe com a camada e também expõe o metal base, e assim acelera a corrosão.

Labiapari *et al.* (2019) e Mischler (2008) salientam que o sistema de tribocorrosão é complexo, pois não é simplesmente somar a corrosão química de um material com o desgaste, verificado em laboratório. Labiapari *et al.* (2019) reforçam que os estudos em ambientes tribocorrosivos devem considerar a sinergia do desgaste com a corrosão, sendo estudados juntos. A sinergia é positiva, quando a perda de material resultante é superior à soma do desgaste e da corrosão separadamente ou sinergia negativa quando a perda de material é menor.

Os estudos de Mischler (2008) compararam as principais técnicas eletroquímicas usadas em laboratórios para analisar sistemas tribológicos. Neste caso foi usado conjuntamente com o desgaste por deslizamento e atrito envolvendo metais passivos. O desgaste torna o metal mais propenso à corrosão e inversamente a corrosão modifica as condições de atrito. Foi confirmado que atualmente existem várias técnicas eficientes disponíveis para avaliar a tribocorrosão, sendo indicadas conforme o sistema tribológico a ser avaliado.

Segundo Bateni *et al.* (2006) as simultaneidades dos fenômenos demonstraram menores taxas de desgaste. Foram realizados experimentos com tribômetro de pino constituído pelo material AISI 3Cr12, sobre disco a seco e comparados com experimentos a úmido com solução com 3,5% de NaCl em peso. As amostras de aço carbono AISI 1045 e aço inoxidável AISI 304 foram comparadas, sendo maior o desgaste do aço carbono em ambos os experimentos. No experimento seco foi identificado o mecanismo do desgaste por adesão e a delaminação como principal. No entanto, a solução 3,5% de NaCl é corrosiva e reduziu o atrito entre as partes, o que resultou num desgaste inferior nos experimentos a úmido. No seco houve aumento significativo de calor entre as superfícies, principalmente em cargas mais altas, aumentando o atrito e o desgaste.

Chen *et al.* (2014) comentam que a ação mútua dos fenômenos de deslizamento e corrosão podem aumentar a velocidade da perda de material e até mesmo no caso do aço inoxidável, que é mais resistente a corrosão, é significativo

devido ao rompimento do filme de passivação. No experimento utilizaram as ligas Ti6Al4V e o aço inoxidável AISI 316 no meio corrosivo formado pela água do mar sintética e o experimento de bancada de pino Al_2O_3 sobre o disco. Foi verificado que as densidades de corrente de corrosão para as duas ligas sob condições de deslizamento e somente corrosão aumentam rapidamente. A densidade de corrente de corrosão verificada sob condição de tribocorrosão é de três ordens de magnitude maior do que no estado passivo.

López-ortega *et al.* (2018) também verificaram que o aumento da temperatura aumenta a tribocorrosão. Eles estudaram aços carbono de alta resistência e baixa liga (HSLA) que são geralmente usados para aplicações offshore, em água marinha sintética. Foram realizados experimentos de tribocorrosão com bola-sobre-disco em duas temperaturas diferentes. Importante ressaltar que nestes aços foram verificados corrosão significativa no ambiente marítimo, com a retirada do óxido superficial expondo o metal base. Mas também onde a camada de oxihidróxido férrico ($FeOOH$) foi formada na superfície e por ser porosa, não impediu que a corrosão continuasse internamente, levando a taxas relevantes de perdas de material.

Entretanto, pode haver uma mutualidade benéfica, ou seja, reduzem o desgaste pela formação de camadas autolubrificantes que protegem a superfície de um desgaste demasiado (LÓPEZ-ORTEGA; ARANA; BAYÓN, 2018). O mecanismo de retirada da camada protetora pelo desgaste permite a corrosão geral do metal (DIOMIDIS *et al.*, 2010).

A composição química da matéria prima também influencia significativamente na taxa de desgaste do equipamento. Outros mecanismos como a interação da superfície contrária, pode influenciar na taxa de desgaste. Sendo assim, além da dinâmica do ambiente de desgaste local, a interação microfísica dos materiais constituintes influenciam no desgaste das partes (JONAS ALLEBERT, MIKAEL JUNGEDAL, 2015).

De acordo com Labiapari; Daniel; De Mello (2015) a análise sistemática para a definição dos materiais recomendados para uma determinada aplicação é muito importante. Munoz; Espallargas; Mischler (2020) sugerem ter as seguintes fases nesta análise:

- Fase I - Identificação do Problema: Inicialmente deve-se fazer uma inspeção geral do material e identificar que tipo de desgaste e corrosão ocorreram. Se necessário utiliza-se de equipamentos como

microscópios ópticos ou eletrônicos para embasar a análise. Às vezes é necessária uma análise tribológica e de corrosão mais profunda do sistema. A partir desta análise, diferentes ações podem ser implementadas no sistema, modificando algumas variáveis importantes, preferencialmente individualmente como: modificar a mecânica do sistema, alterando a carga mecânica; reduzir a corrosividade, atuando no ambiente; utilizar materiais mais adequados.

- Fase II - Descrição do Sistema (ambiente, materiais e mecânica): Nesta fase busca detalhar as informações quantitativas de cada um dos aspectos fundamentais do sistema, que são o ambiente, os materiais e a mecânica de contato. Precisa-se identificar mecanismos possíveis de tribologia. Assim indicar os experimentos de laboratório necessários, os materiais usados, o projeto mecânico dos componentes, o tipo de corrosão, o tipo de desgaste e a lubrificação existente.
- Fase III - Escolha da Configuração Experimental: A tribocorrosão pode ser avaliada experimentalmente pela possibilidade de experimento de bancada ou experimento com escala real ou experimento de laboratório. A definição do experimento depende do que se deseja verificar. Quando a intenção é reproduzir a situação real e conhecer a resposta do sistema deve-se usar experimentos de bancada ou experimentos em escala real. Quando se deseja entender os mecanismos tribológicos, quantificando o desgaste, medindo o atrito e a lubrificação, neste caso os experimentos de laboratório são mais indicados, pois permitem simular os parâmetros do sistema (ambiente, material e mecânica).
- Fase IV - Configuração Experimental: as medições eletroquímicas são usadas conjuntamente nos experimentos para estudo de tribocorrosão. Geralmente um potenciostato é acoplado ao sistema tribológico (tribômetro, máquina de fricção, microabrasão ou equipamento de erosão). Estes experimentos permitem entender o papel das reações eletroquímicas e químicas nos mecanismos de tribologia e quantificar as taxas de corrosão.
- Fase V - Interpretação dos Resultados: a análise dos resultados de um experimento tribológico pode levar a conclusão de onde atuar, concluindo se a origem do desgaste é mecânica ou química. Para isto

basta variar os parâmetros e comparar com os dados na saída. Por exemplo, variando as cargas ou a rugosidade. Deve-se considerar a contribuição para a perda total de material, aspectos químicos além dos aspectos mecânicos. Também as condições químicas e eletroquímicas do sistema devem ser consideradas (ou seja, modificação do potencial do eletrodo ou adição de algum inibidor de corrosão).

3.4 Materiais aplicados

A definição do material mais adequado para ser utilizado em cada aplicação depende de diversas variáveis técnicas, do custo e da disponibilidade. Existem três grandes classificações de materiais: metálicos, polímeros ou cerâmicos. E dentro destas classificações existem diversas alternativas de materiais, que são escolhidos dependendo da aplicação. Para a aplicação em equipamentos de mistura de concreto na construção civil, a classificação metálica é a mais indicada e dentro desta o aço é o mais indicado. O equipamento é exposto a intempéries, precisa ser deslocado durante a obra, precisa ter um baixo custo de fabricação, baixo custo de manutenção, tem que ter alta resistência ao desgaste devido a dureza dos componentes do meio, sujeito a corrosão com a água. O material precisa ter adequadas propriedades mecânicas para ser cortado em diferentes peças, conformado e montado compondo o equipamento.

3.4.1 Aço baixo carbono

O aço carbono atualmente mais utilizado para fabricação de betoneiras é o ASTM A36 (utilizaremos a denominação mais conhecida de A36). Esta classe de aço é o mais utilizado pela indústria, devido ao menor custo comparados aos aços inoxidáveis ou micro ligados; este critério ainda é determinante na escolha do material (PADILHA, 2000).

Este material é o mais simples para o processamento fabril, pois tem boa soldabilidade, tenacidade e conformabilidade. Devido a estas características, o A36 é o mais comum no mercado de aços planos e bastante usado pela indústria

metalomecânica, por exemplo, na construção de peças e equipamentos de diversos segmentos. Entretanto, são extremamente sensíveis aos efeitos da corrosão, resultando em uma maior perda de material quando comparado aos aços inoxidáveis. Tem uma quantidade de carbono inferior a 0,25% e manganês aproximadamente de 1%. O limite de escoamento é de cerca de 275 MPa e o limite de resistência à tração de 415 a 550 MPa (CHIAVERINI, 1986).

3.4.1.1 Aço carbono de alta resistência

Esta classe de aço é denominada de aço avançado de alta resistência, ou AHSS (Advanced High-Strength Steel). Estes aços estão cada vez sendo mais usados em aplicações sujeitas a desgaste intenso, pois são mais duros e ainda possuem boa conformabilidade. Segundo Ligier *et al.* (2022) alguns AHSS tem na composição química o Boro, além do Manganês, Cromo e Vanádio. O Cromo pode representar no máximo 1% do peso (enquanto no aço inoxidável ferrítico a quantidade estabelecida mínima é de 10,5%).

A adição de Boro também é realizada para o aço de alta resistência e baixa liga HSLA (*High strength low alloy*), para aplicação em amarrações off shore foi estudada por Alkan *et al.* (2024) e eles demonstraram que a adição deste elemento resulta na maior resistência mecânica. O Boro formou uma camada superficial boretada de espessura contínua e uniforme, que aumentou a proteção a corrosão. Também concluíram que a alta resistência ao desgaste reduz o efeito da tribocorrosão.

Alguns fabricantes utilizam o aço AHSS como matéria prima na fabricação de caçambas para caminhões em minas de minério e, além disso, em diversas outras aplicações sujeitas ao desgaste, tal como os setores de mineração foram apresentadas por Kronqvist (2016) e no setor de construção para aplicações onde o desgaste é relevante. Vários estudos têm sido realizados, por exemplo por Jungedal (2012), o qual demonstrou as vantagens do AHSS, pois aumenta a vida útil do equipamento e reduz o peso. No entanto, estes aços apresentam o preço mais elevado do que o aço A36.

O aço ASTM A514 é um exemplo de AHSS e foi o aço desta especificação utilizado nesta pesquisa. Este aço é muito usado em aplicações que exigem resistência ao desgaste, como no setor de mineração. Ele é usado pela indústria, em

baixa escala, na fabricação do tambor de caminhão betoneira. Em uma pesquisa realizada por Jungedal (2012), observou-se que este aço apresentou menor desgaste em comparação ao aço A36, sugerindo que ocorreu uma menor redução de espessura das chapas que compõem a estrutura do tambor da betoneira utilizada e, além disso, sem comprometer sua funcionalidade.

3.4.2 Aço inoxidável

Os aços inoxidáveis são ligas de Ferro e Cromo, devendo respeitar a composição química mínima de 11% de Cromo. O Cromo forma uma camada superficial, tipo uma película, para proteger o material da corrosão. É considerado inoxidável apenas o aço que forma a camada passiva. Esta camada é muito fina e aderente de óxido-hidróxido, rica em Cromo, que mantém esta resistência à corrosão. Elementos de liga são adicionados em função de propriedades demandadas por projetos de engenharia. As propriedades químicas e físicas podem ser modificadas com alterações na composição química ou por intermédio de algum tratamento térmico específico. Bello *et al.* (2007) pontuaram que as variáveis existentes num sistema tribocorrosivo afetam o desempenho dos diferentes aços inoxidáveis de forma específica. Portanto é de suma importância entender a aplicação para definir qual o tipo de aço inoxidável será mais apropriado. Embora existam diferentes classes de aços inoxidáveis, nas seções seguintes serão descritas apenas os aços inoxidáveis ferríticos e martensíticos. Isso porque estas classes de aços são as utilizadas no desenvolvimento do presente trabalho.

3.4.2.1 Aços inoxidáveis ferríticos

ASTM 410 ou DIN 41.003 ou AISI 410S (aqui denominado pelo fabricante como 410D) é o aço inoxidável ferrítico com menor custo. Este aço apresenta bom desempenho em atividades submetidas ao desgaste e corrosão combinados (LABIAPARI *et al.*, 2021a). No mercado este é utilizado nos projetos estruturais que necessitam de materiais resistentes à corrosão e ao desgaste simultaneamente. Em algumas aplicações o aço inoxidável ferrítico apresenta melhor desempenho do que

o aço carbono, o que justifica o uso, apesar de maior custo inicial. Labiapari *et al.* (2013) mostraram que quando ocorrem paradas no processo produtivo superiores a 1 hora, o aço inoxidável reconstitui a película protetora e o aço carbono é afetado pela corrosão.

Os aços inoxidáveis ferríticos são ligas compostas por Cromo em quantidade relevante entre 11 e 30%. Por outro lado, a quantidade deve ser reduzida de Carbono, Nitrogênio e Níquel. Possui estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), sendo magnéticos e com durezas inferiores, pois não podem ser endurecidos por tratamento térmico. A sua aplicação é definida pela resistência a corrosão, que depende basicamente de Cromo. São aplicados na fabricação de pias, coifas, baixelas, talheres, utensílios domésticos, linha branca (fornos de micro-ondas, geladeiras, fogões, máquinas de lavar roupa). Geralmente tem o custo inferior a outros aços inoxidáveis, como é o caso do austenítico. No entanto, apresentaram desempenho similar para aplicações em componentes da indústria de biocombustíveis (LABIAPARI *et al.*, 2013), justificando o uso do ferrítico. Conforme Labiapari *et al.* (2021), muitos caminhões passaram a ser fabricados utilizando o aço ferrítico 410D.

3.4.2.2 Aços inoxidáveis martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos são aços com alta dureza. Tem microestrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), sendo ferromagnéticos. E quanto maior a quantidade de carbono na liga maior é a sua dureza. São temperados e revenidos para aumentar a ductilidade e tenacidade. Por isto são parecidos com os aços carbono endurecíveis por têmpera. As adições de Níquel e de Molibdênio buscam melhorar as propriedades de corrosão e tenacidade. Entretanto toda adição deve ser bem controlada, para evitar que uma microestrutura que não é totalmente martensítica seja formada (LABIAPARI; DANIEL; DE MELLO, 2015).

Como exemplo deste tipo de aço podemos citar o ASTM A240M (ou denominação comercial Endur 300), aqui identificado como 410T, que agrega a alta resistência mecânica dos aços AHSS (*Advanced High Strength Steel*) com a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis. Esse aço inoxidável é indicado para aplicações que necessitam de alta resistência mecânica e resistência à abrasão, em ambientes agressivos e úmidos, sujeitos a corrosão. O 410T tem microestrutura

refinada e predominantemente martensítica, o que aumenta a resistência mecânica, mas mantem a soldabilidade, a tenacidade e guarda a capacidade de conformação a frio, dos aços inoxidáveis tradicionais.

A microestrutura complexa formada por ferrita e martensita revenida, apresentaram bons resultados em experimentos de desgastes realizados por micro corte e microarranhamento, ao simular o desgaste em um misturador de concreto (WANG *et al.*, 2020).

3.5 Betoneira planetária

A betoneira planetária é um equipamento usado em todo o mundo para a elaboração do concreto. O concreto é usado para fazer blocos, lajes, como também pisos. Basicamente a betoneira mistura o cimento, com agregados como cascalho e areia e a água para formar o concreto. O mercado atual exige cada vez mais a disponibilidade do equipamento, homogeneidade consistente e tempo de mistura curtos (WANKHEDE; SAHU, 2015).

Segundo Nită *et al.* (2023a) as partes internas da betoneira são submetidas, de forma intensa ao desgaste por abrasão, erosão e corrosão, ocasionados pela mistura úmida.

Existem basicamente dois tipos de misturadores de concretos: por lote e os contínuos. Entre os que são por lote, tem a divisão pelo posicionamento do eixo, que pode ser horizontal ou inclinado e com eixo vertical (VALIGI, M. C.; GASPERINI, 2007). Os misturadores (ou betoneiras) mais usados no Brasil são a de eixo inclinado e por isto foi a escolhida para esta pesquisa, Figura 6.

Figura 6 - Betoneira planetária.



Fonte: Locmais ([S.d.]).

Existem diversos fatores que influenciam na taxa de abrasão-corrosão da betoneira (FASANO; JANZ; MYERS, 2012):

- ambiente químico interno e externo;
- dureza dos componentes da mistura;
- densidade dos componentes da mistura;
- diferença da densidade da mistura;
- quantidade dos sólidos na mistura;
- forma dos componentes sólidos;
- regime do movimento dos fluidos (laminar, turbulento ou transicional);
- reologia dos fluidos;
- dureza dos componentes da betoneira que sofrem desgaste;
- módulo de elasticidade dos componentes da betoneira;
- eficiência hidráulica do impulsor;

- velocidade de impacto;
- frequência de impacto;
- ângulo de impacto.

Devido a diversidade de fatores e complexidade do processo dentro da betoneira, foi utilizado um equipamento similar a este, adaptado para os experimentos em laboratório. A betoneira planetária garante a repetibilidade dos ensaios, sendo altamente indicada para estudos experimentais (VALIGI, MARIA CRISTINA; LOGOZZO; RINCHI, 2016).

3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma das principais técnicas existentes e uma das mais utilizadas para a caracterização de superfícies e microestruturas de materiais. Pois fornece informações relevantes da superfície do material. O MEV combina profundidade de campo e resolução lateral. Seu princípio de funcionamento baseia-se na interação de um feixe focalizado de elétrons com a amostra, promovendo diversos processos físicos que geram sinais detectáveis: elétrons secundários, elétrons retroespalhados, raios X característicos, entre outros.

A fonte emissora (tipicamente tungstênio ou catodo de campo) gera um feixe de elétrons, que é acelerado em tensões na faixa de 1 kV a 30 kV. Esses elétrons atravessam lentes eletromagnéticas que focam o feixe em um ponto, sobre a superfície da amostra de diâmetro nanométrico. A medida que o feixe incide, interações inelásticas liberam elétrons secundários, cuja intensidade está correlacionada diretamente à topografia local. Um detector de elétrons secundários coleta esses elétrons e converte a corrente resultante em sinal elétrico, que é ao mesmo tempo escaneado com o movimento do feixe, gerando uma imagem topográfica de alta profundidade de campo.

Os elétrons retroespalhados (de alta energia) fornecem informação simultaneamente sobre a composição química, pois nas regiões com números atômicos mais altos produzem maior sinal retroespalhado, criando contraste de material. Complementarmente, a emissão de raios X característicos permite mapeamento elementar qualitativo e quantitativo. Para topografia tridimensional,

algoritmos de estereometria podem ser aplicados a imagens adquiridas sob diferentes ângulos de incidência.

Esses métodos ampliam o uso do MEV, tornando-o instrumento fundamental não apenas para imagens bidimensionais, mas também para a estimativa de perfis de superfície com precisão micrométrica. Como principais diferenciais do MEV podemos citar: profundidade de campo superior a 100 μm , ideal para superfícies irregulares; resolução lateral de 1 a 5 nm, permitindo a visualização de micrografias detalhadas; versatilidade analítica que permite agregar espectroscopia de raios X e detectores de elétrons retroespalhados e a definição de fases distintas pelo contraste de número atômico.

No entanto, o MEV apresenta limitações como a topografia 3D exige calibragem cuidadosa e conhecimentos de estereometria; o tempo de aquisição do equipamento relativamente longo; a necessidade de vácuo e possível destruição parcial de amostras sensíveis ao feixe de elétrons (efeito de beam damage).

3.7 Perfilometria de Contato

A perfilometria de contato é uma técnica muito utilizada para medir a rugosidade e a topografia de superfícies de materiais, principalmente em materiais metálicos e cerâmicos. As medições são realizadas por uma agulha de diamante (perfilômetro) em contato direto com a superfície, que desloca verticalmente e simultaneamente percorre em movimento linear uma determinada região programada. Os deslocamentos do diafragma de leitura (ou da ponte piezoelétrica) são convertidos em sinais elétricos, que registra a flutuação do perfil ao longo de um percurso predeterminado. Assim é possível mapear o perfil da superfície, gerando uma curva contínua do perfil ou até mesmo no final, uma imagem em tridimensional da superfície.

O equipamento típico é composto por:

- agulha de diamante com raio da ponta entre 2 a 10 μm ;
- transdutor de alta sensibilidade (capacitivo, laser ou piezoelétrico) para medir deslocamentos verticais na faixa de nanômetros;

- mesa de posicionamento que desloca a amostra ou a sonda em velocidade constante (0,1 a 10 mm/s);
- eletrônica de condicionamento e software para aquisição e análise de dados.

A rugosidade é quantificada por parâmetros estatísticos, onde podemos citar alguns que são mais usados:

- **R_a (rugosidade média aritmética):** O R_a expressa a rugosidade média, que é a média aritmética das alturas das saliências e reentrâncias em relação a uma linha média.
- **R_z (média dos cinco maiores picos e vales):** valor médio das cinco maiores diferenças de altura entre picos e vales no intervalo de medição, minimizando influência de um único defeito.
- **R_t (altura total do perfil):** diferença entre o pico mais alto e o vale mais profundo dentro do comprimento de amostragem. Destaca defeitos extremos, mas pode ser influenciado por outliers.

A perfilometria de contato tem como principais diferenciais a precisão vertical (≤ 1 nm) e a simplicidade instrumental. A imagem resultante desta técnica é essencial para estudos de desgaste, lubrificação e aderência de revestimentos. Entretanto, possui limitações que devem ser consideradas quando da escolha desta técnica: a ponta pode ser danificada por superfícies ásperas ou abrasivas; não indica propriedades mecânicas; o contato pode deformar amostras macias e é relativamente lento para grandes áreas.

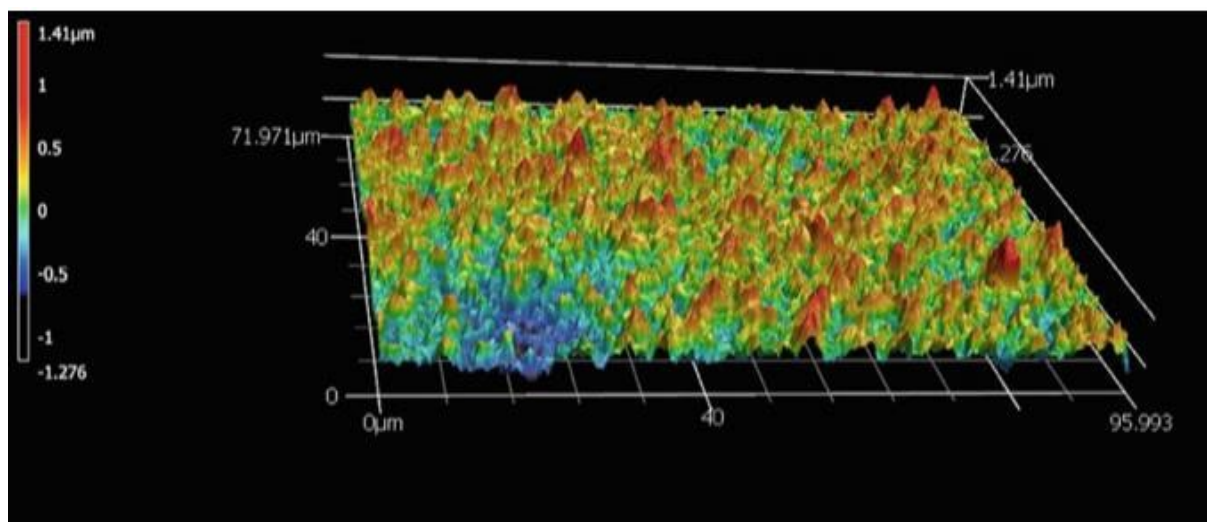
A imagem 3D permite analisar as curvaturas, a heterogeneidade da superfície, a textura, além da rugosidade linear. Este ensaio é realizado de forma rápida e não danifica a superfície, ideal para ambientes com resíduos ou filmes superficiais, pois não depende do brilho, cor ou transparência da superfície. É relativamente rápido e também não destrutivo. É normatizado por ISO 4287 e outras normas de acabamento de superfície. O rugosímetro apresenta alta resolução vertical subnanométrica, garantindo precisão em medições de desgaste.

Uma evolução deste perfil superficial é alcançada pela topografia. A representação topográfica é especialmente útil porque mostra em 3D informações

mais detalhadas do que o perfil de rugosidade, que só pode ser visualizado através de um gráfico 2D, que é bem mais limitado (YAN, 2013).

Zum-Gahr (1987) demonstrou que as superfícies de contatos na realidade são muito heterogêneas e realizadas em áreas bem reduzidas, pois apenas os picos das asperezas da superfície de cada material encontram-se em contato. A Figura 7 demonstra esquematicamente a realidade, que pode ser comprovada por equipamentos como perfilômetro ou rugosímetro. Aparentemente as superfícies são totalmente planas, principalmente no caso do aço após processamento mecânico como laminação ou posteriormente usinagem ou lixamento. Mas na realidade, mesmo após estes tratamentos superficiais, as superfícies apresentam picos e vales na topografia. Estes relevos não são visíveis a olho nu ou perceptíveis pelo tato humano por estarem na escala nanométrica, sendo captados por técnicas apropriadas como perfilometria.

Figura 7 - Superfície 3D de cobre medida com perfilômetro.



Fonte: Munoz (2020).

4 MATERIAL E MÉTODO

4.1 Materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram fornecidos pela empresa Aperam South America em forma de chapas, e dividida em dois grupos de aços: aço carbono (A36 e AHSS) e aço inoxidável (410D e 410T). A espessura das chapas (t) fornecidas e a composição química padrão são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Espessura e composição química padrão (% em peso) dos aços utilizados.

Material	t (mm)	Elemento químico (% em peso)						
		C Máx	Mn Máx	Si máx	Cr máx	Ni Máx	P máx	S máx
A36	4,75	0,25	---	0,40	---	---	0,04	0,05
AHSS	4,00	0,27	1,60	0,70	1,00	0,25	0,03	0,01
410D	5,00	0,15	1,00	1,00	11,50-13,50	0,75	0,04	0,03
410T	4,75	0,03	1,50	1,00	10,50-12,50	1,00	0,04	0,02

Fonte: ASTM A240 (2022).

4.2 Técnicas de caracterização

4.2.1 Caracterização Química

A caracterização química das amostras se deu pelas seguintes técnicas, de acordo com os elementos químicos a serem quantificados:

- carbono e enxofre foram analisados pela técnica de absorção de infravermelho, no dispositivo do fabricante Leco, modelo CS444®, norma ASTM E-1019 (2018);
- nitrogênio foi analisado pela técnica de termo condutividade usando um dispositivo do fabricante Leco, modelo TC436®, norma ASTM E-1019 (2018);
- os demais elementos químicos do aço foram analisados pela técnica de espectrofotometria, no equipamento espectrômetro de emissão óptica usando um dispositivo do fabricante ThermoARL, modelo 4460, norma ASTM E-572.

4.2.2 Caracterização mecânica e superficial

Para caracterizar as amostras quanto as propriedades mecânicas foram realizados ensaios de dureza e de tração. Na análise da dureza foi utilizado o Durômetro Universal Instron Wolpert GmbH Testor 930s (escalas Rockwell, Vickers e Brinell), segundo a norma ABNT NBR ISO 6508-1.

Para preparar o corpo de prova para o ensaio de tração, as amostras foram cortadas em uma guilhotina mecânica (Newton, modelo GMN 1306) e depois usinadas em uma fresadora CNC. Em seguida foi realizado os experimentos no equipamento Instron modelo 5583 com capacidade máxima de 150 kN.

As superfícies das amostras foram analisadas em uma área que equivale a 5 mm². Foi utilizado o perfilômetro 3D do fabricante Hommelwerke modelo T8000, modo de contato com a ponteira de raio de 5 µm e ângulo de 90°. A rugosidade utiliza de diversos parâmetros para demonstrar o perfil da superfície.

As espessuras das amostras foram medidas antes dos experimentos na betoneira. Utilizando-se o micrômetro digital Mitutoyo IP 65, de 0 a 25mm com 0,001 mm, fornecido pela Aperam South America. A medição da espessura foi realizada no CEFET-MG, campus de Timóteo, após a realização da marcação da grade no mesmo laboratório.

4.2.3 Ensaios de tribocorrosão

Os ensaios de tribocorrosão foram realizados em uma betoneira instrumentada, disponível no laboratório mostrado na Figura 8. Este equipamento encontra-se instalado no centro de pesquisa da empresa Aperam South America.

É importante ressaltar que a estrutura externa da betoneira foi mantida a de fábrica, durante todo o trabalho de pesquisa sendo que a mesma foi produzida toda no aço A36. As modificações realizadas no equipamento foram a instalação de painel de controle eletrônico para o monitoramento da quantidade de rotações e do tempo de experimento, assim como o controle da velocidade do giro. As pás internas foram retiradas para permitir a fixação das amostras, conforme seção 4.3.4.

Figura 8 – Vista do laboratório com a betoneira adaptada para experimentos de desgaste.



Fonte: Autoria própria (2025).

4.2.4 Análise das superfícies de desgaste

Na caracterização da superfície dos materiais testados, antes e depois dos experimentos, foram usados os equipamentos perfilômetro 3D, o MEV (microscópio eletrônico de varredura) e o micrômetro. Os ensaios de MEV das amostras foram realizados no equipamento do fabricante Philips, modelo XL30 LaB6.

A finalidade foi verificar e comparar o aspecto da superfície antes e após os experimentos. Identificar os mecanismos de desgaste, analisar os resultados e comparar as diferenças após os experimentos a úmido e depois a seco.

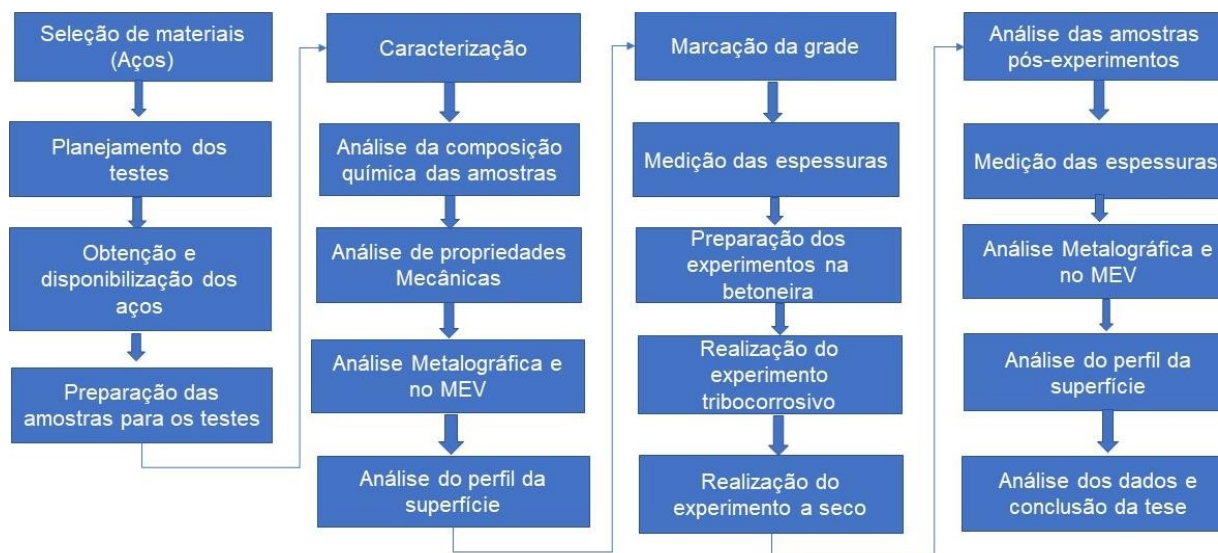
4.3 Materiais e Métodos

4.3.1 Procedimento experimental

Na Figura 9 é mostrado esquematicamente o fluxograma do procedimento experimental do presente trabalho. Os equipamentos utilizados nas caracterizações,

análises e experimentos tribocorrosivos foram disponibilizados pela Aperam South America e estão localizados nos laboratórios da mesma em Timóteo, Minas Gerais.

Figura 9 - Fluxograma esquemático dos procedimentos, ensaios e experimentos.



Fonte: Autoria própria (2025).

4.3.2 Caracterização mecânica

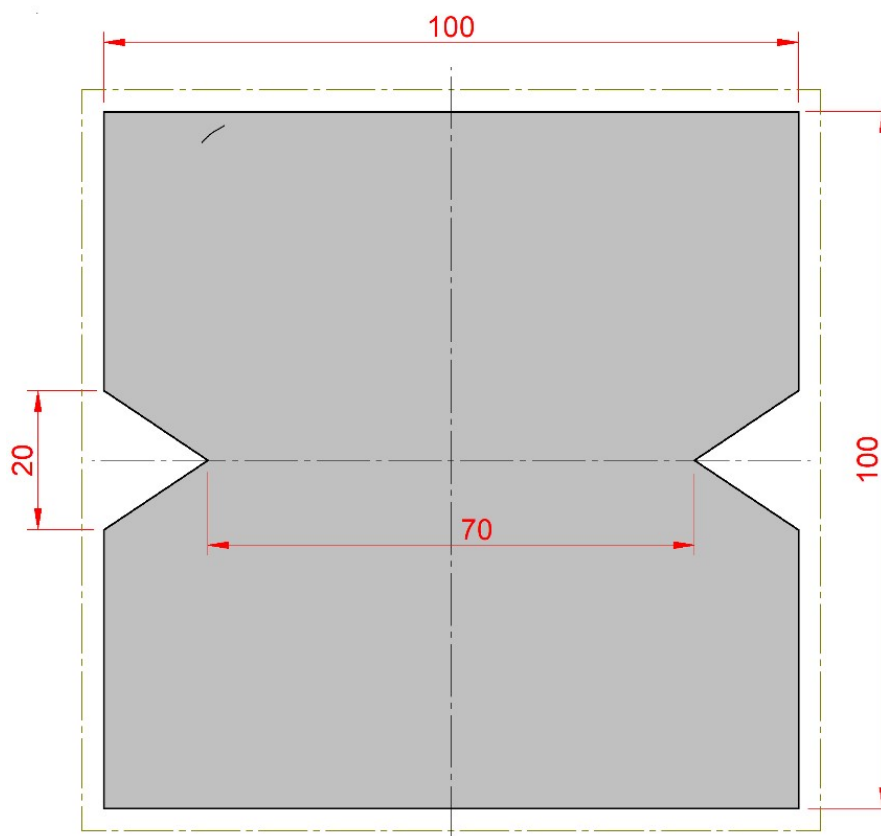
Para os ensaios de tração os corpos de prova foram preparados segundo as dimensões especificadas pela norma E8/E8M-11 (ASTM INTERNATIONAL, 2021). Os experimentos foram realizados conforme a norma ASTM A370-12.

Para os ensaios de dureza foi usada a norma ABNT NBR ISO 6508-1. O ensaio de dureza foi realizado usando a escala Vickers, para permitir a comparação entre todos materiais utilizados.

4.3.3 Preparação das amostras para os ensaios de tribocorrosão

As doze amostras necessárias para realizar os experimentos foram cortadas por guilhotina, na dimensão de 100 mm por 100 mm e identificadas. Depois foram fresados dois entalhes em cada amostra, conforme mostrado na Figura 10, para fixação da amostra com os parafusos na parede interna da betoneira.

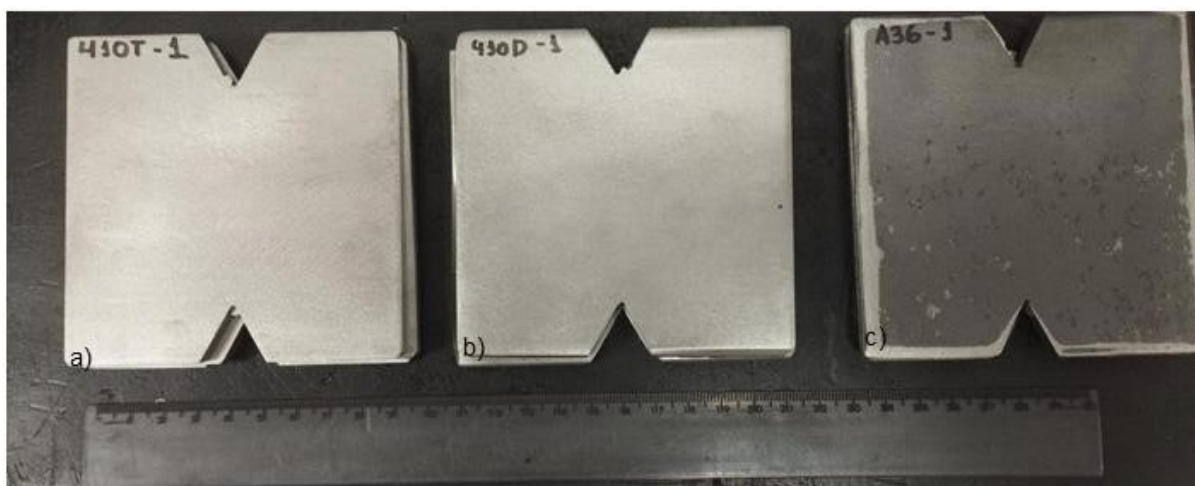
Figura 10 - Dimensão da amostra preparada após os rasgos de fixação.



Fonte: Autoria própria (2025).

Em seguida foi realizado o lixamento de cada amostra, no lado que foi exposto ao desgaste. Foi usado lixadeira mecânica com lixas de granulometria 80 e 120. A Figura 11 mostra algumas amostras após o lixamento.

Figura 11 – Amostras antes do experimento: a) 410T, b) 410D e c) A36 após o lixamento.



Fonte: Autoria própria (2025).

Para que a medição da espessura seja correta e feita na mesma região central, antes e depois dos experimentos na betoneira, é necessário fazer a marcação das amostras (LABIAPARI *et al.*, 2021a). Por esta razão foi confeccionada uma matriz em polipropileno propícia para eletromarcação. A matriz possui três colunas posicionadas no centro da amostra, formando dez fileiras de quadrados, cada quadrado com área de 10 mm². Foi registrado também o número da amostra, conforme apresentado na Figura 12a. Para realizar a marcação, ilustrado na Figura 12b, foi utilizado uma fonte de energia elétrica, com um fio de contato fixado numa placa metálica e outro no marcador. Foi usado o gravador eletroquímico (Sinais e Letras, modelo SL-300) do Laboratório de Ensaios de Materiais do DMQTM (CEFET-MG). Para a realização da marcação, o seguinte procedimento foi conduzido. Cada amostra é posicionada sobre a placa metálica e sobre a mesma, colocada a matriz de polipropileno. Foi adicionado a solução ácida sobre a matriz. Em seguida a fonte foi ligada e regulada. A medida que passa o marcador sobre a matriz a mesma é copiada na amostra. A marcação foi realizada no verso da amostra, no lado que ficou em contato com a betoneira e assim não comprometeu o desgaste e nem a corrosão. Após a marcação a amostra é lavada com sabão neutro e depois completamente secada. Por fim, foi embalada em papel especial que protegeu da corrosão ambiental.

Figura 12 - a) Matriz e b) Equipamento para marcação das amostras.



Fonte: Autoria própria (2025).

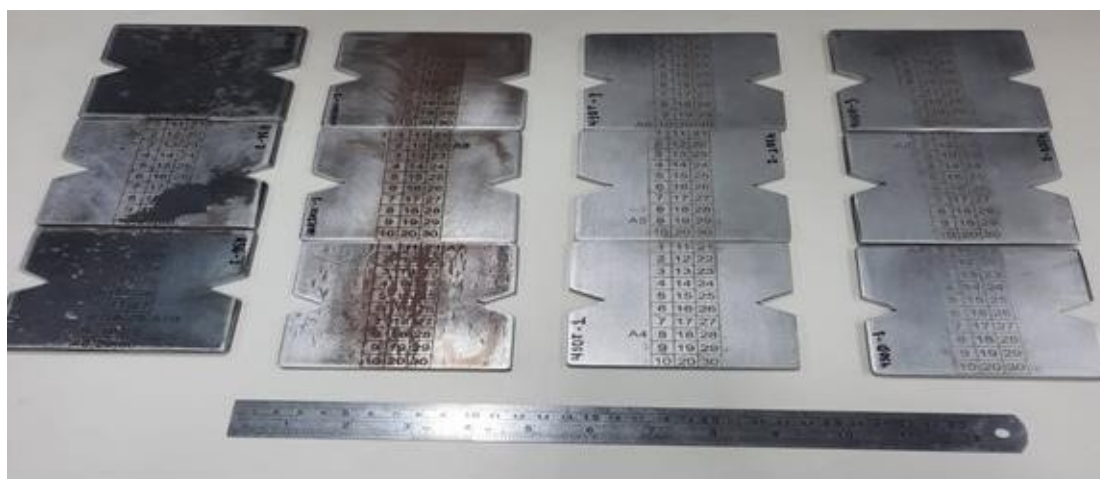
Foram realizadas as marcações em todas as amostras, como mostrada nas Figura 13 e 14. É possível com a eletromarcação ver claramente os 30 quadrados, resultantes das três colunas e dez linhas da grade. Cada quadrado é identificado por um número sequencial na planilha e nele foi realizada uma medição de espessura. A região central da amostra é onde ocorre o desgaste mais relevante durante o experimento. Por isto as medições foram concentradas nesta região.

Figura 13 - Amostra A1 de aço inoxidável 410D, marcada com a grade.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 14 – Todas as doze amostras antes do primeiro experimento, marcadas com a grade ao centro.

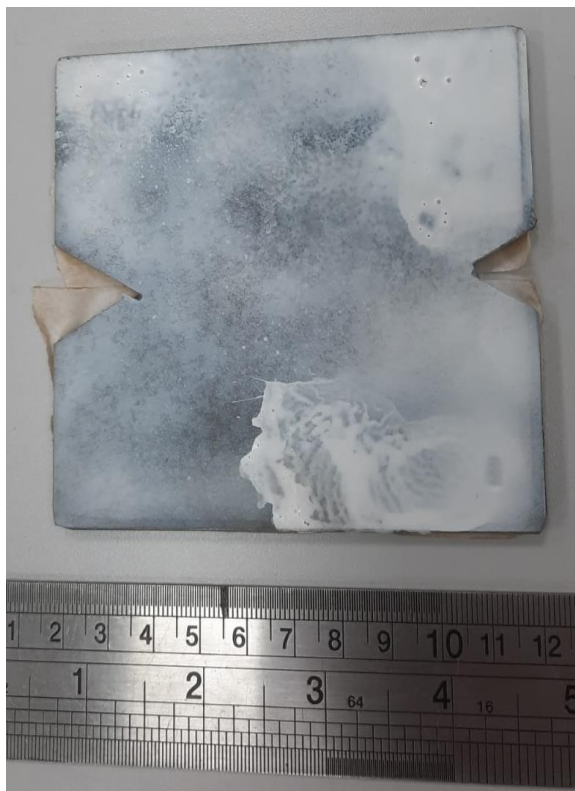


Fonte: Autoria própria (2025).

Por fim, antes do experimento úmido, as amostras de aço carbono (A 36 e AHSS) foram protegidas com verniz no lado que ficará em contato com a betoneira, como

ilustrado pela Figura 15. Assim evitou a corrosão deste lado da amostra, pois o ambiente interno da betoneira ficou úmido.

Figura 15 - Amostra de aço carbono envernizada.



Fonte: Autoria própria (2025).

4.3.4 Ensaios de tribocorrosão

Para minimizar a diferença de espessura, que era menor das amostras de AHSS para as demais, calços foram colocados no lado de contato com a betoneira para compensar. Assim buscou-se reduzir a turbulência interna da mistura e o desgaste das bordas da amostra de maior espessura.

As amostras foram identificadas e fixadas sobre a região de maior desgaste interno da betoneira, conforme apresentado na Figura 16A. A fixação da amostra na betoneira foi feita por um conjunto de fixadores de aço inoxidável, formado por um parafuso sextavado M6x40 DIN933, e uma arruela lisa 6,4 x 12 x 1,6 mm DIN 125 fixados na parte interna da betoneira. Na parte externa foram uma arruela (igual a anterior) e uma porca sextavada M6 DIN934. Para garantir a estanqueidade da betoneira foi colocado uma proteção de borracha, apresentada na Figura 16B,

evitando assim a redução da proporção da água na mistura e poluição do laboratório. Simultaneamente foram testados os quatro diferentes materiais, sendo 3 (três) amostras de cada material, conforme mostrada na Figura 16C, exatamente sob as mesmas condições.

Figura 16 - Fixação das amostras na betoneira: A) Vista interna, B) Vista externa e C) Vista transversal (esquemático).



Fonte: Autoria própria (2025).

As amostras marcadas foram fixadas na sequência apresentada na Tabela 3. Os aços foram alternados numa mesma linha circunferencial, expondo todos os quatro tipos de aço às mesmas condições dos experimentos.

Tabela 2 - Sequência de montagem das amostras no costado interno da betoneira.

Sequência	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª	11ª	12ª
Aço	410D	410T	A36	AHSS	410D	410T	A36	AHSS	410D	410T	A36	AHSS
Amostra	A1	A4	A7	A10	A2	A5	A8	A11	A3	A6	A9	A12

Fonte: Autoria própria (2025).

A mistura e seus componentes foram padronizados para todos os ciclos de cada experimento. A brita escolhida é a mais comum na mistura de concreto no Brasil, conhecida pelo nome comercial de Número 1, com a granulometria entre 9,5 mm e 19 mm. A brita foi pesada e acondicionada em pacotes padronizados individuais para cada ciclo.

Foram realizados dois experimentos, divididos em 10 ciclos, os quais foram analisados individualmente e depois comparados. Após cada ciclo foi realizada a substituição da mistura por uma nova carga. Durante todos os ciclos de cada experimento, as amostras foram mantidas fixas na betoneira.

As amostras foram submetidas a regimes de desgaste e corrosão diferentes entre os experimentos, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Detalhamento dos experimentos realizados na betoneira

Experimento	Volume de água (dm³)	Quantidade de brita (kg)	Quantidade de ciclos	Tempo total (horas)
1 – Úmido	7,5	15	10	240
2 – Seco	Não aplicável	15	10	240

Fonte: Autoria própria (2025).

4.3.4.1 Experimento úmido

O experimento foi realizado utilizando a água potável disponível no laboratório, de uso geral. A água provoca a corrosão nos aços expostos na parte interna da betoneira, inclusive as amostras.

Antes de colocar a nova carga, a betoneira foi lavada internamente para retirar toda a lama resultante. A betoneira ficou desligada apenas o tempo suficiente, de cerca de 15 minutos para retirar a mistura usada e colocar a nova. A cada ciclo ininterrupto de 24 horas a mistura é trocada. Após 10 ciclos (total de 240 horas), as amostras foram retiradas e caracterizadas. Foi um experimento tribocorrosivo.

4.3.4.2 Experimento a seco

Neste experimento não foi utilizado água, apenas 15 kg de brita. Foram também 10 ciclos de 24 horas cada, no total de 240 horas. A betoneira foi limpada apenas a seco entre cada ciclo. Os experimentos tiveram quantidade de ciclos, velocidade de giro, inclinação e tempos iguais de betoneira em funcionamento. Como o experimento foi realizado a seco, neste ocorreu apenas desgaste.

4.3.5 Análise da espessura

Após a conclusão de todos os ciclos de cada experimento, as amostras foram retiradas da fixação, limpas, lavadas e secadas. No caso das amostras de aço

carbono, após o experimento úmido, o verniz foi retirado com acetona do lado oposto ao que foi realizado o desgaste. As espessuras das amostras foram medidas após os dois experimentos na betoneira. Foi usado o micrômetro digital, conforme a Figura 17, em um ponto dentro de cada quadrado marcado. Registrou-se numa planilha o valor medido.

Para avaliar os efeitos tribológicos foi comparado a medição antes dos experimentos com a medição após os experimentos para cada ponto. Foi calculado a média da redução da espessura para cada ponto entre as três amostras de cada aço. Depois a redução média de espessura para cada tipo de aço e o desvio padrão.

Figura 17 - Medição da espessura.



Fonte: Autoria própria (2025).

5 RESULTADO E DISCUSSÃO

5.1 Composição química

A Tabela 5 apresenta a composição química medida para estes aços. É determinante a quantidade de Cromo na faixa de 11% nos dois aços inoxidáveis

usados, que garantem maior resistência a corrosão dos mesmos, enquanto os aços carbono têm menos de 1% de Cromo. O Níquel também apresenta percentualmente uma proporção bem menor no A36 e AHSS. Por outro lado, a quantidade de Carbono e Manganês são bem superiores nos aços carbono.

Tabela 4 - Composição química percentual em peso dos aços.

ELEMENTO QUÍMICO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO (% EM PESO)			
	410 D	410 T	A 36	AHSS
Carbono	0,012	0,013	0,138	0,231
Manganês	0,554	0,549	1,060	0,790
Alumínio	0,002	0,002	0,033	0,040
Molibdênio	0,017	0,013	0,005	0,140
Titânio	0,003	0,003	0,001	0,024
Silício	0,488	0,496	0,010	0,285
Cromo	11,110	11,130	0,010	0,970
Níquel	0,330	0,320	0,010	0,030
Boro	-	-	-	0,001
Nitrogênio(ppm)	173	159	26	52
Cobre	0,050	0,040	0,050	0,020
Estanho	0,006	0,005	0,004	0,006
Cobalto	0,017	0,017	0,002	0,004
Vanádio	0,029	0,029	0,001	0,006
Nióbio	0,012	0,010	0,001	0,010
Fósforo	0,027	0,028	-	0,017
Enxofre	0,001	0,001	0,019	0,002

Fonte: Autoria própria (2025).

No entanto entre os aços carbono também teve variações relevantes. O AHSS tem vários elementos de liga em quantidade superior ao A36, por exemplo Boro, Cromo, Silício, Molibdênio, Vanádio, Nióbio e Titânio. O que influenciou nos resultados.

5.2 Caracterização das propriedades mecânica

A Tabela 6 apresenta os resultados dos experimentos mecânicos realizados nas amostras iniciais, antes dos experimentos tribocorrosivos na betoneira. A dureza foi realizada na escala Vickers (HV).

O 410T apresentou maior dureza do que o 410D e menor do que o AHSS. O A36 foi o menos duro entre todos os aços. O ensaio de tração apresentou também o 410T com L_r (Limite de ruptura) e L_e (Limite de escoamento) superiores ao 410D, no entanto inferiores ao AHSS. O A36 também apresentou menores L_r e L_e entre todos, consequentemente com alongamento total maior, chegando a 32%. Observa-se que de alguma forma o alongamento total do 410T foi de 10%, inferior ao de 15% do AHSS.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis e aços carbono.

Aço	L_r (Mpa)	L_e (MPa)	Alongamento Total (%)	Dureza (HV)
410D	474,0	341,0	26,8	149
410T	950,0	834,0	10,0	291
A36	510,0	350,0	32,0	147
AHSS	1855,0	1846,0	15,0	508

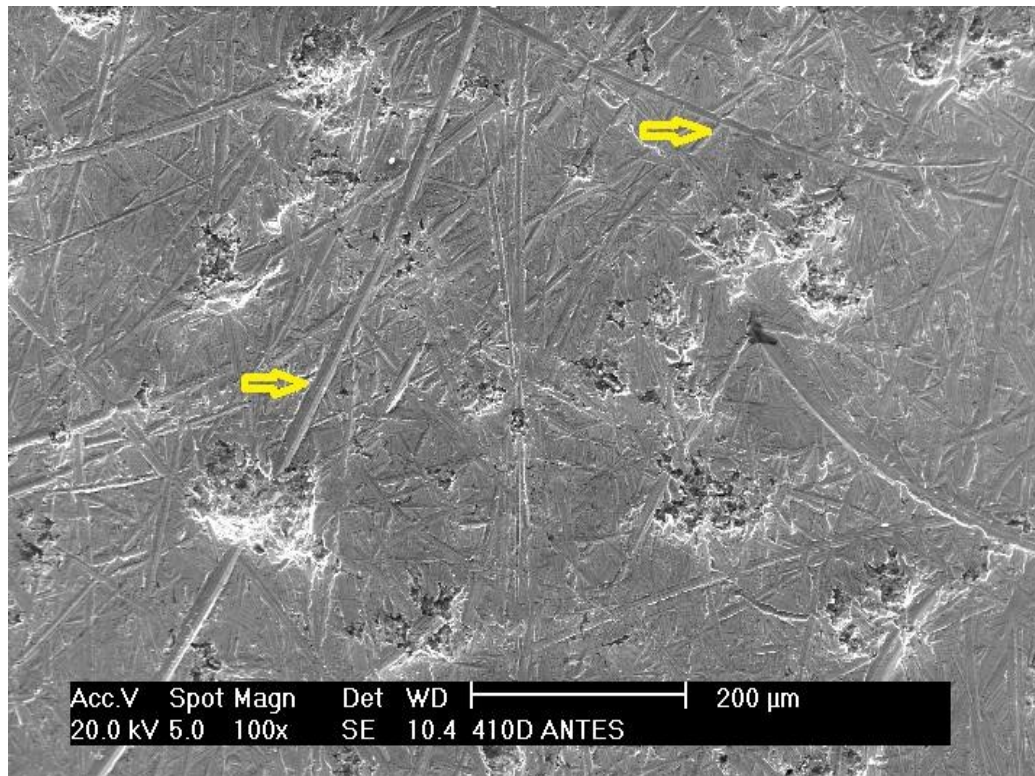
Fonte: Autoria própria (2025).

5.3 Análise das superfícies de desgaste

5.3.1 Análise dos mecanismos de desgaste

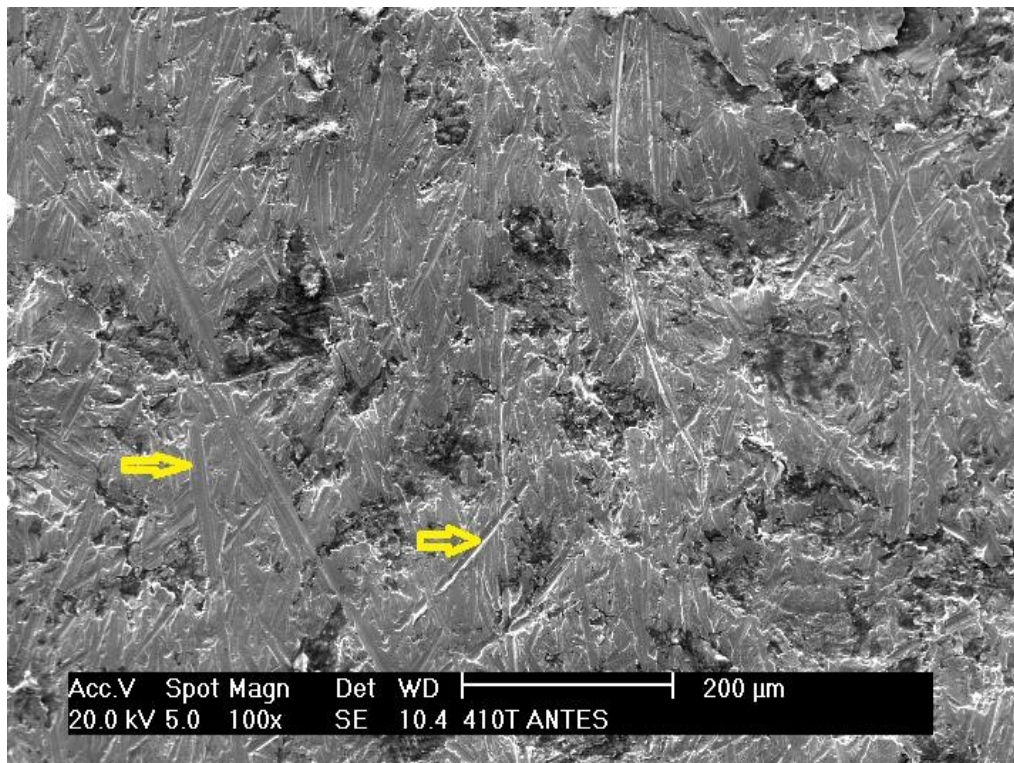
A análise da caracterização realizada no MEV dos diferentes materiais, mesmo antes dos experimentos na betoneira, já apresentavam áreas erodidas nas superfícies das amostras decorrente dos processos de fabricação e muitos riscos provenientes do lixamento (indicados pelas setas amarelas), como mostrado nas Figuras 18 a 21.

Figura 18 - Análise MEV das amostras de 410D, antes do experimento.



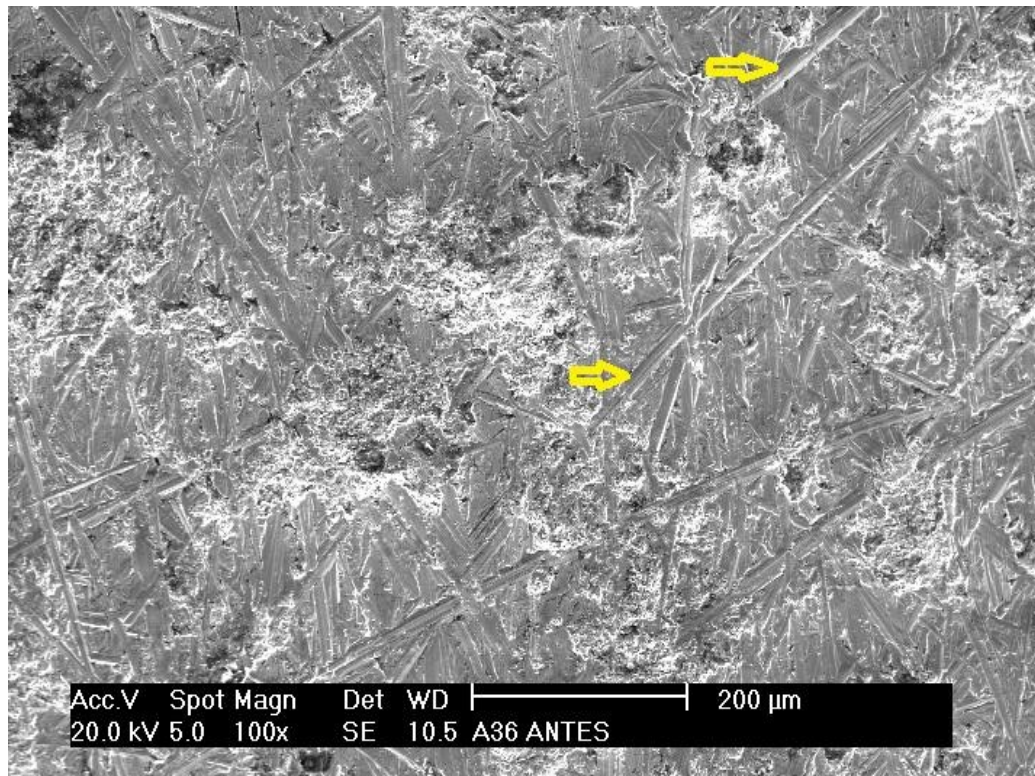
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 19 - Análise MEV das amostras de 410T, antes do experimento.



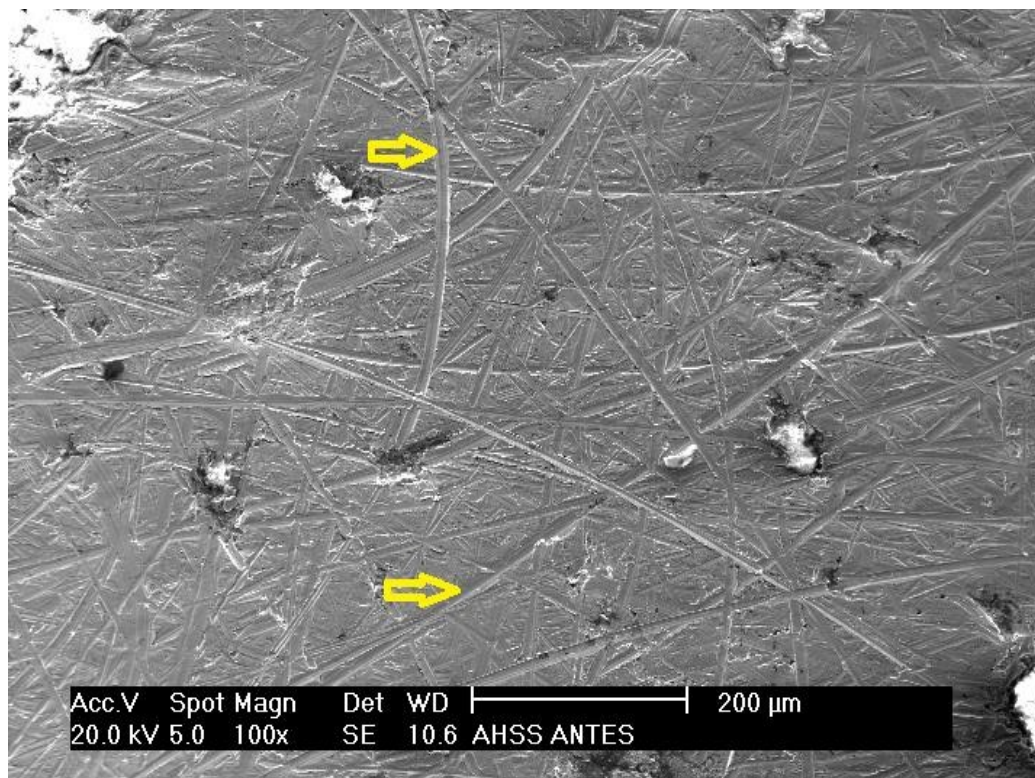
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 20 - Análise MEV das amostras de A36, antes do experimento de betoneira.



Fonte: Autoria própria (2025).

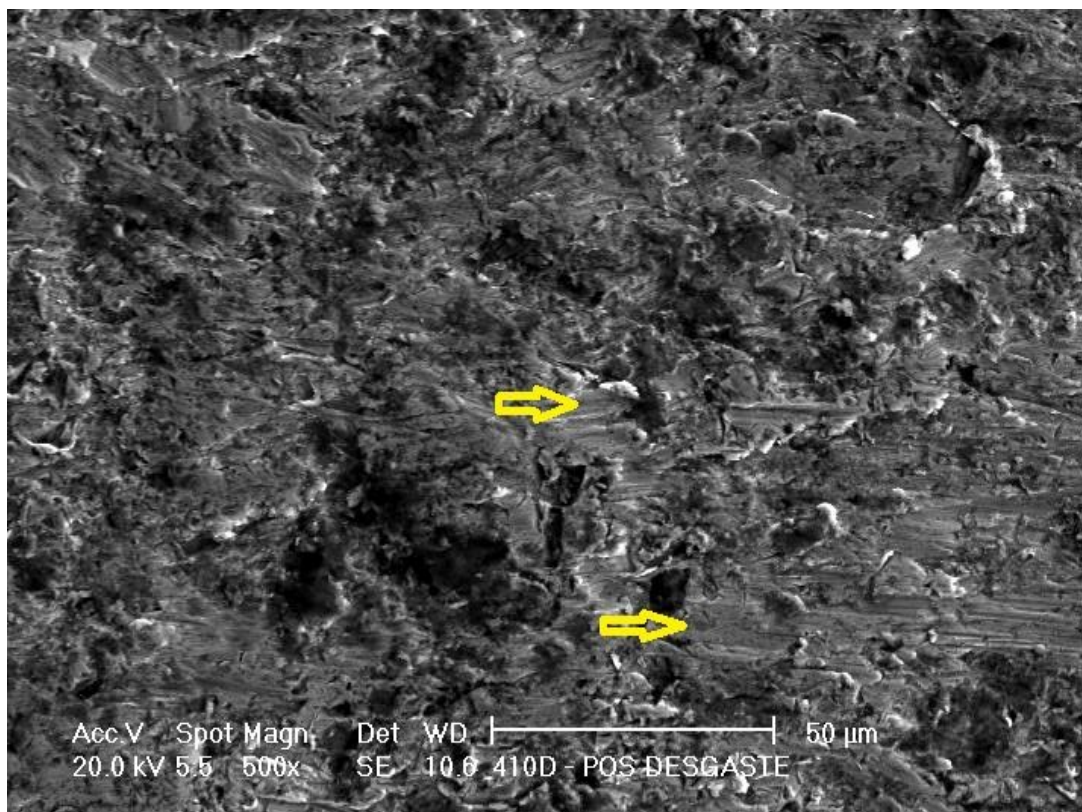
Figura 21 - Análise MEV das amostras de AHSS, antes do experimento de betoneira.



Fonte: Autoria própria (2025).

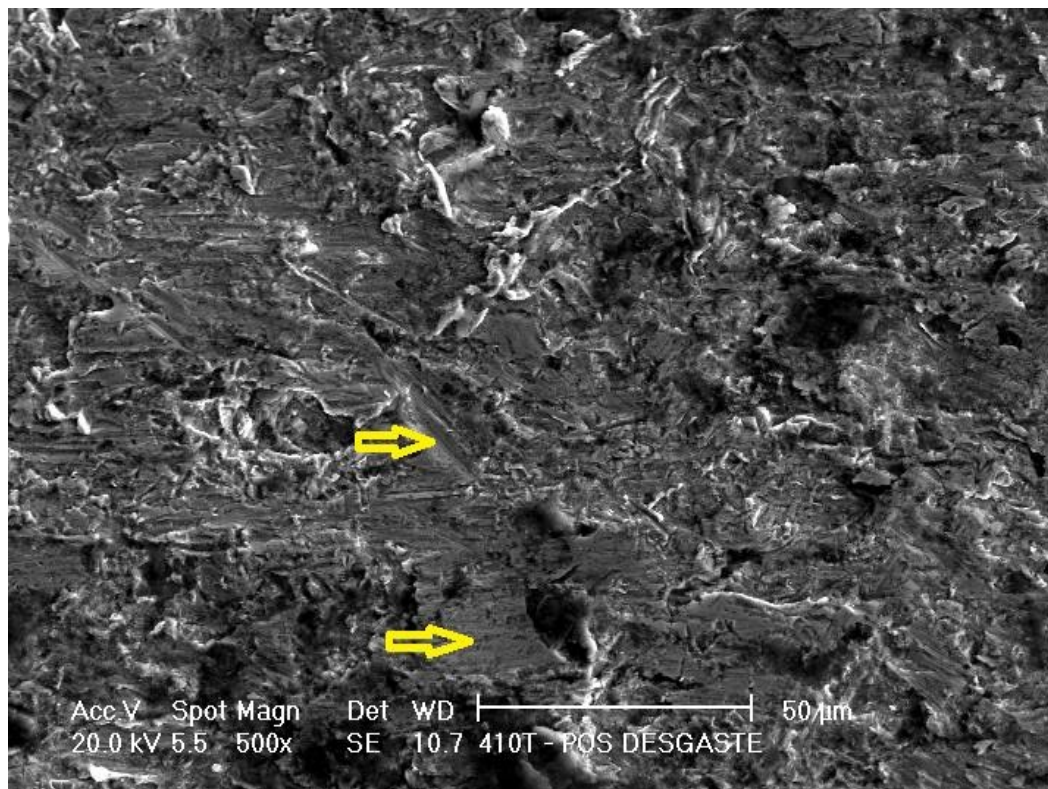
Nas análises via MEV após o experimento a úmido, conforme apresentado nas Figuras 22 a 25, estão sinalizadas pelas setas os dois mecanismos de desgastes que ocorreram com frequência, o riscamento em primeiro e segundo o rolamento provocado pela brita nas superfícies das amostras. Não é possível identificar mais as marcas de fabricação ou as contínuas decorrentes do lixamento, pois a superfície foi modificada principalmente pela abrasão-corrosão, característico da tribocorrosão.

Figura 22 - Análise MEV da amostra 410D, após o experimento úmido.



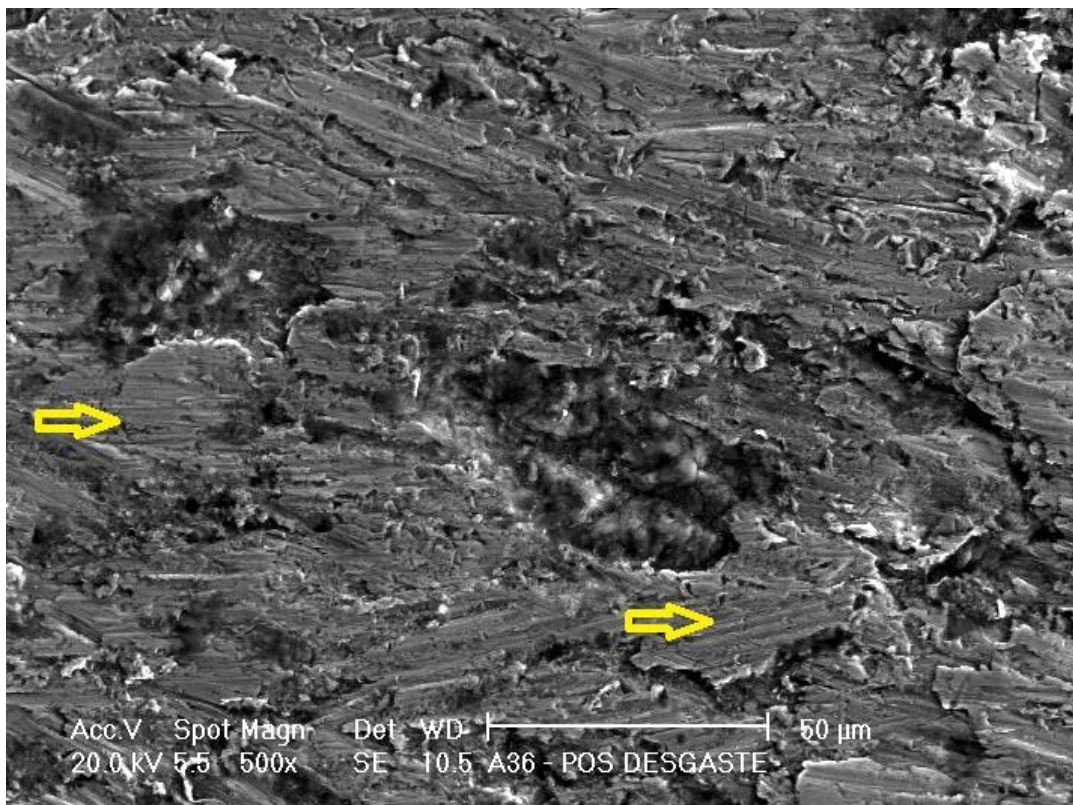
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 23 - Análise MEV da amostra 410T, após o experimento úmido.



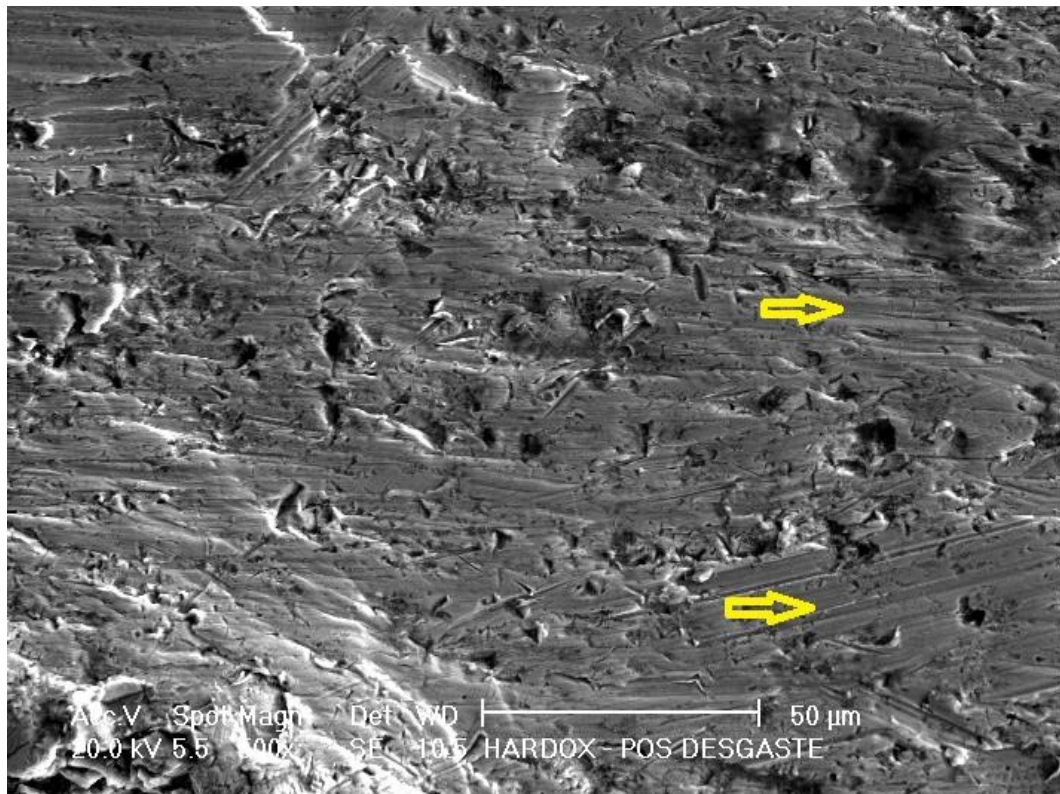
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 24 - Análise MEV da amostra ASTM 36, após o experimento úmido.



Fonte: Autoria própria (2025).

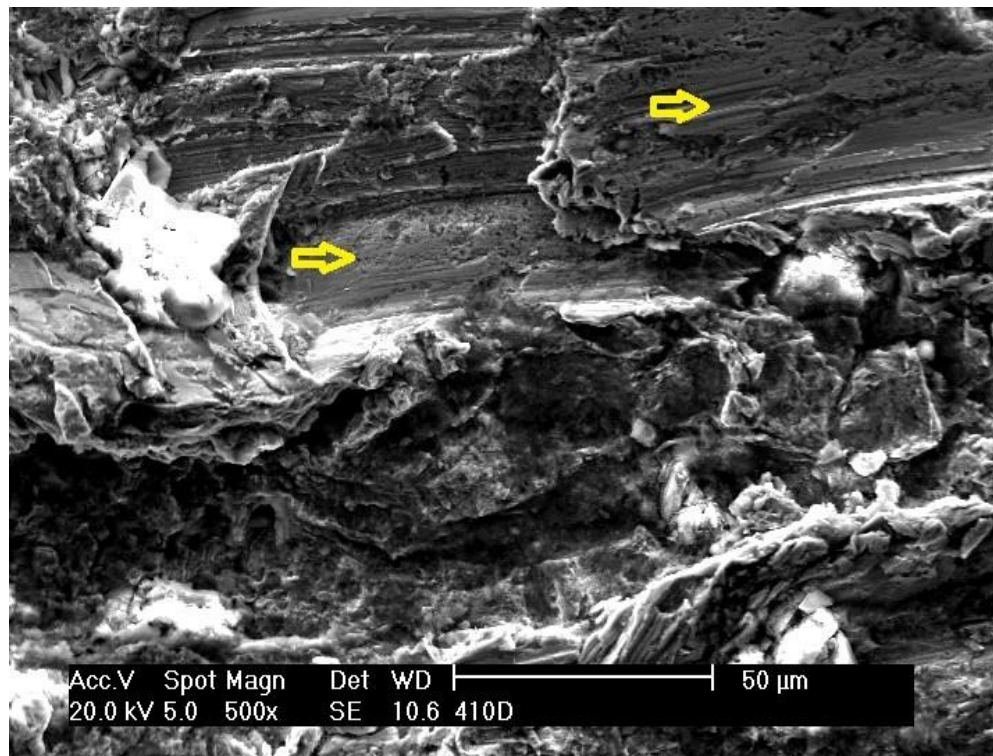
Figura 25 - Análise MEV da amostra AHSS, após o experimento úmido.



Fonte: Autoria própria (2025).

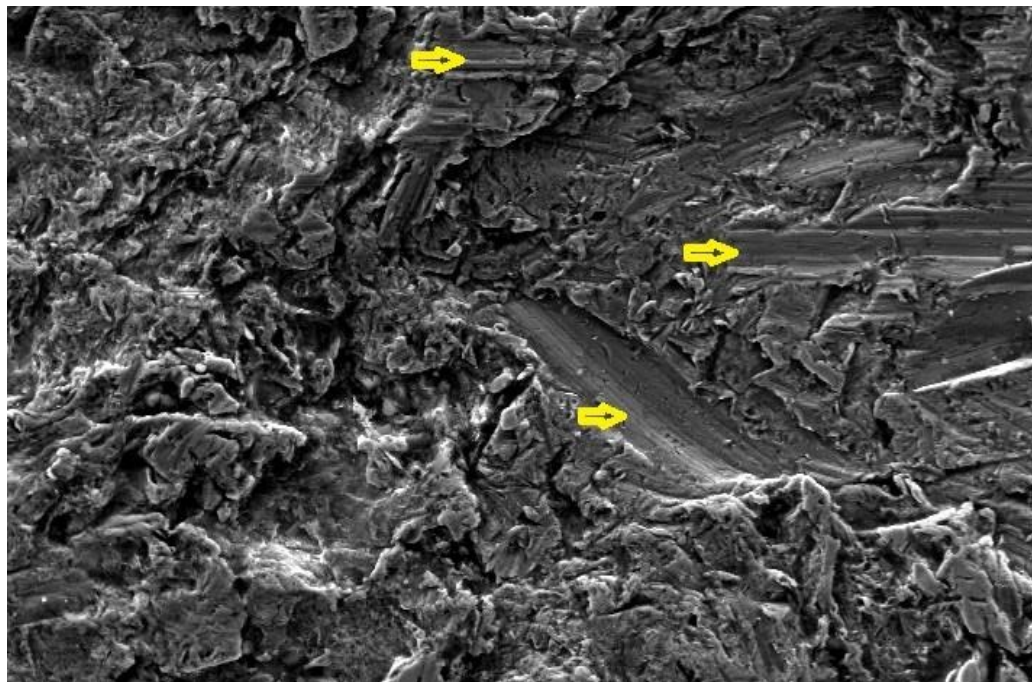
Após o experimento a seco, também foram realizadas as análises decorrentes da caracterização via MEV das amostras. Foram evidenciados pelas setas amarelas os mecanismos de desgaste, predominando o riscamento e depois o rolamento no 410D Figura 26, 410T Figura 27 e AHSS Figura 28. No A36 Figura 29 predominou o rolamento, mas teve o riscamento também. O fato do A36 ter menor dureza favorece a deformação plástica e assim predomina o rolamento sobre a superfície. Por outro lado materiais mais duros como o AHSS, que tem estrutura refinada e alta dureza, resistem mais ao impacto e desgaste, sendo mais susceptíveis a riscamentos pela brita (BIAŁOBRZESKA, JASIN, 2023).

Figura 26 - Análise MEV da amostra 410D, após o experimento seco.



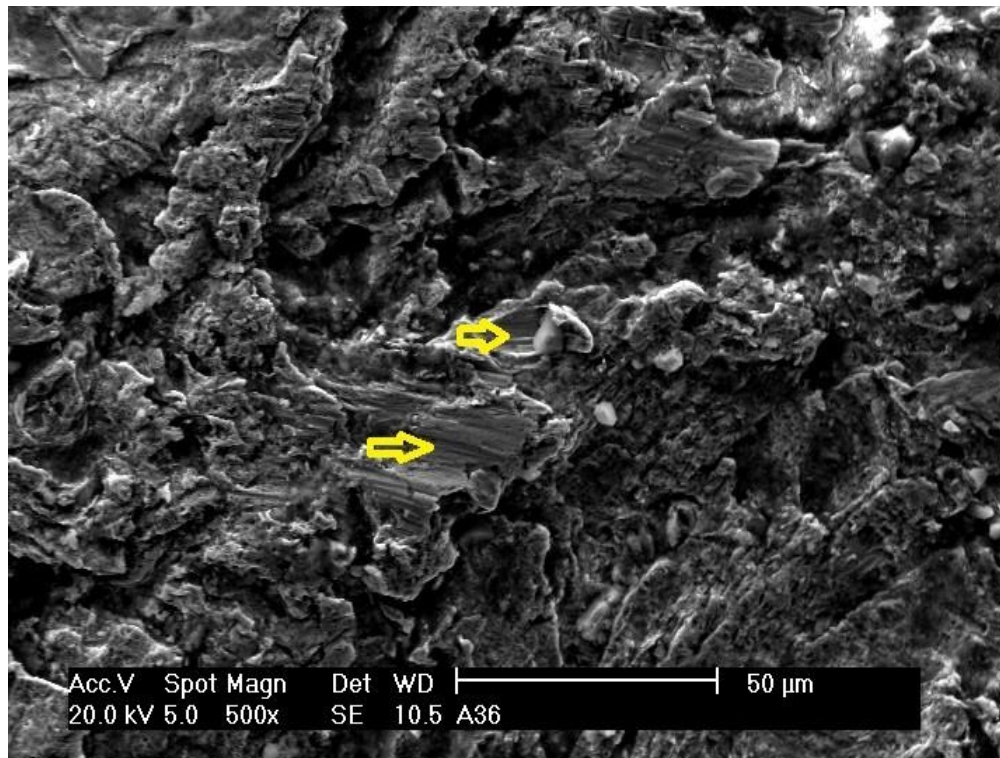
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 27 - Análise MEV da amostra 410T, após o experimento seco.



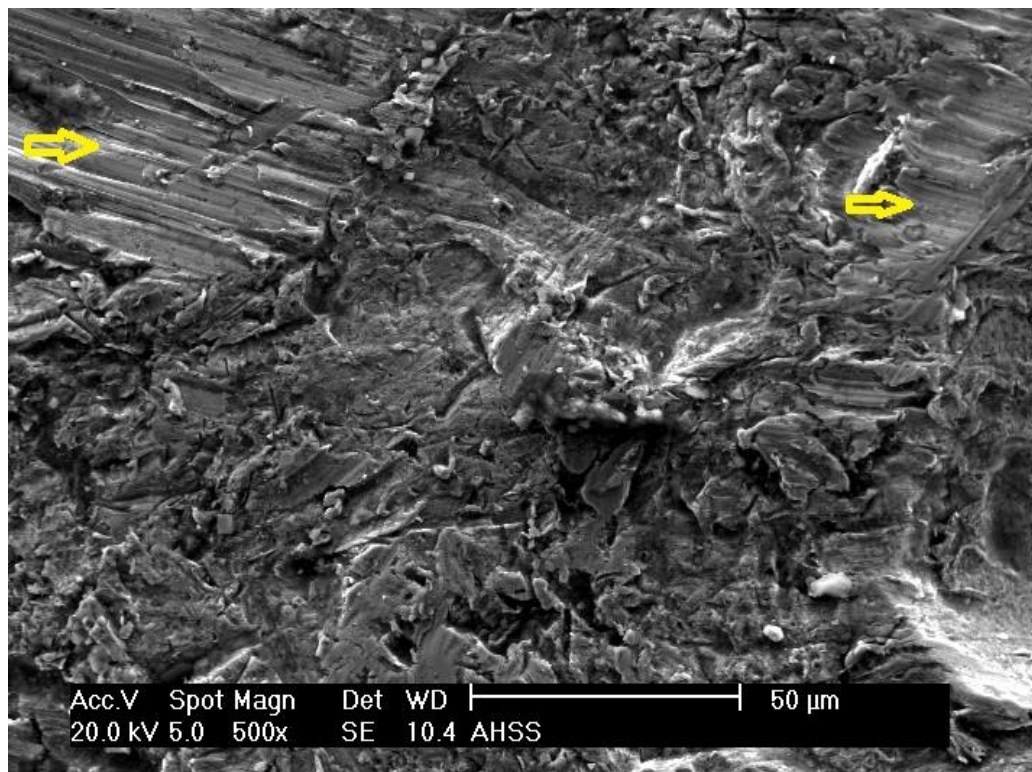
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 28 - Análise MEV da amostra A36, após o experimento seco.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 29 - Análise MEV da amostra AHSS, após o experimento seco.



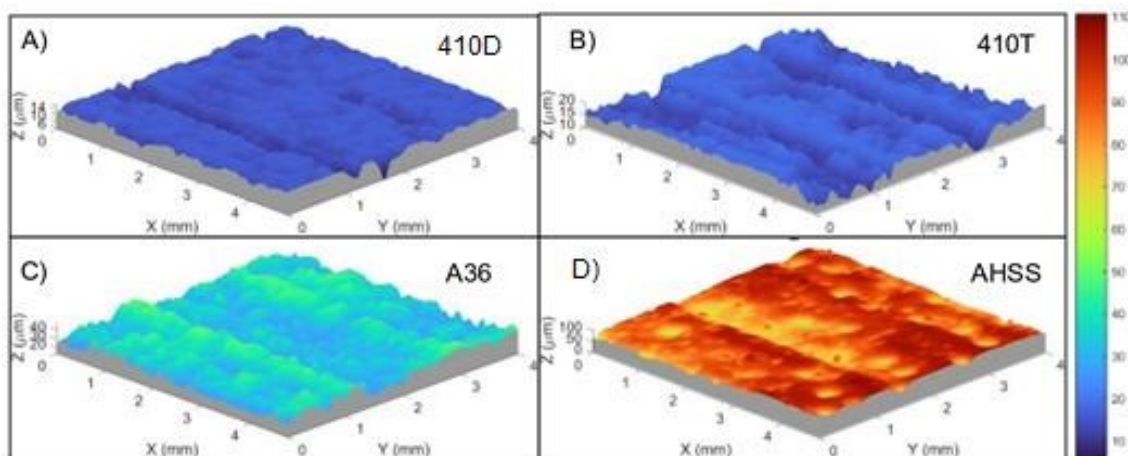
Fonte: Autoria própria (2025).

5.3.2 Análise do perfil da superfície

A análise comparativa dos resultados da caracterização via perfilômetro 3D foi realizada em todos materiais antes e após os experimentos. A Figura 30 mostra a perfilometria para cada material após o experimento úmido, onde verifica-se a disparidade entre as superfícies. A régua a direita tem a escala em micrômetro variando de 0 a 110 μm e complementa com cores a variação da rugosidade, tornando assim bem visual as diferenças.

A imagem para os inoxidáveis são similares, por isto a cor azul predomina em ambos. Apresentam menos picos e vales com rugosidade na faixa de 0 a 20 μm . A superfície é mais homogênea. O A36 na faixa de 30 a 50 μm e por fim o AHSS com superfície mais irregular, no range ampliado de 70 a 110 μm . Analisaremos mais detalhadamente o AHSS.

Figura 30- Análise de perfilometria 3D das amostras após experimento úmido.

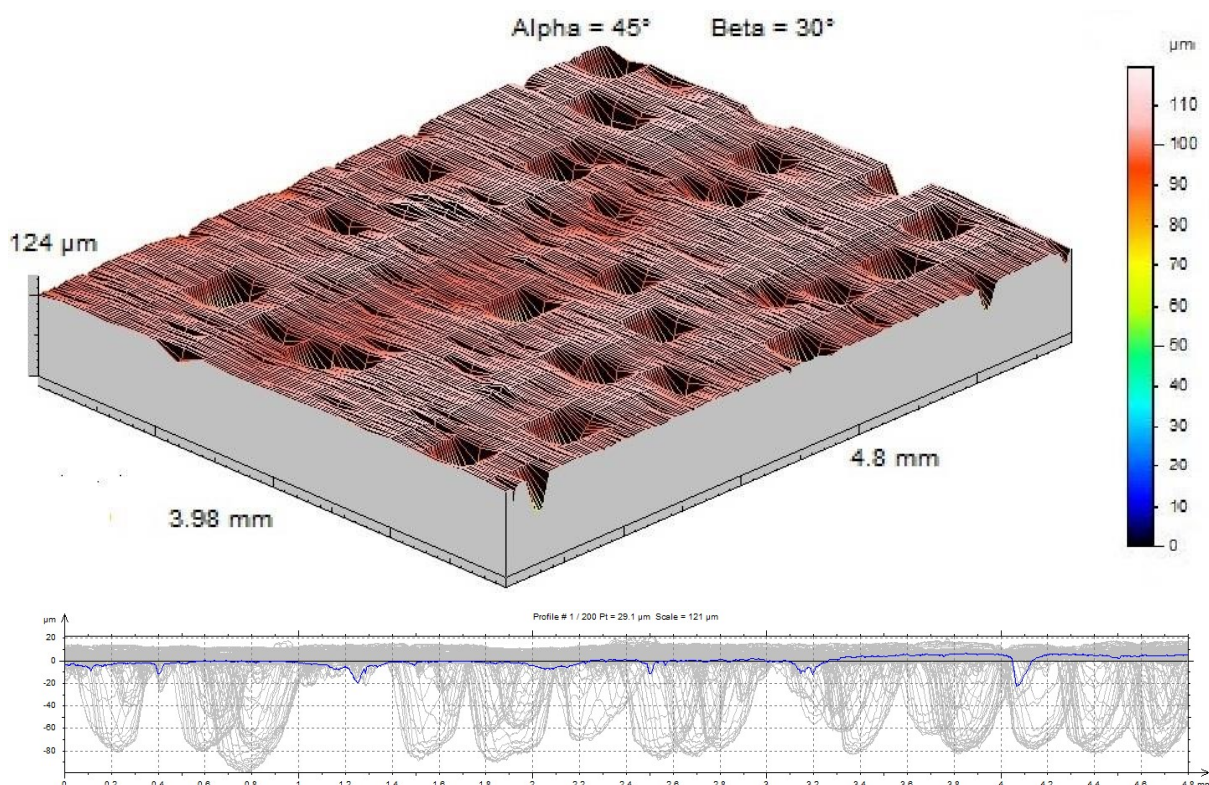


Fonte: Autoria própria (2025).

Na amostra de AHSS, Figura 31 depois do experimento de tribocorrosão permitem algumas considerações. É possível confirmar que houve redução dos picos nas superfícies das amostras, após o experimento a úmido. No entanto houve aumento dos vales, com aspectos de orifícios. Estes vales podem comprometer a resistência mecânica do material. Este aspecto não se repetiu em nenhuma das amostras dos demais aços. O gráfico na parte inferior da figura mostra o perfil da superfície e a linha azul representa apenas a primeira medição realizada e a nuvem

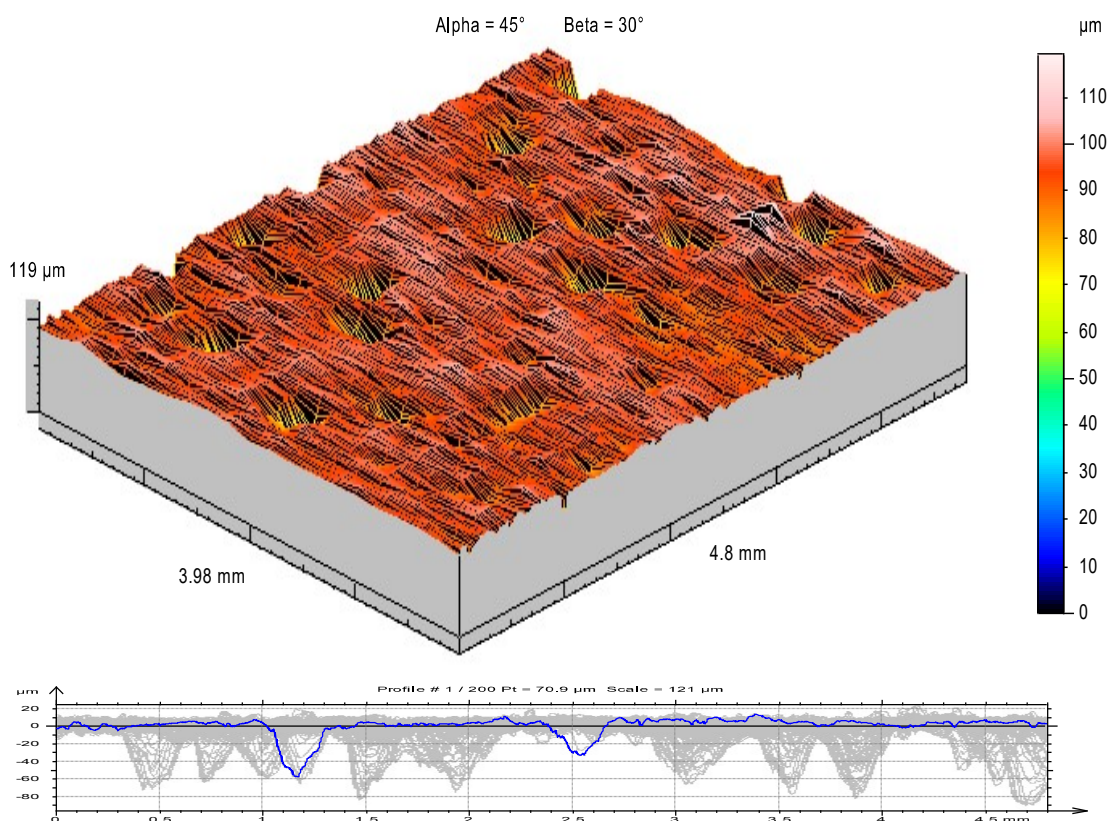
cinza a média de todos pontos medidos. É visível na Figura 31 que as cores da superfície ficaram mais avermelhada, na faixa de 0 a 20 μm , demonstrando a homogeneidade da superfície, com poucos picos. Apenas nos orifícios, a cor amarelada alcança 60 μm , mostrando o desnível com a profundidade em relação ao ponto 0 μm no plano superior. Assim percebe-se alguns mecanismos, como o de microcorte que retira diretamente o material da superfície e o de microsulcamento com a deformação e retirada de material das bordas do sulco reduzindo em muito os picos. A abrasão-corrosão retira parte do material da superfície, após a formação da camada de óxido e ocorreu também aparentemente a corrosão localizada formando os orifícios. Estes orifícios não são percebidos nas medições de espessura, mas representam perda de massa e aumento da severidade do sistema para este material. Inclusive os orifícios estão também após o experimento a seco, mas em quantidade menor.

Figura 31 - Análise de perfilometria 3D das amostras de AHSS, depois do experimento úmido.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 32 - Análise de perfilometria 3D das amostras de AHSS, depois do experimento seco.

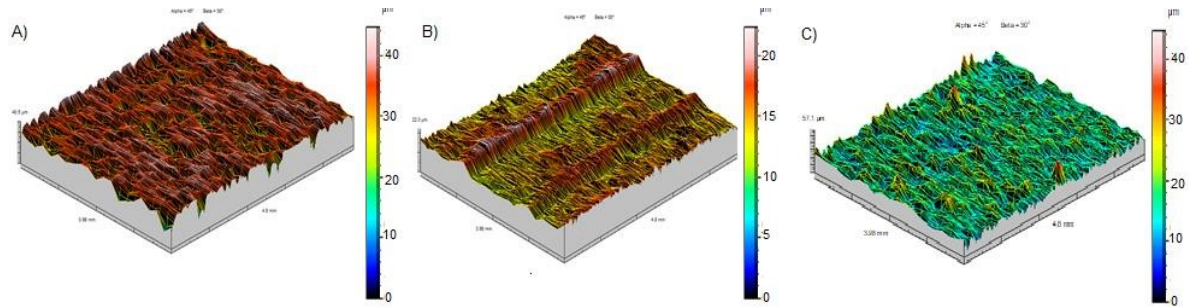


Fonte: Autoria própria (2025).

No entanto quando analisamos os parâmetros de rugosidade do 410T antes dos experimentos, mostrados na Figura 33A, já percebemos menores variação de cores e, portanto, é mais plana, com os parâmetros de $R_a = 2.27 \mu\text{m}$, $R_t = 18,2 \mu\text{m}$ e $R_z = 13.2 \mu\text{m}$. Após o experimento úmido, conforme ilustrado na Figura 33B, o aspecto da superfície do 410T fica bem destacado em dois níveis principais, um amarelo que predomina numa profundidade um pouco menor do que a outra avermelhada. Assim pode-se concluir que foram formados sulcos contínuos, decorrente de corrosão geral com a retirada da película protetora (DIOMIDIS *et al.*, 2010) e abrasão-corrosão mais concentrada nesta área amarela contínua. O mecanismo preponderante foi o de microcorte, seguido pelo microsulcamento. Com os parâmetros após experimento úmido de $R_a = 0.601 \mu\text{m}$, $R_t = 6.59 \mu\text{m}$ e $R_z = 4.41 \mu\text{m}$ o resultado foi redução das saliências e superfície mais homogênea. A escala da régua da Figura 33B está bem menor do que as demais, pois a superfície é mais plana. Por outro lado, após o experimento a seco, os parâmetros foram de $R_a = 2.47 \mu\text{m}$, $R_t = 19.7 \mu\text{m}$ e $R_z = 14.6$

μm . Assim é verificado que após o experimento a seco a superfície ficou mais heterogênea, conforme mostrado na Figura 33C.

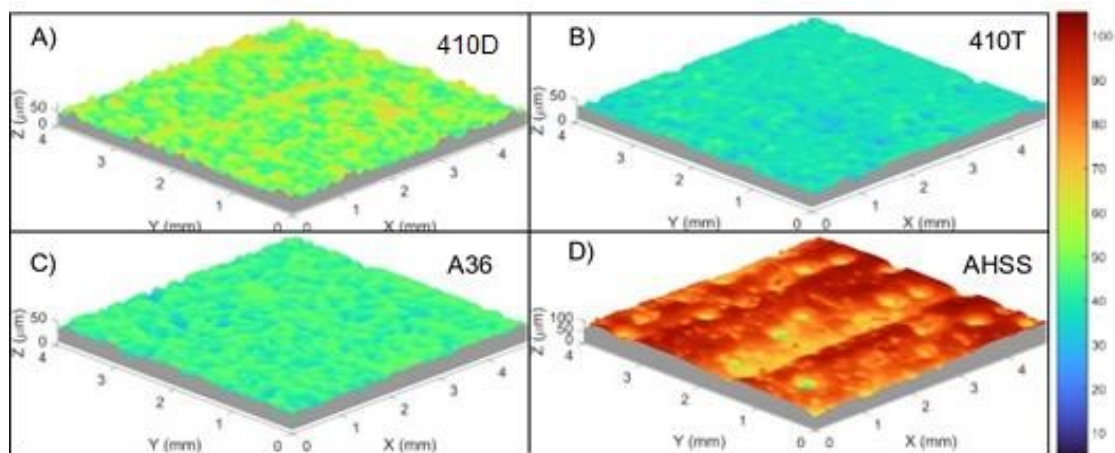
Figura 33 - Perfilometria do 410T: A) Antes dos experimentos, B) Após experimento úmido e C) Após experimento seco.



Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados dos parâmetros de rugosidade do A36 no início, como recebido antes de realizar os experimentos, foi de $R_a = 2.18 \mu\text{m}$, $R_t = 25.7 \mu\text{m}$ e $R_z = 15.5 \mu\text{m}$, após o experimento úmido $R_a = 1.51 \mu\text{m}$, $R_t = 20 \mu\text{m}$ e $R_z = 10.6 \mu\text{m}$ e após o experimento a seco $R_a = 3.22 \mu\text{m}$, $R_t = 24.6 \mu\text{m}$ e $R_z = 18.3 \mu\text{m}$. Para o 410D os parâmetros foram $R_a = 2.27 \mu\text{m}$, $R_t = 18.2 \mu\text{m}$ e $R_z = 13.2 \mu\text{m}$; após o experimento úmido $R_a = 0.697 \mu\text{m}$, $R_t = 7.09 \mu\text{m}$ e $R_z = 4.83 \mu\text{m}$ e após experimento a seco $R_a = 3.63 \mu\text{m}$, $R_t = 26.8 \mu\text{m}$, $R_z = 20.1 \mu\text{m}$. Ambos reduziram muito os picos e vales após o experimento a úmido, demonstrando que ficou mais plana a superfície, mas após o experimento a seco ficou mais heterogênea, apresentando mais picos e vales, conforme apresentado na Figura 34.

Figura 34 - Análise de perfilometria 3D das amostras após experimento a seco.

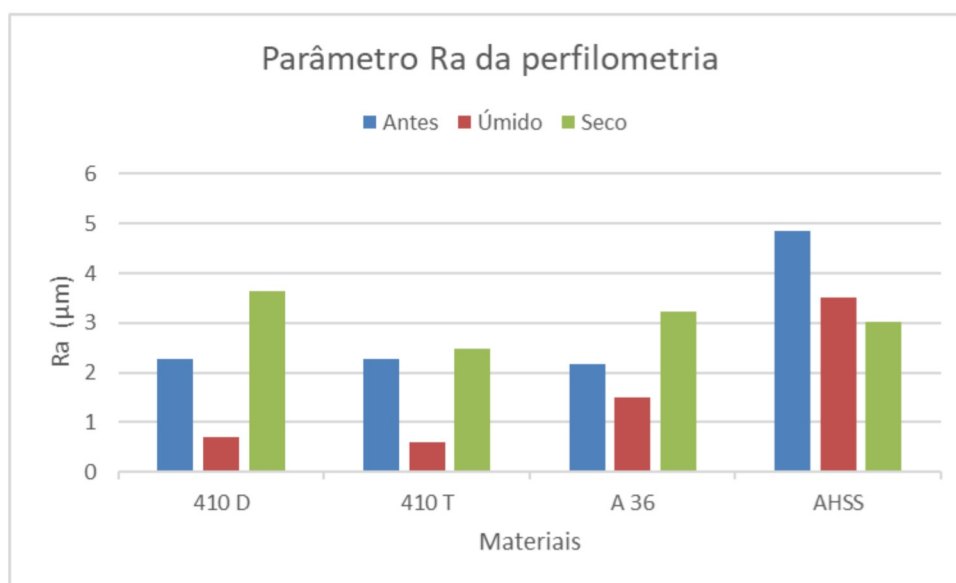


Fonte: Autoria própria (2025).

Os parâmetros de rugosidade iniciais da amostra de AHSS eram $R_a = 4.84 \mu\text{m}$, $R_t = 34.6 \mu\text{m}$ e $R_z = 25.9 \mu\text{m}$ e foram para $R_a = 3.51 \mu\text{m}$, $R_t = 48.3 \mu\text{m}$ e $R_z = 21.1 \mu\text{m}$ após o experimento úmido. Após o experimento a seco os parâmetros foram para $R_a = 3.01 \mu\text{m}$, $R_t = 35.1 \mu\text{m}$ e $R_z = 18.8 \mu\text{m}$. Assim é confirmado que o desgaste a seco reduziu ainda mais a rugosidade, pois os parâmetros foram menores do que a rugosidade original das amostras e também menor do que após o experimento a úmido. As saliências ou picos foram reduzidas na mesma sequência.

A Figura 35 apresenta todos os resultados consolidados, numa única imagem, para R_a de todos materiais. O comportamento e tendência da curva do R_a foi similar ao do R_z . O AHSS apresentou algumas diferenças: como foi o único material que reduziu o R_a após os dois experimentos e o R_a do antes e do úmido apresentaram valores superiores quando comparados aos demais materiais.

Figura 35- Análise comparativa do parâmetro de rugosidade R_a , antes dos experimentos, após o experimento a seco e após o experimento a úmido.



Fonte: Autoria própria (2025).

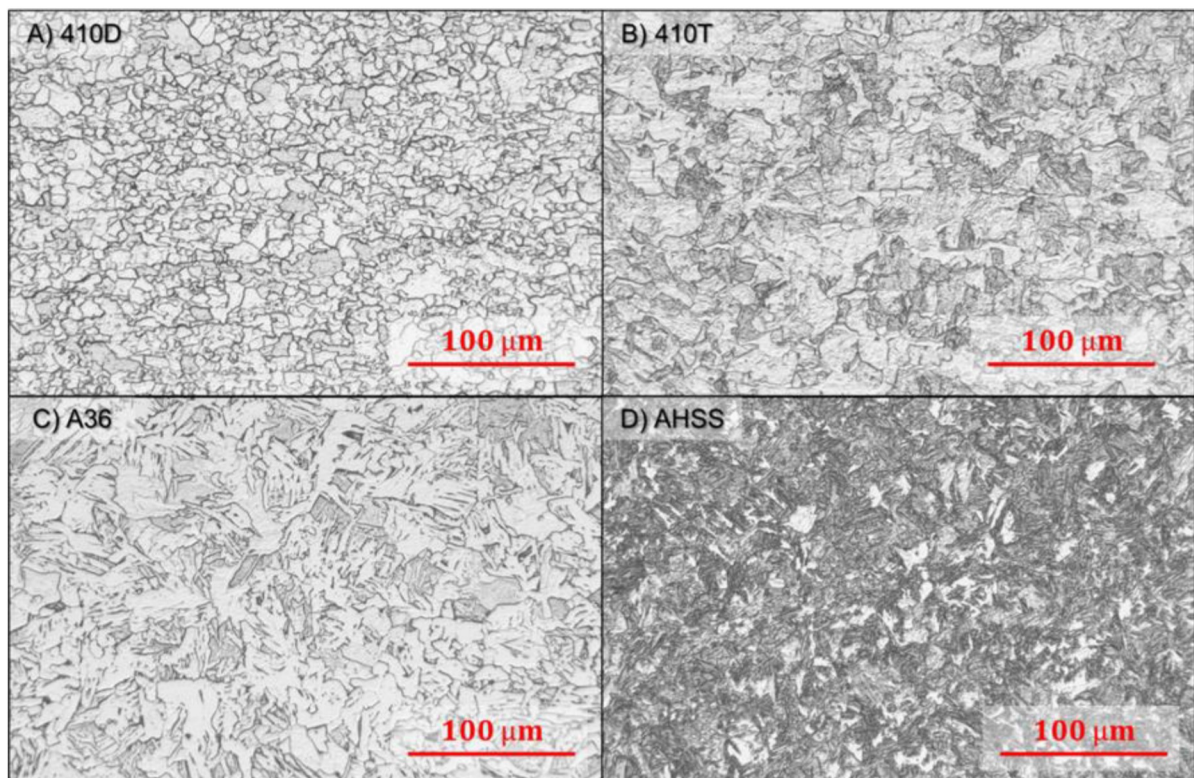
5.3.3 Análise da microestrutura

A preparação das amostras para a caracterização microestrutural foi feita e utilizou-se o embutimento no sentido da laminação. Depois foi realizado o ataque metalográfico convencional: para os aços inoxidáveis usou-se reagente de Villela (2,5

ml de HCl + 50 ml de C₂H₅OH + 0,5 ml de ácido pícrico) por 50 segundos e para os aços carbono usou-se o Nital 5% (5% de ácido nítrico com álcool etílico) por 5 segundos. Em seguida, fez-se a observação em microscópio ótico, marca LEICA, equipado com uma câmera digital com resolução de 640 x 480 pixels.

A Figura 36A apresenta contornos de grão bem nítidos e grãos menores no 410D que nos demais aços. É possível verificar a estrutura martensítica no aço 410T, Figura 36B e também no aço AHSS na Figura 36D.

Figura 36 - Análise da microscopia optica de A) 410D, B) 410T, C) A36 e D) AHSS, após o experimento úmido.



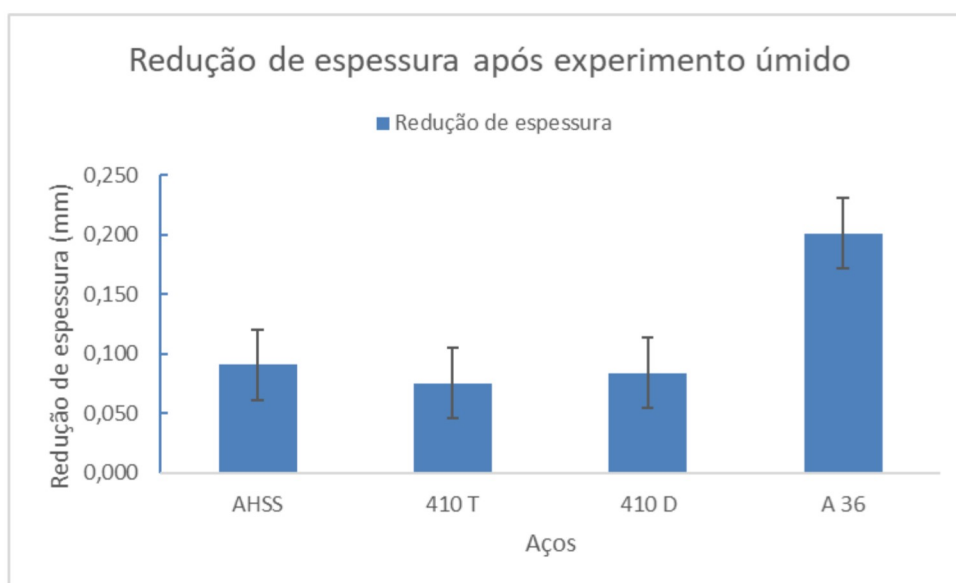
Fonte: Autoria própria (2025).

5.3.4 Análise da redução de espessura

Para avaliar os efeitos tribológicos, foi comparado a variação de espessura média entre os tipos diferentes de aços, após os experimentos úmido e a seco. Após o experimento úmido foi realizado a análise dos dados apresentados na Figura 37, onde foi verificado que o aço 410 T foi o que menos reduziu a espessura. O aço 410D foi o segundo a ter menor redução de espessura, portanto os dois com melhores

desempenho após o experimento a úmido são aços inoxidáveis. Apesar de terem a dureza superficial inferior ao AHSS. O A 36 teve o pior desempenho nesta análise da redução de espessura. Portanto, pode-se sugerir que a resistência à corrosão do aço inoxidável é uma característica mais relevante do que a dureza superficial, para o desempenho do material sob ambiente tribocorrosivo na betoneira. O desvio padrão do 410 T foi o menor valor. Seguido pelo AHSS, depois o 410 D e por fim o A 36.

Figura 37 - Análise da espessura após experimento úmido.

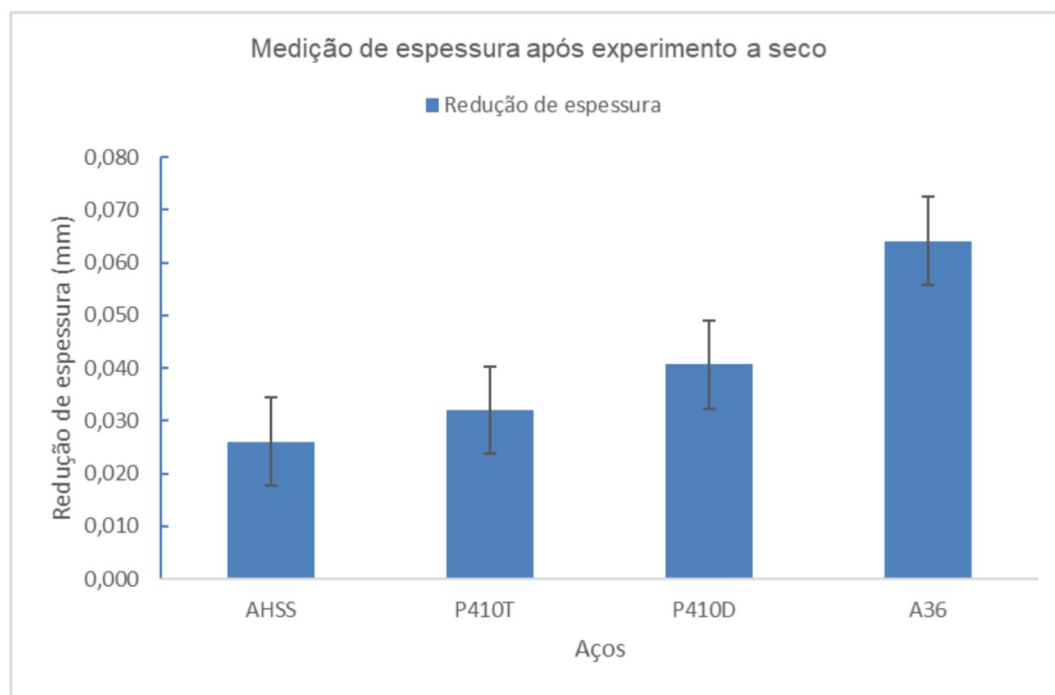


Fonte: Autoria própria (2025).

Para o segundo experimento (a seco), o AHSS teve melhor desempenho, conforme ilustrado na Figura 38. Seguido pelo 410T, 410D e por fim o A36. De forma geral a redução da espessura no experimento a seco foi menor do que no úmido. O ambiente úmido foi mais agressivo para todos os aços. No experimento a seco, parte da brita é transformada em pó, que se deposita sobre a superfície, amortecendo os impactos. No experimento úmido pode ter formado a película passiva no aço inoxidável e a oxidação no aço carbono, que foram sucessivamente retiradas durante o desgaste, gerando uma sinergia entre a corrosão e o desgaste, resultando na redução da espessura mais rápida do que no experimento a seco, comparando cada material. A complexidade dos fenômenos existentes na tribocorrosão influenciam na maior amplitude do desvio padrão. Quando o desvio padrão é analisado na Figura 38, percebe-se uma menor dispersão em todos os aços que participaram deste estudo. O

410T apresenta novamente menor dispersão, seguido muito próximo pelo A36 e depois juntos o 410D e AHSS.

Figura 38 - Análise da espessura após experimento a seco.



Fonte: Autoria própria (2025).

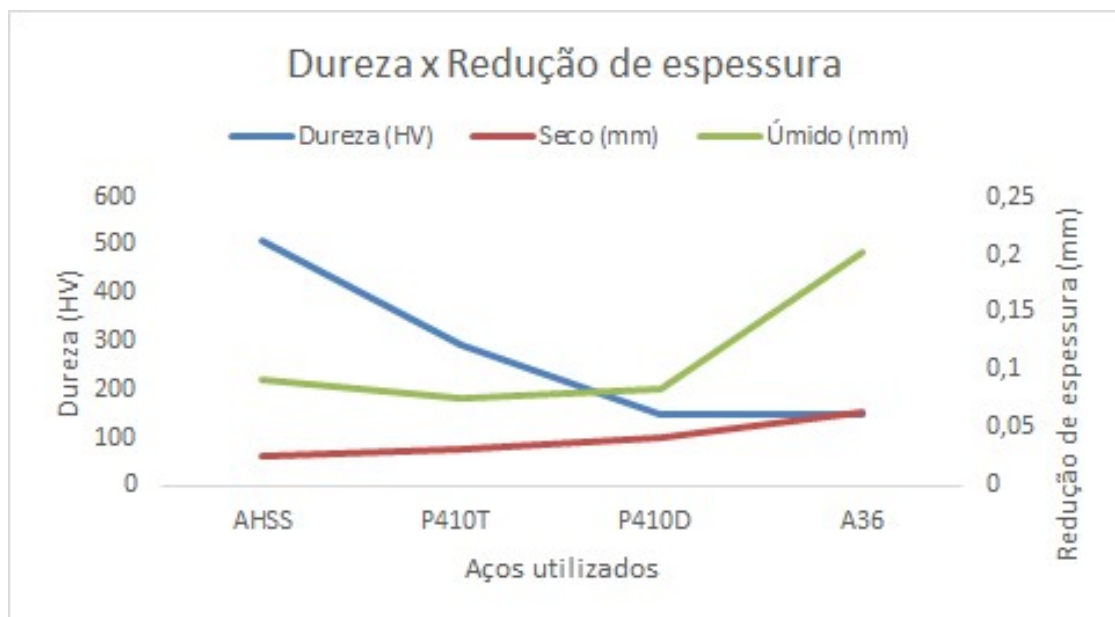
Na Figura 39 é possível confirmar a correlação direta da dureza (curva azul) com a redução de espessura após o experimento a seco (curva vermelha). No caso do primeiro experimento também é perceptível a correlação para os mesmos tipos de aço, analisando separadamente os aços inoxidáveis (410T e 410D) e depois os aços carbono (AHSS e A36). A dureza superficial foi determinante no resultado das medições de espessura.

Quando é feita análise global da dureza, ressalta-se a dureza próxima do 410D e o A36. No entanto estes aços apresentaram desempenho bem diferente, principalmente no ambiente úmido. Expondo a sinergia positiva da tribocorrosão, onde teve maior desgaste do aço A36. Após a resistência a corrosão, provavelmente a dureza foi a propriedade que mais influenciou inversamente no desgaste dos materiais.

Esta análise final demonstra que os quatro aços utilizados permitiram conclusões amplas a respeito deste sistema tribocorrosivo, comum no mercado industrial. A escolha destes materiais foi assertiva, pois demonstraram que no

ambiente seco a dureza é preponderante, representado pelo menor desgaste do AHSS que é o aço mais duro, seguido pelo 410T que é o segundo mais duro. Por outro lado, no ambiente tribocorrosivo, a resistência a corrosão foi determinante, tendo mostrado o melhor desempenho dos aços inoxidáveis. E por fim, a utilização do aço A36 neste estudo demonstrou que o desempenho deste material é inferior aos demais em todos os experimentos, apesar de ser o aço mais usado.

Figura 39- Correlação da dureza com a redução de espessura das amostras, após o experimento tribocorrosivo (úmido) e a seco.



Fonte: Autoria própria (2025).

6 CONCLUSÕES

Este estudo conseguiu alcançar os objetivos definidos e os resultados serão abordados. As observações realizadas a partir das caracterizações via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) nas amostras de aço carbono A36 revelaram sulcos e deformações plásticas características de desgaste abrasivo e erosivo. Os aços inoxidáveis martensítico 410T e ferrítico 410D, demonstraram desempenho técnico e econômico superior num ambiente tribocorrosivo, configurando-se como alternativas viáveis ao A36. Quanto aos mecanismos de desgaste, foi percebido predominância de rolamento nos materiais de menor dureza e predominância de riscamento nos aços de maior dureza. Em ambientes úmidos, os aços inoxidáveis 410T e 410D apresentaram maior resistência à perda de espessura do que o AHSS, mesmo este sendo mais duro. A superioridade dos inoxidáveis se deve à formação de camadas passivas protetoras, que conferem elevada resistência à corrosão. A análise dos parâmetros de rugosidade (R_a e R_z) indicou significativa redução da rugosidade dos aços inoxidáveis após os ensaios úmidos. Esse efeito é atribuído ao alisamento da superfície por deformação plástica sob ação simultânea de desgaste e corrosão.

Em ambiente seco, predominam os mecanismos de desgaste abrasivo e erosivo. O experimento a seco na betoneira demonstrou que o aço AHSS, que tem a maior dureza entre os aços testados, foi o que menos desgastou, seguido pelo 410T, 410D e por fim o A36. Assim pode-se afirmar que a dureza superficial foi determinante. Não teve corrosão geral devido a baixa umidade do ambiente fechado do laboratório. Já em ambiente úmido, a ação sinérgica entre abrasão e corrosão acelera a degradação dos materiais metálicos, intensificando a perda de espessura. Principalmente dos aços carbono. A betoneira usada na construção civil sempre utiliza uma mistura úmida.

Após os dois experimentos foi comprovado que o A36 é o que tem pior desempenho entre os materiais testados.

REFERÊNCIAS

- A. LÓPEZ-ORTEGA AND R. BAYÓN AND J.L. ARANA AND A. ARREDONDO AND A. IGARTUA. Influence of temperature on the corrosion and tribocorrosion behaviour of High-Strength Low-Alloy steels used in offshore applications. *Tribology International*, v. 121, n. 0301-679X, p. 341–352, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X18300525>>.
- ABREU, D. *et al.* Tribocorrosion in Ferritic stainless steels: An improved methodological approach. *Materials Research*, v. 25, 2022.
- ASTM INTERNATIONAL. *ASTM E8/E8M: standard test methods for tension testing of metallic materials*. West Conshohocken: [s.n.], 2021.
- BATENI, M. Reza *et al.* Wear and corrosion wear of medium carbon steel and 304 stainless steel. *Wear*, v. 260, n. 1–2, p. 116–122, 2006.
- BELLO, J. O.; WOOD, R. J.K.; WHARTON, J. A. Synergistic effects of micro-abrasion-corrosion of UNS S30403, S31603 and S32760 stainless steels. *Wear*, v. 263, n. 1- 6 SPEC. ISS., p. 149–159, 2007.
- BIAŁOBRZESKA, B.; JASIN'ski, R. Resistance to Abrasive Wear with Regards to Mechanical Properties Using Low-Alloy Cast Steels Examined with the Use of a Dry Sand/Rubber Wheel Tester. *Materials* 2023, 16, 3052. <https://doi.org/10.3390/ma16083052>
- BLAU, P. J. *Friction, Science and technology – from concepts to applications*. 2. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.
- CALLISTER, W.D.J.; RETHWISCH, D.G. *Ciência e engenharia de materiais*. 8. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012.
- CHEN, Jun *et al.* Corrosion and tribocorrosion behaviors of AISI 316 stainless steel and Ti6Al4V alloys in artificial seawater. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, v. 24, n. 4, p. 1022–1031, 2014. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63157-5](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63157-5)>.
- CHIAVERINI, VICENTE. - *Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento - Volume II*. . [S.l: s.n.]. , 1986
- CONSTRUCTION CONCRETE STAFF. READY MIXED CONCRETE : The First Fifty Years. *Concrete Construction*, 1962.
- COSTA, H. L. *et al.* Effect of surface topography on the dynamics of the abrasive particles during micro-abrasion. *Wear*, v. 324–325, p. 129–139, 2015.
- COZZA, R. C. *Estudo de desgaste e atrito em ensaios microabrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão*. 2011. 290 f. Universidade de São Paulo, 2011.

DE SOUZA MORAIS, Williams Raphael *et al.* Green Corrosion Inhibitors Based on Plant Extracts for Metals and Alloys in Corrosive Environment: A Technological and Scientific Prospection. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 13, n. 13, 2023.

DIOMIDIS, N. *et al.* Tribocorrosion of stainless steel in sulfuric acid: Identification of corrosion-wear components and effect of contact area. *Wear*. [S.l.: s.n.], 2010

FASANO, Julian; JANZ, Eric E.; MYERS, Kevin. Design mixers to minimize effects of erosion and corrosion erosion. *International Journal of Chemical Engineering*, v. 2012, n. 1, 2012.

GAHR, K.-H. Zum. *Microstructure and Wear of Materials*. 10. ed. Siegen, Germany: Elsevier Science Publisher B.V., 1987.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. *Tribology: friction and wear of engineering materials*. 2. ed. Reino Unido: Elsevier, 2017.

JONAS ALLEBERT, MIKAEL JUNGEDAL, Patric Waara. *Wear on overlay welded HCWI vs. .* [S.l.]: WEAR. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.059>>. , 2015

JOST, H.P. A Report on the Present Position and Industry's Needs, Lubrication (Tribology) Education and Research. *Majesty's Stationery Office, London*, 1966.

JUNGEDAL, Mikael. Mild impact wear in a concrete mixer. p. 68, 2012.

KAJDAS, C. *Enciclopedia of tribology*. Amsterdã: Elsevier, 1990.

KRONQVIST, Joel. *Wear-resistant materials*. 2016. University of Oulu, 2016.

LABIAPARI, W. S. *et al.* Mechanical effects on the corrosion resistance of ferritic stainless steels during microabrasion-corrosion. *Wear*, v. 426–427, n. December 2018, p. 1474–1481, 2019.

LABIAPARI, W. S. *et al.* Stainless steel as an antiwear material for the bio-fuel industry. *Wear*, v. 302, n. 1–2, p. 1536–1545, 2013.

LABIAPARI, W. S. *et al.* Understanding abrasion-corrosion to improve concrete mixer drum performance: A laboratory and field approach. *Wear*, v. 477, n. September 2020, 2021a.

LABIAPARI, W. S. *et al.* Understanding abrasion-corrosion to improve concrete mixer drum performance: A laboratory and field approach. *Wear*, v. 477, n. February, 2021b.

LABIAPARI, W. S.; DANIEL, José; DE MELLO, Biasoli. *Abrasão-Corrosão Em Aços Inoxidáveis Ferríticos*. 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14772/1/AbrasaoCorrosaoAcos_parte1.pdf>.

LIGIER, Krzysztof *et al.* Analysis of Wear Properties of Hardox Steels in Different Soil Conditions. *Materials*, v. 15, n. 21, 2022.

LOCMAIS. *Betoneiras*. Disponível em: <<http://locmaissb.com.br/betoneiras>>.

LÓPEZ-ORTEGA, A.; ARANA, J. L.; BAYÓN, R. Tribocorrosion of Passive Materials: A Review on Test Procedures and Standards. *International Journal of Corrosion*, v. 2018, 2018.

LUDEMA, K. C. *Friction, wear, lubrication. A Textbook in Tribology*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1996.

MARQUES DE OLIVEIRA, Ana Paula *et al.* Erosive Wear Study of the AISI 201LN Stainless Steel: A Comparison with the AISI 304 and AISI 410 Stainless Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, v. 50, n. 4, p. 1663–1671, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11661-019-05123-1>>.

MATHEW, M. T. *et al.* Construction of a tribocorrosion test apparatus for the hip joint: Validation, test methodology and analysis. *Wear*, v. 271, n. 9–10, p. 2651–2659, 2011.

MISCHLER, S. Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: A comparative evaluation. *Tribology International*, v. 41, n. 7, p. 573–583, 2008.

MUNOZ, Anna Igual; ESPALLARGAS, Nuria; MISCHLER, Stefano. *Tribocorrosion*. Cham, Suíça: [s.n.], 2020.

NIȚĂ, Adrian; PETRESCU, Marius Gabriel; *et al.* Experimental Research on the Wear Behavior of Materials Used in the Manufacture of Components for Cement Concrete Mixers. *Materials*, v. 16, n. 6, 2023.

NIȚĂ, Adrian; LAUDACESCU, Eugen; *et al.* Experimental Research Regarding the Effect of Mineral Aggregates on the Wear of Mixing Blades of Concrete Mixers. *Materials*, v. 16, n. 14, 2023.

PADILHA, Angelo Fernando. MATERIAIS DE ENGENHARIA: Microestrutura e Propriedades. *Materiais de Engenharia - Microestrutura e Propriedades*, p. 271–287, 2000.

SABRI ALKAN, ALI GÜNEN, MAHIR GÜLEN, Mustafa Sabri Gök. Effect of boriding on tribocorrosion behaviour of HSLA offshore mooring chain steel, Surface and Coatings Technology. *Surface and Coatings Technology*, v. 476, n. 130276, 2024. Disponível em: <doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130276>.

STACK, M. M.; CHI, K. Mapping sliding wear of steels in aqueous conditions. *Wear*, v. 255, n. 1–6, p. 456–465, 2003.

STACK, M. M.; PUNGWIWAT, N. Slurry erosion of metallics, polymers, and ceramics:

Particle size effects. *Materials Science and Technology*, v. 15, n. 3, p. 337–344, 1999.

VALIGI, M. C.; GASPERINI, I. Planetary vertical concrete mixers: Simulation and predicting useful life in steady states and in perturbed conditions. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 15, n. 10, p. 1211–1223, 2007.

VALIGI, Maria Cristina; LOGOZZO, Silvia; RINCHI, Mirko. Wear resistance of blades in planetary concrete mixers. Part II: 3D validation of a new mixing blade design and efficiency evaluation. *Tribology International*, v. 103, p. 37–44, 2016.

WANG, Yueyao *et al.* Microstructure and wear mechanism of high-strength steels for concrete mixing drum coiled at different temperatures. *Ironmaking and Steelmaking*, p. 1–8, 2020.

WANKHEDE, Amruta K.; SAHU, A.R. Design , modification and analysis of concrete mixer machine. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, v. 3, n. 12, p. 6613–6616, 2015.

YAN, Yu. *Bio-tribocorrosion in biomaterials and medical implants*. [S.l: s.n.], 2013.