

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ACABAMENTO
SUPERFICIAL NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO
AÇO SAE 1020 EM BIODIESEL E SUAS MISTURAS
COM ÓLEO DIESEL**

Bruno Alexandre Roque

SÃO CARLOS - SP
2021

BRUNO ALEXANDRE ROQUE

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ACABAMENTO SUPERFICIAL NA
RESISTÊNCIA À CORROSÃO DO AÇO SAE 1020 EM BIODIESEL E SUAS
MISTURAS COM ÓLEO DIESEL

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
São Carlos para obtenção do título de
mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Roberto
Monteiro

São Carlos - SP

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Bruno Alexandre Roque, realizada em 09/06/2021.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Marcos Roberto Monteiro (UFSCar)

Prof. Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura (UFSCar)

Prof. Dr. Cecilio Sadao Fugivara (UNESP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

DEDICATÓRIA

Dedico essa dissertação de mestrado a todas as pessoas incríveis que fizeram parte do meu projeto, e agradeço por todo apoio durante esse tempo.

AGRADECIMENTO

Desejo expressar meu agradecimento a todas as pessoas que estiveram presentes durante esse tempo.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Marcos Roberto Monteiro pela confiança em minhas potencialidades, pela orientação e convivência durante a execução do projeto. Agradeço também aos professores e colaboradores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar por todo o apoio dado ao meu projeto.

À CAPES, pela bolsa de estudos, e à FAPESP pelo apoio à utilização dos equipamentos necessários à pesquisa.

Agradeço à minha família, em especial minha mãe, minha tia, irmã e sobrinhos por todo o carinho e atitudes de incentivo durante os desafios que enfrentei ao longo do mestrado. A vocês sou extremamente grato por tudo o que sou. Amo vocês.

Aos meus colegas de trabalho Denny, Michele, Dennis, Leonildo, Aristóteles, Tiago, Felipe, Cristhie, Elielson e Leones quero agradecer por todo o apoio e pelos bons momentos que passamos, momentos esses sempre cheios de ótimas discussões e importantes aprendizados.

À Tatyana Rodrigues Anselmo, minha gratidão pelo incentivo do ingresso no mestrado e por todo o apoio durante nosso tempo de convivência.

Um agradecimento especial aos amigos Ubirajara, Taíse Bonfim, Valquíria, Antônio Marcos e Leonardo (*In memoriam*) pela amizade e o apoio.

A todas e todos os meus sinceros agradecimentos.

“Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas. Isso é perfeitamente aceitável, elas são a abertura para encontrar as que estão certas. A ciência é um processo de autocorreção.” (Carl Sagan)

RESUMO

Este trabalho avaliou a influência do acabamento superficial decorrente do fresamento na resistência à corrosão de peças de aço SAE 1020 em biodiesel (B100) e suas misturas com óleo diesel (B15 e B30), por meio de ensaios de imersão total, corrosão por frestas e fase de vapor durante 2400h em temperatura ambiente. Para o fresamento foram utilizadas três configurações de deslocamento da ferramenta, e três regiões das peças tiveram suas superfícies caracterizadas pelos parâmetros assimetria (Ssk), curtose (Sku) e profundidade reduzida de vale (Svk). A análise estatística desses parâmetros mostrou que as três configurações de usinagem produziram superfícies com diferenças relativas à predominância de picos e vales, sendo os picos da primeira configuração mais íngremes que os da primeira configuração, sugerindo que a estratégia de deslocamento da ferramenta poderia apresentar uma correlação com a susceptibilidade à corrosão das peças. Após os ensaios constatou-se que as misturas B15, B30, o biodiesel (B100) e os ensaios de imersão total, corrosão por frestas e fase de vapor não produziram variações significativas dos parâmetros de rugosidade. Porém, levando-se em conta apenas o fator configuração de usinagem, após as 2400h as amostras da primeira configuração apresentaram diferenças significativas nos valores médios de Ssk e Sku, indicando que suas superfícies apresentaram maior quantidade de vales que a 0h e sugerindo que os picos dessa configuração foram responsáveis por uma maior área de exposição ao biodiesel e suas misturas. Embora as superfícies das outras configurações apresentassem algumas mudanças decorrentes da ação corrosiva das misturas diesel/biodiesel e do biodiesel, para estas não foram observadas mudanças significativas dos parâmetros de rugosidade. A formação de filme passivo nas superfícies e a elevada resistividade elétrica das misturas estudadas (B15 e B30) e do biodiesel (B100) podem ter influenciado os resultados obtidos nos ensaios de imersão, sugerindo assim a necessidade de um tempo mais prolongado para que essas regiões das peças apresentassem efeitos mais expressivos decorrentes da corrosão.

Palavras-chave: Acabamento Superficial. Fresamento. Corrosão. Biocombustível. Biodiesel.

ABSTRACT

This work evaluated the influence of surface finish resulting from milling on the corrosion resistance of SAE 1020 steel parts in biodiesel (B100) and its blends with petroleum diesel (B15 and B30), through tests of total immersion, crevice corrosion and vapor phase for 2400h at room temperature. For milling, three tool displacement configurations were used, and three parts regions had their surfaces characterized by skewness (Ssk), kurtosis (Sku) and reduced valley depth (Svk) parameters. The statistical analysis of these parameters showed that the three machining configurations produced surfaces with differences related to the predominance of peaks and valleys, with the peaks of the first configuration being steeper than those of the first configuration, suggesting that the tool displacement strategy could present a correlation with the susceptibility to corrosion of the parts. After the tests, it was found that the blends B15, B30, biodiesel (B100) and the total immersion, crevice corrosion and vapor phase tests did not produce significant variations in the roughness parameters. However, taking into account only the machining configuration factor, after 2400h the samples of the first configuration showed significant differences in the mean values of Ssk and Sku, indicating that their surfaces had a greater number of valleys than at 0h and suggesting that the peaks of this configuration were responsible for a larger area of exposure to biodiesel and its blends. Although the surfaces of the other configurations presented some changes resulting from the corrosive action of the diesel/biodiesel blends and biodiesel, for these, no significant changes in the roughness parameters were observed. The formation of passive film on the surfaces and the high electrical resistivity of the studied blends (B15 and B30) and biodiesel (B100) may have influenced the results obtained in the immersion tests, thus suggesting the need for a longer time for these regions the parts had more expressive effects resulting from corrosion.

Keywords: Surface Finish. Milling. Corrosion. Biofuel. Biodiesel

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação da Integridade Superficial.	17
Figura 2 - Marcas de avanço, material aderido à superfície e sulcos em uma superfície usinada.	20
Figura 3 - Variação de espessura do cavaco no fresamento.	21
Figura 4 - Rugosidade e direção de avanço no fresamento frontal.	22
Figura 5 - Estratégias de movimentação da ferramenta.....	23
Figura 6 - Três perfis de superfícies com diferentes valores de assimetria (<i>skewness</i>).	29
Figura 7 - Tipos de perfis de uma superfície e valores de curtose: leptocúrtica (a) e platicúrtica (b).....	30
Figura 8 - Variação dos parâmetros Ssk e Sku ao longo de testes de corrosão.	31
Figura 9 - Parâmetro Svk na curva de Abbot-Firestone.	32
Figura 10 - Reação de transesterificação para obtenção de biodiesel.....	33
Figura 11 -Taxa de corrosão do aço 1020 após imersão em óleo diesel e suas misturas com biodiesel (B50 e B100) por 1200 h em diferentes temperaturas.	36
Figura 12 -Taxa de corrosão do aço 1020 em imersão em óleo diesel e misturas diesel-biodiesel após 400 e 800h.	38
Figura 13 - Características do inserto de corte.....	40
Figura 14 - Fresa e insertos.	40
Figura 15 - Fluxograma das etapas de trabalho.....	43
Figura 16 - Configurações de fresamento (em relação à trajetória da ferramenta na peça) utilizadas na preparação dos corpos de prova.	44
Figura 17 - Regiões de medição dos parâmetros de acabamento superficial.	45
Figura 18 - Teste de Tukey para a variável profundidade de corte.	47
Figura 19 - Corpos de prova para o ensaio de imersão e frestas.....	48
Figura 20 - Ensaio de imersão total, frestas e contato com fase de vapor.	48
Figura 21 - Textura das superfícies das regiões 1, 2 e 3 de corpos de prova das ...	51
Figura 22 - Comparação entre as médias dos valores de Ssk das 52	52
Figura 23 - Intervalos das diferenças entre as médias de Ssk das 53	53
Figura 24 - Comparação entre as médias dos valores de Sku das 53	53
Figura 25 - Intervalos das diferenças entre as médias de Sku das 54	54
Figura 26 - Comparação entre as médias dos valores de Svk (μm) das..... 54	54
Figura 27 - Intervalos das diferenças entre as médias de Svk (μm) das..... 55	55

Figura 28 - Comparação entre as médias de Svk (μm) das	56
Figura 29 - Intervalos das diferenças entre as médias de Svk (μm) das	56
Figura 30 - Comparação entre as médias dos valores de Svk(μm) na	57
Figura 31 - Intervalo das diferenças entre as médias de Svk (μm) da	57
Figura 32 - Comparação entre as superfícies de um corpo de prova da configuração B imerso na mistura B15.....	58
Figura 33 - Comparação entre as superfícies de um corpo de prova da configuração A imerso na mistura B30.....	59
Figura 34 - Intervalos das diferenças entre médias do Ssk (a), Sku (b) e Svk(c)	60
Figura 35 - Topografia das superfícies de um corpo de prova da configuração A após imersão em biodiesel (B100).	62
Figura 36 - Intervalos das diferenças entre médias de Ssk de corpos de prova da configuração A em biodiesel (B100).	62
Figura 37 - MeV (500x) das regiões do ensaio de imersão (a) e frestas (b).....	63
Figura 38 - Comparação entre as médias dos valores de Ssk em 0h e 2400h de ensaios, configuração de usinagem A.	64
Figura 39 - Intervalos das diferenças entre médias do Ssk entre 0h e 2400h de ensaios – Configuração A.....	65
Figura 40 - Comparação entre as médias dos valores de Sku em 0h e 2400h de teste, configuração de usinagem A.....	66
Figura 41 - Intervalos das diferenças entre médias do Sku entre 0h e 2400h de teste - Configuração A.....	66
Figura 42 - MeV (500x) das regiões de um corpo de prova da configuração A após 2400h de ensaio.	67
Figura 43 - Intervalos das diferenças entre médias do Svk das amostras da	68
Figura 44 - MeV (500x) das regiões de um corpo de prova da configuração B após 2400h de ensaio.	69
Figura 45 - MeV (500x) das regiões de um corpo de prova da configuração C após 2400h de ensaio.	70
Figura 46 - MeV (500x) da região 2 de corpos de prova das configurações de usinagem A, B e C após 2400h de ensaio.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais ácidos graxos livres de alguns óleos e gorduras.....	34
Tabela 2 - Parâmetros de qualidade do biodiesel.....	41

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI - *American Iron and Steel Institute.*

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

APC - Aresta Postiça de Corte.

ASTM - *American Society of Testing Materials.*

B5 - Mistura contendo 5% (v/v) de biodiesel e óleo diesel (95% - v/v)

B7 - Mistura contendo 7% (v/v) de biodiesel e óleo diesel (93% - v/v)

B15 - Mistura contendo 15% (v/v) de biodiesel e óleo diesel (85% - v/v)

B30 - Mistura contendo 30% (v/v) de biodiesel e óleo diesel (70% - v/v)

B40 - Mistura contendo 40% (v/v) de biodiesel e óleo diesel (60% - v/v)

B50 - Mistura contendo 50% (v/v) de biodiesel e óleo diesel (50% - v/v)

B100 - Biodiesel sem adição de óleo diesel.

CNC - Comando Numérico Computadorizado.

EDS - *Energy Dispersive Spectroscopy.*

EN - *European Standard.*

FAME - *Fatty Acid Methyl Ester.*

ISO - *International Organization for Standardization.*

KOH - Hidróxido de Potássio.

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura.

NO_x - Óxidos de nitrogênio.

PPM - Partes por milhão.

SAE - *Society of Automotive Engineers.*

S10 - Óleo diesel comercial contendo 10 mg/kg de teor de enxofre.

S500 - Óleo diesel comercial contendo 500 mg/kg de teor de enxofre.

LISTA DE SÍMBOLOS

Cl^- - Íon cloreto.

m_{r1} - Razão de material na curva de Abbot-Firestone, em relação aos picos da superfície.

m_{r2} - Razão de material na curva de Abbot-Firestone, em relação aos vales da superfície.

Na^+ - Íon de sódio.

R_a - Rugosidade média aritmética.

R_p - Altura máxima dos picos, medido em relação a um comprimento de amostragem.

S_p - Altura máxima dos picos, medido em relação a uma área de amostragem.

R_v - Profundidade máxima dos vales a um comprimento de amostragem.

S_v - Profundidade máxima dos vales, medido em relação a uma área de amostragem.

R_{sk} - Grau de assimetria das alturas de uma superfície (*skewness*), medido em relação a um comprimento de amostragem.

S_{sk} - Grau de assimetria das alturas de uma superfície (*skewness*), medido em relação a uma área de amostragem.

R_t - Altura máxima do perfil.

S_k - Altura do núcleo da superfície.

S_{pk} - Altura reduzida de pico.

S_{ku} - Curtose das alturas do perfil da superfície, medido em relação a uma área.

S_{vk} - Profundidade reduzida de vale.

S_z - Valor absoluto da diferença entre o pico mais alto e do vale mais profundo.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
3	REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1	INTEGRIDADE SUPERFICIAL	17
3.1.1	Acabamento Superficial	19
3.1.2	Corrosão e Acabamento Superficial	24
3.1.3	Parâmetros de Rugosidade 3D	28
3.2	CORROSÃO DE MATERIAIS METÁLICOS EM CONTATO COM BIODIESEL.....	32
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1	AÇO SAE 1020	39
4.2	INSERTO E FERRAMENTA DE CORTE	39
4.3	PARÂMETROS DE QUALIDADE DO BIODIESEL	41
4.4	MÉTODOS	43
4.5	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	45
4.5.1	Acabamento Superficial	45
4.5.2	Análise Estatística dos Parâmetros de Superfície	46
4.6	ENSAIOS DE CORROSÃO.....	47
4.7	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS)	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES ANTES DOS ENSAIOS.....	51
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES APÓS OS ENSAIOS DE IMERSÃO E FASE DE VAPOR.....	58
6	CONCLUSÕES	73
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação produzem superfícies caracterizadas por topografia (forma), propriedades mecânicas e metalúrgicas, e esses aspectos indicam que a superfície é constituída por complexas características inter-relacionadas e que influenciam seu desempenho funcional (GRZESIK; KRUSZYNSKI; RUSZAJ, 2010). Nas mais diversas aplicações em campo, peças ou componentes finais devem apresentar uma ou várias propriedades, tais como resistência ao desgaste, à fadiga superficial ou à corrosão, por exemplo, visto que uma superfície deve ser capaz de executar muitas funções em diversos ambientes relativamente complexos e o comportamento do material utilizado depende da superfície gerada pelo seu processo de fabricação, da área de contato superficial e das características do ambiente que ele é submetido (ASTAKHOV, 2010).

Para a obtenção de determinadas propriedades superficiais é necessário conhecer os fenômenos envolvidos nos mais diversos processos de fabricação ou preparação de superfícies, principalmente no que se refere à variação dos parâmetros de processo e seus efeitos na superfície final. Assim, desenvolveu-se estudos com o objetivo de otimizar as superfícies obtidas em processos de usinagem, por exemplo, visando melhorar o desempenho de componentes em aplicações nas áreas biomédica, espacial e automotiva, que requerem superfícies cuidadosamente projetadas para as mais diversas funções (MSAOUBI et al., 2008; YUE et al., 2018).

Paralelamente ao desenvolvimento de novos materiais e à otimização de processos de fabricação, a preocupação com a escassez de recursos naturais não renováveis, bem como os efeitos associados às ações antropogênicas, levou a sociedade a repensar suas práticas de geração e consumo de energia. Nesse contexto de desenvolvimento sustentável outras fontes de energia passaram a fazer parte da matriz energética de diversos países, entre as quais os biocombustíveis passaram a ter um papel de grande destaque no cenário internacional. Os biocombustíveis se caracterizam basicamente por serem obtidos a partir do processamento de recursos naturais de origem renovável. Como exemplo, destacam-se o biodiesel, produzido principalmente a partir de óleos de origem vegetal e animal, e o etanol obtido da cana-de-açúcar, milho, entre outras (KOÇAR; CIVAŞ, 2013). Esses dois biocombustíveis têm uma grande contribuição para a

redução das emissões de poluentes atmosféricos, tais como monóxido e dióxido de carbono, fuligem e dióxido de enxofre. Quando um biocombustível é queimado o dióxido de carbono resultante desta queima pode ser absorvido pelas plantas através do processo de fotossíntese, ou seja, todo o carbono emitido é reabsorvido por meio do ciclo do carbono, contribuindo assim para a produção futura dos biocombustíveis (GAZZONI, 2014; HANAOKI; PORTUGAL-PEREIRA, 2018).

Na combustão em motores do ciclo Otto e ciclo Diesel diversas peças e componentes do motor entram em contato direto com o combustível, em sua forma líquida ou pulverizada, nas mais variadas condições tribológicas. Durante este processo, algumas propriedades de lubrificação são necessárias, pois o combustível também exerce a função de lubrificante para algumas peças. Sendo assim, uma série de problemas mecânicos pode ocorrer durante o funcionamento e uso contínuo dos motores devido às características de qualidade do combustível, tais como incompatibilidade com materiais das peças, formação de depósitos, entupimento de filtros, oxidação de bicos injetores, catalisadores, etc (HASEEB et al., 2011).

Em relação aos materiais utilizados na fabricação de componentes empregados pela indústria automobilística, pode-se citar as válvulas de exaustão e escape e tubulação de alta pressão, produzidas em aço, bomba de injeção de combustível (ligas de alumínio, ligas de cobre), tanque de combustível, em aço e polímero, bicos injetores em aço inoxidável, cilindros em ferro fundido e ligas de alumínio, pistão em ligas de alumínio, entre outros (BHALE; SORATE, 2013). Além disso, muitos materiais não metálicos fazem parte da composição de peças e componentes utilizados pelos diversos agentes da cadeia dos combustíveis, tais como poliuretano, borracha nitrílica e politetrafluoretileno, empregados em mangueiras de bombas de abastecimento, etc (HASEEB et al., 2011).

No contexto dos combustíveis utilizados pela frota de veículos pesados e de transporte público, um ponto importante é o fato de que a inserção do biodiesel na matriz energética veicular pode levar à corrosão de suas peças e reduzir a vida útil do motor (SETIAWAN et al., 2018). Tal ocorrência é creditada à presença de ácidos orgânicos, aldeídos, peróxidos, cetonas e ésteres (HASEEB et al., 2011).

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) fixou em outubro de 2020 a adição de 10%, em volume, de biodiesel no óleo diesel vendido ao consumidor final, respeitando o limite máximo de 15%, B15 (ANP,

2020a). O objetivo é que a mistura B30 seja utilizada no Brasil até 2030, condicionada aos testes que deverão ser realizados pela indústria automotiva, a fim de entender o comportamento das peças dos motores quando em funcionamento com o combustível.

Na literatura especializada existem poucos estudos que tratam do efeito da superfície no comportamento à corrosão de peças metálicas em contato com biodiesel e suas misturas, e sabe-se que os parâmetros de acabamento superficial, como rugosidade e marcas de avanço, têm papel relevante na resistência à corrosão de materiais metálicos. Em virtude da importância desses parâmetros e do conhecimento do comportamento do aço usinado em diferentes condições de corte e em contato com biodiesel e suas misturas, em diferentes proporções com óleo diesel, o presente tema foi escolhido para ser estudado. Este estudo contribui para o entendimento das diversas variáveis envolvidas na estabilidade dos biocombustíveis em contato com materiais metálicos, bem como seus efeitos sobre a superfície no metal.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar a influência do acabamento superficial, decorrente da operação de fresamento frontal em diferentes configurações de avanço da ferramenta, na resistência à corrosão do aço SAE 1020 quando em contato com biodiesel (B100) e as misturas entre diesel e biodiesel (B15 e B30). Os objetivos específicos resumem-se em:

- Relacionar a variação das configurações de fresamento frontal, relativas ao sentido de avanço e deslocamento da ferramenta, com as características topográficas da superfície obtida;
- Caracterizar regiões de intersecção entre as trajetórias da ferramenta nas peças e verificar se o acabamento superficial é fator significativo na corrosão com o biodiesel e suas misturas.

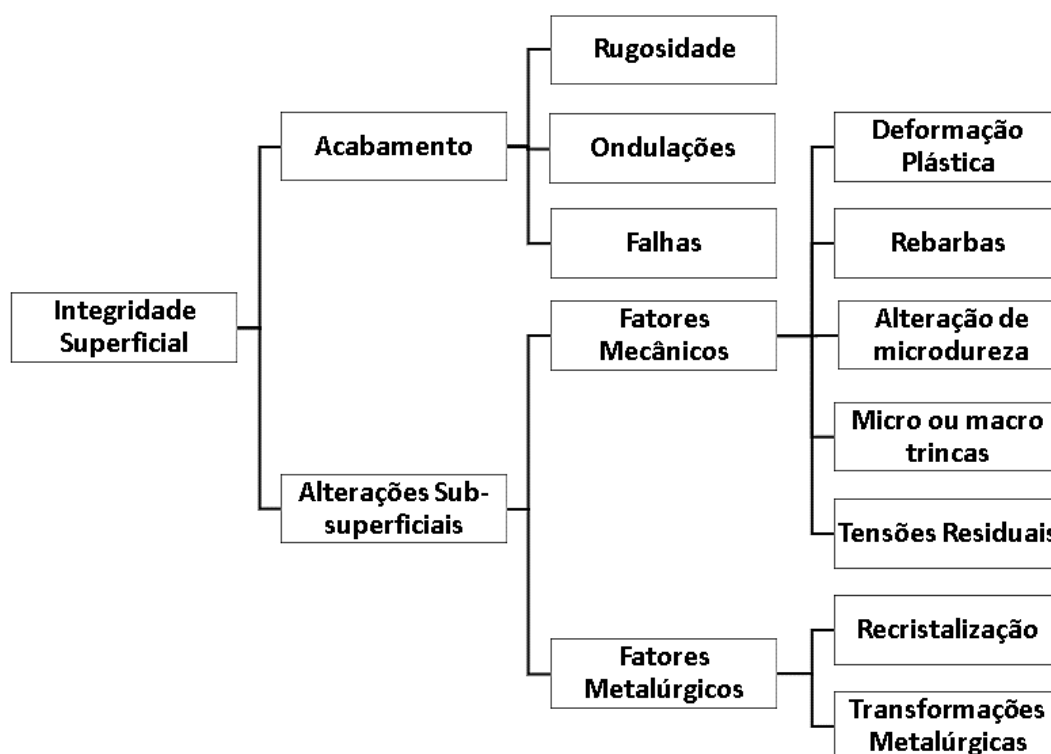
3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados assuntos relativos à integridade superficial, com foco no acabamento superficial no fresamento, a relação entre corrosão e acabamento superficial e a compatibilidade do biodiesel e suas misturas com materiais metálicos.

3.1 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

O termo integridade superficial pode ser definido como sendo um conjunto de alterações em uma superfície obtida em um processo de fabricação, bem como os efeitos dessas alterações nas propriedades do material e no desempenho funcional da superfície gerada (FIELD; KAHLES; KOSTER, 1989). O estudo da integridade superficial envolve resumidamente dois aspectos, o acabamento superficial e as alterações subsuperficiais (Figura 1).

Figura 1 - Classificação da Integridade Superficial.



Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015)

Várias tecnologias são empregadas para obtenção de confiabilidade na utilização de materiais em aplicações onde há solicitações de origem térmica, mecânica e/ou química. Segundo Astakhov (2010), a engenharia de superfícies tem sido muito utilizada nas últimas décadas e pode ser definida como sendo o projeto de uma superfície executado de modo a garantir as melhores características de desempenho com o menor custo possível. Essa definição mostra que, para o desenvolvimento dessas superfícies, é necessário um elevado grau de atividades interdisciplinares.

O sucesso da implementação da engenharia de superfícies requer uma abordagem integrada nos estágios de projeto. Levando em conta esse aspecto é possível obter as propriedades desejadas, incluindo resistência à corrosão através de uma camada de material sacrificial; resistência à oxidação e/ou à sulfidação; resistência ao desgaste; aumento da resistência à fadiga superficial, da dureza ou tenacidade; propriedades elétricas; melhoramento de propriedades térmicas, entre outras (ASTAKHOV, 2010).

A integridade da superfície é fortemente dependente do processo de fabricação, do ambiente de superfície livre, da interface e condições de trabalho em sistemas tribológicos (PETROPOULOS; PANDAZARAS; DAVIM, 2010). Durante o processo de usinagem, ou até mesmo nas fases de fabricação do material, por exemplo, podem ocorrer condições desfavoráveis à obtenção de características desejáveis para as superfícies, tais como tensões residuais causadas por deformação plástica e efeitos da variação de temperatura, transformações metalúrgicas e mudanças microestruturais, trincas e microtrincas, inclusões indesejáveis, presença de pites e ataque corrosivo intragranular, devido à ação de fluidos corrosivos (ASTAKHOV, 2010).

Mudanças estruturais nos materiais são comuns em processos de usinagem, alterando de maneira significativa as características das peças fabricadas. No processo de retificação, por exemplo, há utilização de elevada quantidade de energia para remoção de material, e conseqüentemente, a temperatura do processo eleva-se substancialmente, uma vez que boa parte dessa energia é convertida em calor (ASTAKHOV, 2010). Fatores como marcas da ferramenta de corte, estabilidade da máquina, microestrutura do material e fixação da peça e da ferramenta também têm influência na integridade superficial. A estabilidade dinâmica

do processo é fundamental para a obtenção de uma boa superfície (GRZESIK; KRUSZYNSKI; RUSZAJ, 2010).

Field, Kahles e Koster (1989) apontam para dois fatores que podem melhorar a integridade da superfície. Um deles é a seleção apropriada das condições de usinagem, de modo que a vida útil da ferramenta não sofra redução drástica durante o corte e promova um bom acabamento superficial; o segundo fator é a utilização de ferramentas afiadas, pois estas geram maior controle sobre a dinâmica do processo de corte.

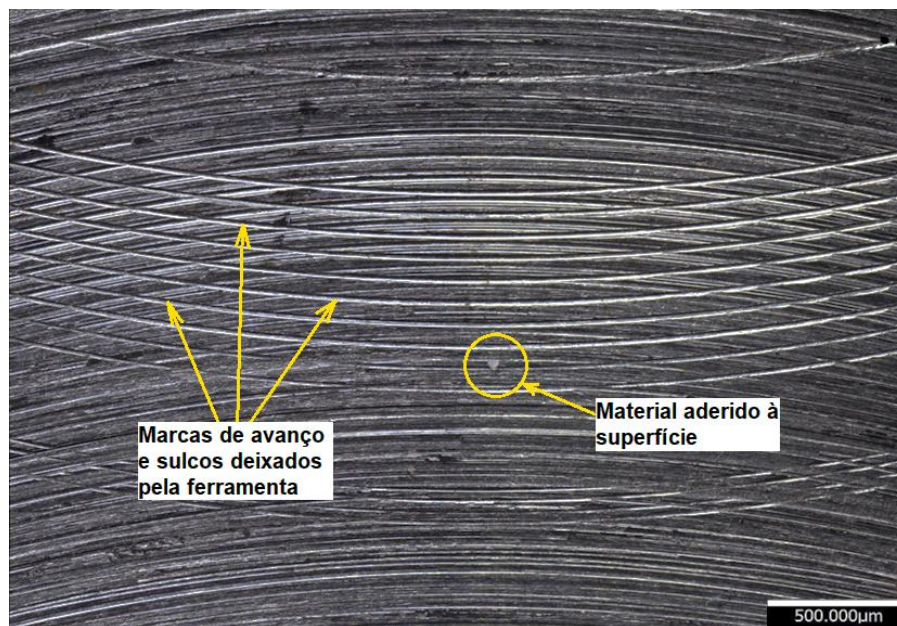
Assim sendo, conclui-se que o bom desempenho funcional de peças usinadas depende do conhecimento das diversas variáveis envolvidas durante o processo de fabricação, sendo necessária grande atenção às características das superfícies geradas.

3.1.1 Acabamento superficial

O acabamento superficial é uma descrição das características de uma superfície usinada, resultante da combinação de fatores como rugosidade, ondulações e falhas (MACHADO et al., 2015). A precisão dimensional, as propriedades e o desempenho de uma peça em serviço sofrem influência do acabamento de suas superfícies (KALPAKJIAN; SCHMID, 2013).

Kalpakjian e Schmid (2013) definem a rugosidade como sendo desvios irregulares estreitamente espaçados, e é expressa em termos de altura, largura e distância ao longo de uma superfície. Segundo Machado et al. (2015), em usinagem a rugosidade é composta por irregularidades microgeométricas resultantes da ação do processo de corte, o que inclui marcas de avanço, desgaste da ferramenta, aresta postiça de corte entre outros (Figura 2), e em muitos casos é utilizada como parâmetro de saída para controlar as variáveis do processo de usinagem.

Figura 2 - Marcas de avanço, material aderido à superfície e sulcos em uma superfície usinada.

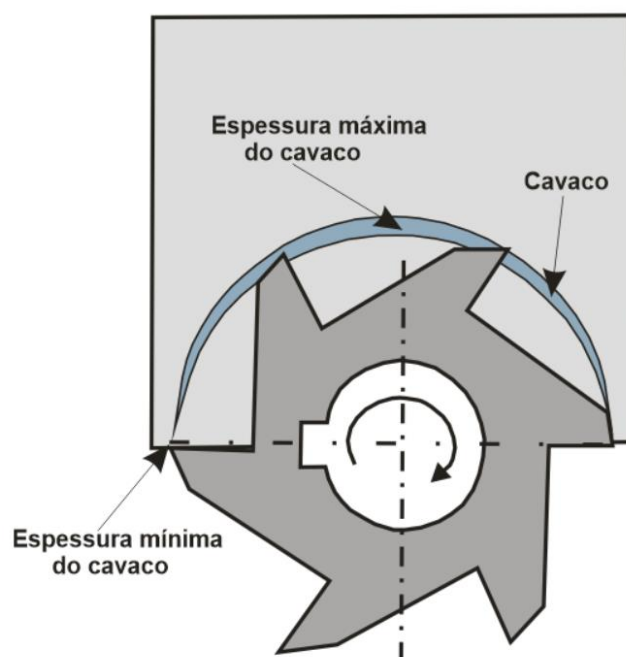


Fonte: O Autor

Existem aplicações onde o valor de rugosidade da superfície é um parâmetro necessário, como por exemplo em componentes de máquina que fazem parte de sistemas tribológicos, tais como camisas de cilindros dos motores de combustão interna que devem apresentar boa capacidade de retenção de óleo lubrificante para minimizar o desgaste por atrito. Por outro lado, em superfícies que estarão submetidas ao escoamento de fluidos, são necessários baixos valores de rugosidade superficial para diminuir o efeito da perda de carga por atrito (MACHADO et al., 2015).

No processo de fresamento são utilizadas ferramentas que possuem várias arestas cortantes dispostas simetricamente em relação a um eixo de rotação e tem como particularidade o fato de ser uma operação de corte intermitente (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). O material removido da peça é denominado cavaco e apresenta espessura variável durante o corte, levando a variações cíclicas das forças de corte (Figura 3). A espessura do cavaco não-deformado exerce forte influência nas imperfeições da superfície usinada e conseqüentemente afeta a rugosidade superficial (FRANCO; ESTREMS; FAURA, 2004). Variações nas forças durante o corte podem causar vibrações no processo e podem reduzir a vida útil da ferramenta, bem como prejudicar o acabamento superficial (SHAW, 2005).

Figura 3 - Variação de espessura do cavaco no fresamento.



Fonte: O Autor

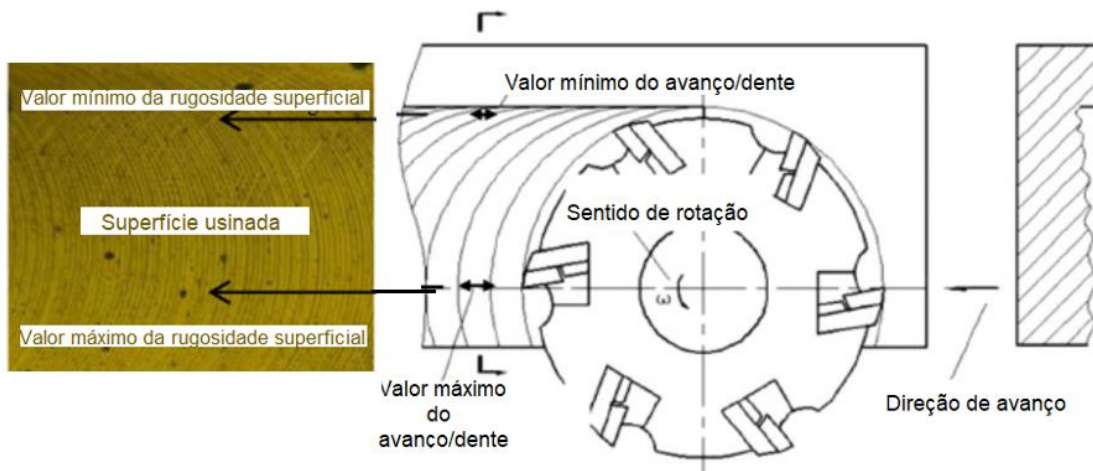
A ferramenta utilizada nesse processo apresenta duas arestas de corte unidas pelo raio de ponta, sendo a aresta principal a responsável pela remoção de material, enquanto que a aresta secundária está relacionada com a rugosidade da superfície obtida (LACALLE; CAMPA; LAMIKIZ, 2011). As marcas na superfície são produzidas por dentes que estão em um mesmo plano, e estas marcas são periódicas devido ao avanço da ferramenta a cada rotação. Teoricamente, a rugosidade da superfície pode ser calculada em função do avanço por dente e da geometria da, porém, na prática o valor da rugosidade também é influenciado pelo alinhamento entre o eixo árvore e a peça, entre outros fatores (WHITEHOUSE, 2004).

Em relação aos parâmetros de processo, baixos valores de velocidade de corte contribuem para a formação de uma Aresta Postiça de Corte (APC), que é formada por material já retirado da peça e acumulado na ponta da ferramenta. Esse fenômeno contribui para a queda da qualidade superficial da peça, pois partes da APC são cisalhadas durante o processo e permanecem aderidas à superfície da peça. Uma solução para esse problema é o aumento da velocidade de corte, que também provoca um aumento de temperatura na região de corte. Assim, o material da peça perde resistência mecânica e os esforços de corte diminuem; porém, um aumento de temperatura pode acelerar mecanismos de desgaste da ferramenta,

além do fato de que maiores velocidades de corte implicam em aumento da vibração do eixo-árvore da máquina, prejudicando a qualidade superficial (MACHADO et al., 2015).

A influência da variação da espessura do cavaco em peças fresadas é mostrada na Figura 4. Quando o valor do avanço é mínimo a rugosidade pode atingir o seu menor valor, enquanto que no plano que passa pelo centro de rotação da fresa o cavaco apresenta a maior espessura, e então a rugosidade pode atingir um valor máximo. Também é possível observar as marcas deixadas pela ferramenta na peça.

Figura 4 - Rugosidade e direção de avanço no fresamento frontal.



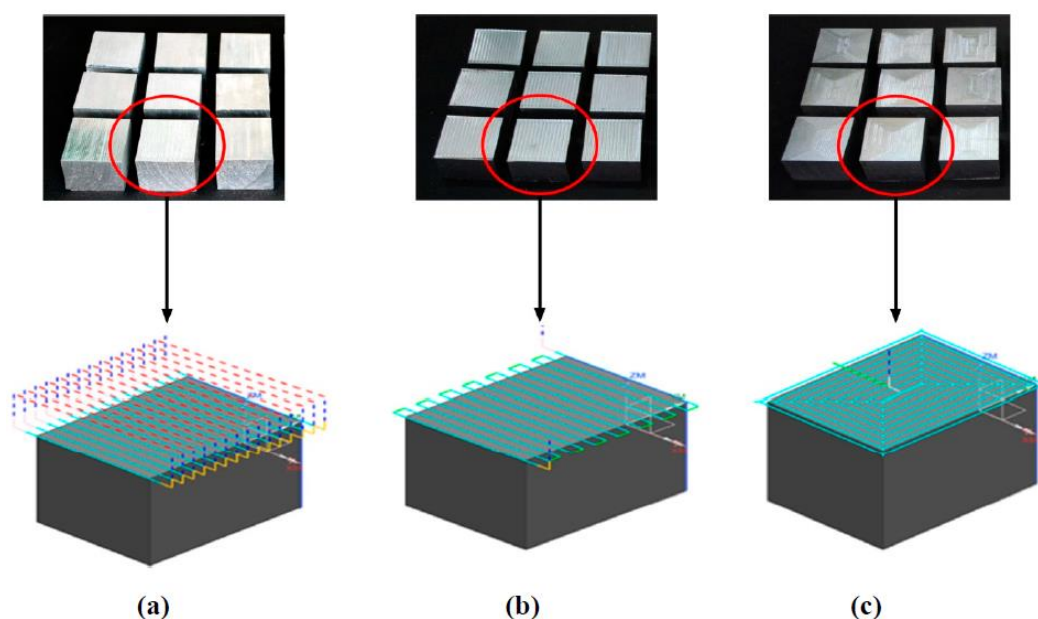
Fonte: Adaptada de Zhenyu, Luning e Zhanqiang (2015)

A penetração de trabalho (a_e) também tem papel importante no acabamento superficial e quando esta é menor do que o diâmetro da fresa, o valor das forças de corte pode variar significativamente durante o processo, tendo efeito direto na energia consumida durante o processo e no acabamento superficial da peça. O valor de a_e determina o número de dentes que atuam simultaneamente durante o corte, o que causa variações nas forças instantâneas em cada dente, e isto pode levar à ocorrência de vibrações indesejáveis e condições instáveis de corte. Sendo assim, é possível determinar a melhor posição relativa entre a fresa e a peça, de modo que sejam obtidos menores valores de rugosidade para esse tipo de operação (PIMENOV et al., 2019).

A estratégia de movimentação da ferramenta é fator importante nos processos de fresamento das indústrias de matrizes e aeroespacial podendo

influenciar a qualidade superficial obtida em uma peça usinada (Figura 5). Ali et al. (2019) analisaram a influência do caminho da ferramenta na rugosidade de peças da liga de alumínio Al 2024, utilizando como variáveis de entrada, em três níveis, a velocidade de corte, o avanço, a profundidade de corte e a estratégia de deslocamento da fresa, esta última classificada como contorno, “zig-zag” e “zig”.

Figura 5 - Estratégias de movimentação da ferramenta na peça: Zig (a), Zig Zag (b) e contorno (c).



Fonte: Ali et al. (2019)

A estratégia de contorno (Figura 5-c) forneceu a melhor topografia da superfície, e as marcas de avanço não eram visíveis se comparadas às das outras condições testadas.

Jabbaripour, Sadeghi e Faridvand (2010) estudaram o efeito da variação do caminho percorrido pela fresa na qualidade superficial e na força de corte, para peças de aerofólios em alumínio. As peças apresentam partes que podem ser consideradas como vigas em balanço sujeitas à deflexão pela ação das forças de corte. Foram testadas 4 direções de deslocamento da fresa. Foi observado que a direção de deslocamento transversal ao comprimento do aerofólio, partindo da base em direção à borda, apresentou os menores valores de rugosidade e forças de corte, devido à menor espessura do cavaco nessa configuração. Nota-se que a

escolha da configuração do fresamento tem efeito crítico na obtenção de uma boa qualidade superficial.

Outro ponto importante, a respeito das marcas deixadas pela ferramenta na peça, são as intersecções que ocorrem devido à passagem do dente em uma região que já sofreu remoção de material. Essas regiões também são objeto de estudo neste trabalho, e são apresentadas na seção Materiais e Métodos.

3.1.2 Corrosão e Acabamento Superficial

A corrosão de materiais metálicos, de maneira geral, pode ser definida como sendo a deterioração do mesmo sob a ação de fatores químicos ou eletroquímicos, com ou sem a presença de esforços mecânicos. É um fenômeno de extrema importância pois promove a constante transformação de um material metálico, afetando a sua durabilidade e seu desempenho (GENTIL, 2011).

Os danos decorrentes da corrosão representam um risco para a segurança de funcionários e instalações, sendo que as ações de reparo desses efeitos corrosivos têm um custo muito elevado (WEBER, 2017). O entendimento da corrosão é um fator que possibilita que materiais utilizados em projetos que exigem alto nível de confiabilidade tenham desempenho satisfatório em suas funções, tais como em reatores, vasos de pressão, estruturas metálicas, aplicações automobilísticas e aeronáuticas.

Astakhov (2010) afirma que superfícies metálicas decorrentes de processos de usinagem estão sujeitas à oxidação quando expostas ao ar, em função da tendência de formação de óxido pelo metal que a compõe (menor estado energético). Devido às deformações plásticas da camada superficial, as partículas de óxido são direcionadas para a superfície, e a camada de óxido formada cresce condicionada à difusão de átomos do metal e do oxigênio através da camada superficial. Porém, os metais podem resistir à corrosão quando há formação de um filme passivo na superfície, formado quando o metal é exposto ao ar por determinado tempo, sendo a imunidade do filme ao ataque químico função da composição do mesmo, da temperatura e do meio corrosivo (SCHWEITZER, 2009).

Alguns resultados na literatura mostram que superfícies com melhor acabamento superficial apresentam melhor resistência à corrosão em relação a superfícies que não foram submetidas a operações de acabamento. Processos

como polimento e retificação permitem a obtenção de superfícies com baixos valores de rugosidade. Porém, segundo Gumpel e Hörtnagl (2016) não há resultados gerais que indiquem que superfícies retificadas ou polidas são mais adequadas para aplicações que envolvem ambientes corrosivos.

De acordo com Alvarez et al. (2010) e Hilbert et al. (2003) a composição química e a rugosidade superficial são fatores importantes nas propriedades de corrosão dos materiais. O formato e distribuição dos picos e vales resultantes dos tratamentos da superfície também são fatores importantes na corrosão, além das imperfeições no metal base e as inclusões sulfídicas, sendo que a presença dessas é capaz de formar uma fraca camada passiva na superfície, diminuindo a resistência à corrosão (GÜMPEL; HÖRTNAGL, 2016). Para superfícies lisas observa-se um potencial reduzido para a ocorrência da corrosão por pites (TOLOEI; STOILOV; NORTHWOOD, 2013).

Para materiais metálicos a literatura em geral mostra que a taxa de corrosão se torna maior em superfícies que apresentam maiores valores de rugosidade (TOLOEI; STOILOV; NORTHWOOD, 2015). Essa tendência foi observada para ligas de alumínio, níquel, e cobre, além do aço inoxidável, magnésio e titânio. Também é reportado que o aumento da rugosidade superficial de ligas de magnésio e do aço inoxidável aumenta a susceptibilidade à ocorrência de pites e aumento da taxa de corrosão (HONG; NAGUMO, 1997). Segundo Geller et al. (2008), o comportamento à corrosão do aço carbono não é muito bem definido devido à divergência dos dados obtidos experimentalmente, porém é fato que o aço carbono apresenta boa resistência à corrosão (CAO et al., 2007).

Para metais com habilidade de formação de uma camada passiva estável, como por exemplo o aço inoxidável austenítico 314L, a diminuição da rugosidade superficial devido à presença de uma camada de óxido na superfície aumenta sua resistência à corrosão (ABOSRRA et al., 2009). Segundo Sharland (1987), uma superfície metálica pode ser considerada passiva quando apresenta certa resistência à corrosão em determinado ambiente, embora haja uma tendência termodinâmica para a ocorrência de reação química. Isto significa que existe um estado passivo, e as condições para que ele permaneça estão relacionadas com o potencial elétrico do metal em questão e a composição química da solução em torno dele. Também foi proposto pelo autor que a concentração local de uma solução é

influenciada pelas condições da superfície, ou seja, seus valores de rugosidade podem exercer influência na difusão de íons ativos durante o processo de corrosão.

Abosrra et al. (2009) analisaram o efeito das condições da superfície e sua influência na corrosão dos aços SAE 1020 e AISI 314L em solução salina de 1 e 3% de NaCl. Neste estudo observou-se que grau de acabamento superficial teve influência no comportamento à corrosão desses metais. Para o aço SAE 1020, após polimento, a taxa de corrosão encontrada foi maior em comparação com amostras que foram lixadas com diferentes tamanhos de grão, e, conseqüentemente, apresentaram valores maiores de rugosidades. Segundo os autores, o aço 1020 apresentou uma camada de passividade relativamente fraca no início da corrosão e a mesma foi rompida devido à presença de íons Cl⁻. Esses íons são agentes oxidantes que combinam com o metal, formando cloretos. Além disso, esse comportamento foi atribuído à alta taxa de propagação da corrosão após o seu início, pois a corrosão por pites é controlada pelo processo de difusão e, uma vez iniciado, a quantidade de pites aumentou rapidamente devido à formação de meios ácidos nas profundidades dos vales (ABOSRRA et al., 2009).

Apesar do aço AISI 314L apresentar boa resistência à corrosão, devido à presença de cromo e pelo fato desse metal formar uma película protetora de óxido na superfície, pequenos efeitos da corrosão também foram observados. Diferentemente do aço SAE 1020, a diminuição da rugosidade promoveu maior resistência à corrosão. Esse comportamento foi atribuído ao fato de que, para esse material, a superfície mais lisa apresentou menor susceptibilidade à ruptura da camada passiva (ABOSRRA et al., 2009).

No estudo realizado por de Niu et al. (2019), foi avaliada a relação entre rugosidade e resistência à corrosão da liga de alumínio Al-Li 2497 em solução de NaCl 3%, e observou-se que as superfícies de menor rugosidade apresentaram a maior resistência à corrosão, devido ao fato de que estas têm menor área exposta ao meio corrosivo.

Parâmetros de rugosidade, tais como altura máxima dos picos (Rp), profundidade máxima dos vales (Rv) e altura máxima do perfil (Rt) foram utilizados por Takahashi et al (2020) para avaliar a resistência à corrosão do aço 1020 em solução de NaCl 0,5 mol/L. O material foi submetido ao fresamento e à retificação para obtenção de diferentes valores de rugosidade. Verificou-se que o acabamento superficial influenciou significativamente a resposta eletroquímica sendo que a

retificação apresentou o menor valor de rugosidade ($R_p=0,703 \mu\text{m}$ contra $R_p=3,904 \mu\text{m}$ do fresamento), oferecendo uma superfície eletroquimicamente menos ativa e, portanto, mais resistente à corrosão.

Lage, Møller e Fallesen (2015) analisaram a influência das condições da superfície na resistência à corrosão de placas laminadas e recozidas de aço inoxidável (obtido conforme a norma EN 14404), em solução aquosa de cloreto de sódio e os resultados mostraram que a topografia da superfície exerceu papel importante na corrosão. A existência de grandes vales em superfícies mais rugosas favoreceu a ocorrência de corrosão localizada, ao passo que superfícies mais lisas apresentaram melhores propriedades de resistência.

A formação de pites em peças de aço inoxidável duplex 2205 foi investigada por Tang et al. (2019), utilizando técnicas de medição de ruído eletroquímico. Em solução aquosa a 50°C com 10% em volume de FeCl_3 , a frequência de formação de pites aumentou em superfícies que apresentaram maiores valores de rugosidade, porém a variação da rugosidade na superfície não teve influência na localização dos pites.

Toloei, Stoilov e Northwood (2013) realizaram estudos com níquel em solução de ácido sulfúrico 0,5 mol/L e concluíram que o acabamento superficial influenciou significativamente a corrosão do material estudado. Para as condições testadas, menores valores de rugosidade contribuíram para a diminuição da taxa de corrosão, e uma possível explicação está no fato de que em superfícies menos rugosas há menor área superficial de contato entre o metal e o eletrólito. Os autores também detectaram o aumento da quantidade de oxigênio nas amostras de níquel, mesmo nas situações de menor rugosidade superficial, fato esse explicado pela formação de camada de óxido nessas superfícies.

Parâmetros de rugosidade também podem ser utilizados para avaliar as condições das superfícies após testes de corrosão. Fazal, Haseeb e Masjuki (2011a) utilizaram a microscopia eletrônica de varredura e os parâmetros de rugosidade média aritmética (R_a) e altura máxima dos picos (R_p) para analisar superfícies atacadas por óleo diesel e biodiesel de palma (B100) após 1200h de imersão 80°C , e verificaram que as superfícies expostas ao biodiesel apresentaram maiores irregularidades, exibindo maiores valores de R_a e R_p , e sendo mais atacadas do que aquelas em contato com o óleo diesel.

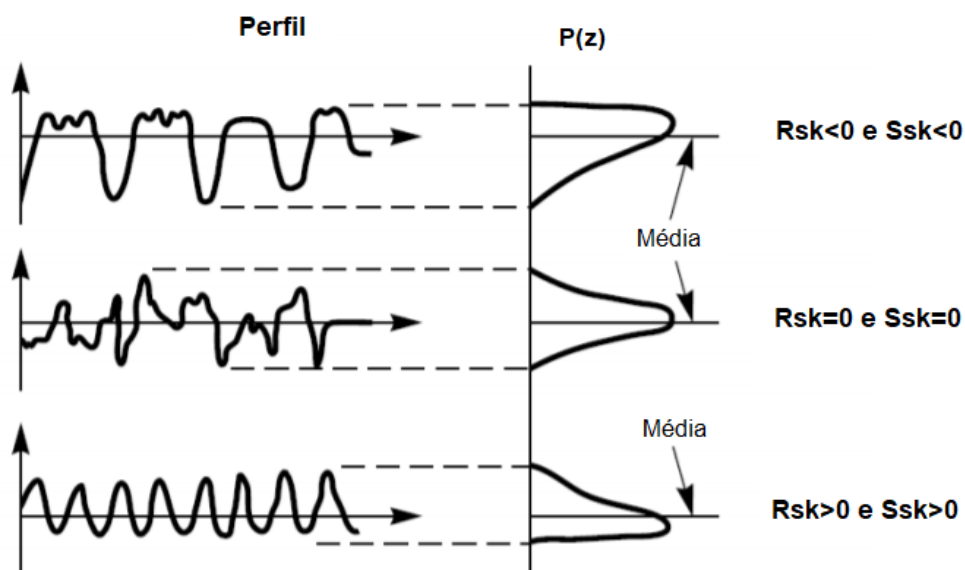
Com base nos resultados descritos, é possível evidenciar que existem muitas variáveis envolvidas na análise da influência da rugosidade no comportamento à corrosão de materiais e o estudo das condições de testes propostas no presente trabalho pode fornecer informações relevantes para o entendimento do assunto.

3.1.3 Parâmetros de Rugosidade 3D

Os parâmetros de rugosidade 3D ou de textura da superfície são avaliados com base em uma área de amostragem e têm sido frequentemente utilizados na caracterização da topografia das superfícies, pois fornecem informações sobre características operacionais das mesmas (VÁRADI et al., 2004; BLATEYRON, 2013). Segundo Surnam e Oleti (2012), o ataque da corrosão produz estruturas de picos e vales na superfície de metais, e a perfilometria tridimensional pode fornecer uma boa correlação entre os parâmetros de rugosidade e o processo de corrosão.

Segundo Grzesik (2016b), o desgaste causado pela corrosão é fortemente influenciado por parâmetros de altura, tais como a altura máxima (S_z), definido como sendo a soma dos valores absolutos do pico mais alto (S_p) e do vale mais profundo (S_v) da superfície analisada. Porém, o parâmetro S_z é muito sensível a picos ou vales isolados na superfície e é um bom parâmetro para indicar condições incomuns tais como rebarbas e erros no processo de fabricação (BLATEYRON, 2013). Outro importante parâmetro é o grau de assimetria ou *skewness* (S_{sk}), uma medida do grau de assimetria das alturas de uma superfície em relação a um plano médio (Figura 6). O grau de assimetria é calculado a partir da razão entre a média dos valores cúbicos das alturas da superfície e o cubo da raiz quadrática média dessas alturas.

Figura 6 - Três perfis de superfícies com diferentes valores de assimetria (*skewness*).

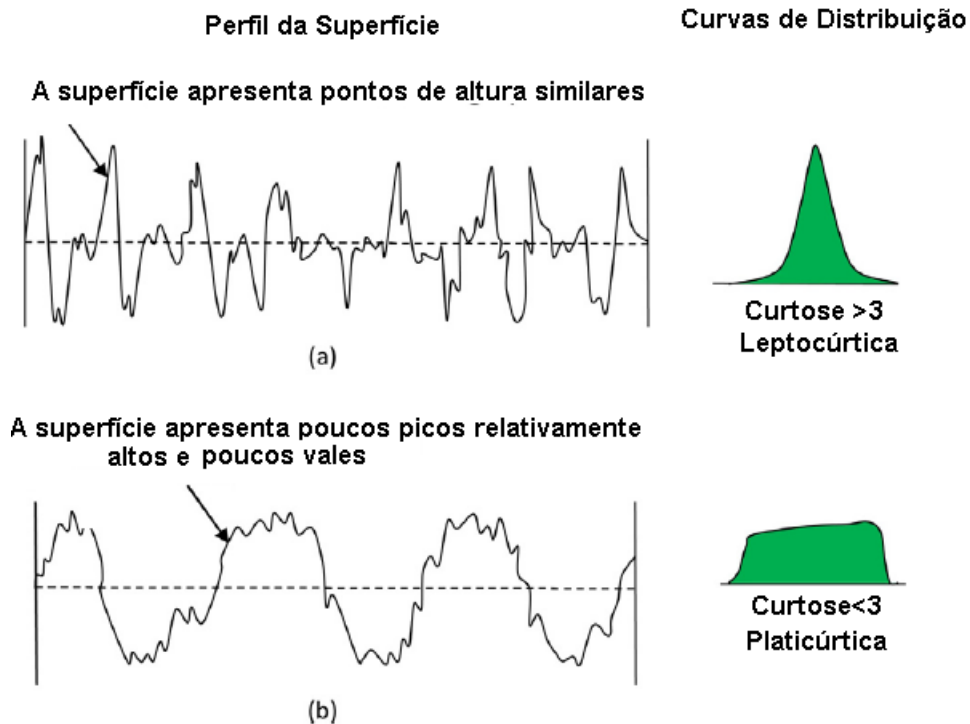


Fonte: Adaptado de Sahay e Ghosh (2018)

O grau de assimetria das alturas de uma superfície tem sua importância no estudo da corrosão. Segundo Blateyron (2013), quando positivo o valor da *skewness* está correlacionado com a predominância de picos na superfície, indicando que a mesma não possui boa capacidade de lubrificação. Além disso, superfícies com maior percentual de picos podem ser eletroquimicamente mais ativas em alguns pontos e tornarem-se suscetíveis à corrosão (BENKAFADA; KERDOUD; BOUCHOUCHA, 2018). Valores negativos de *Ssk* mostram que há predominância de vales na superfície analisada, e conseqüentemente a mesma pode reter boa parte de fluidos nesses vales (BLATEYRON, 2013).

A curtose do perfil das alturas de uma superfície (*Sku*) é uma medida do grau de achatamento ou agudeza dos picos presentes nesse perfil (Figura 7). Quando o valor de *Sku* é maior do que 3 (três) a superfície pode apresentar picos altos e agudos, ou vales profundos, sendo a distribuição chamada leptocúrtica; se $Sku < 3$ (distribuição platicúrtica), essa superfície pode apresentar picos mais achatados e vales de menor profundidade; um valor de curtose igual a 3 (três) indica que o perfil das alturas segue uma distribuição Gaussiana (ZENG et al., 2018).

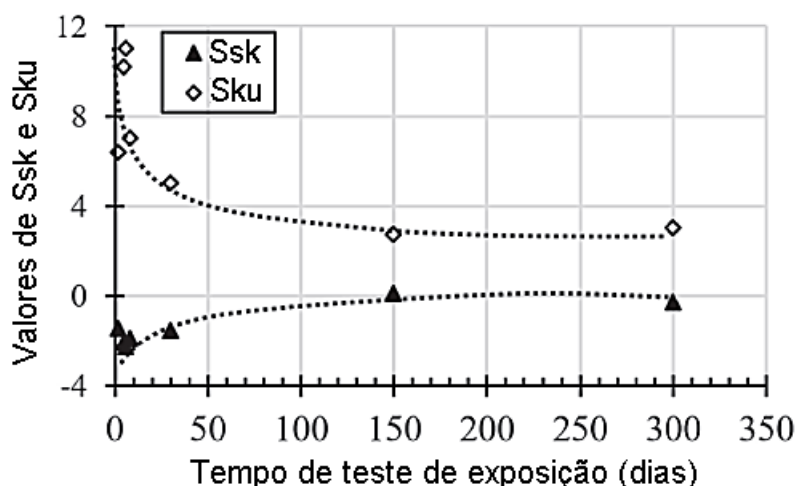
Figura 7 - Tipos de perfis de uma superfície e valores de curtose: leptocúrtica (a) e platicúrtica (b).



Fonte: Adaptado de Taufik e Jain (2017)

To, Umezawa e Shinohara (2018) verificaram que superfícies de aço expostas ao ar livre apresentaram valor de Sku próximo de 3 (três) ao longo do período de testes de corrosão, pois a distribuição das alturas estará próxima da linha média. Efeitos mais expressivos da corrosão fazem com que a superfície apresente uma distribuição de altura com baixos valores de curtose. Em estágios mais avançados de corrosão a *skewness* (Ssk) tem valor próximo de zero (Figura 8), devido à corrosão uniforme e formação de camada de óxido na superfície (TO; UMEZAWA; SHINOHARA, 2018).

Figura 8 - Variação dos parâmetros Ssk e Sku ao longo de testes de corrosão.

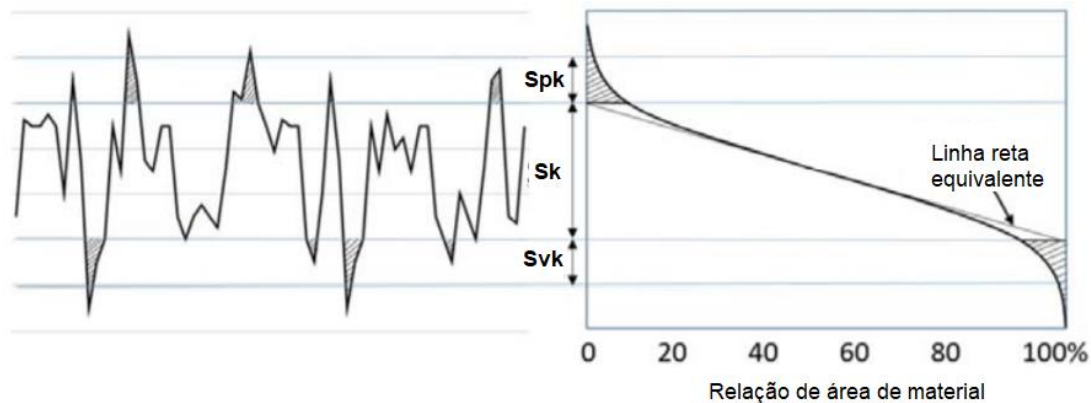


Fonte: Adaptado de To, Umezawa e Shinohara (2018)

Guangjun et al. (2020) chegaram a resultados similares aos de To, Umezawa e Shinohara (2018) ao analisar a resistência à corrosão de um molde de aço contendo cromo, molibdênio e vanádio em solução contendo 0,1 mol/L de ácido fluorídrico e 0,3 mol/L de ácido clorídrico. O molde foi usinado através do fresamento e foram utilizados valores de Ssk e Sku para caracterização das superfícies, além de medidas eletroquímicas para avaliar a relação entre os parâmetros de rugosidade citados e o comportamento eletroquímico da superfície. Para as condições testadas, as superfícies com valores de Ssk próximos de zero e Sku próximos de três apresentaram a maior resistência à corrosão. Segundo os autores, isto se justifica pelo fato de que essas superfícies são mais planas, favorecendo a distribuição uniforme de um filme de óxido e, conseqüentemente, uma distribuição mais lenta de cargas elétricas entre o meio corrosivo e a superfície.

O parâmetro Svk é definido como sendo uma medida da profundidade dos vales abaixo da rugosidade do núcleo da superfície, e é obtido a partir da curva de Abbott-Firestone (Figura 9). Criada por Abbot e Firestone em 1933, a curva tem sido uma ferramenta útil para avaliar a textura de uma superfície e as modificações em sua forma (GEORGESCU et al., 2017). A parte superior da curva caracteriza as asperezas relacionadas à área real de contato, enquanto a parte inferior relaciona-se com a capacidade de retenção de fluidos nos vales da superfície (RÎPĂ et al., 2003). Superfícies que possuem vales mais profundos podem apresentar menor resistência à corrosão em relação às que possuem menores valores de profundidade de vales (GRZESIK, 2016a).

Figura 9 - Parâmetro S_{vk} na curva de Abbot-Firestone.



Fonte: Adaptado de Heidari e Yan (2017)

Com base na literatura pode-se concluir que a geometria de picos e vales pode fornecer uma boa correlação com dados obtidos nos testes de corrosão. Sendo assim, os parâmetros S_{sk} , S_{ku} e S_{vk} foram selecionados para a análise das superfícies usinadas.

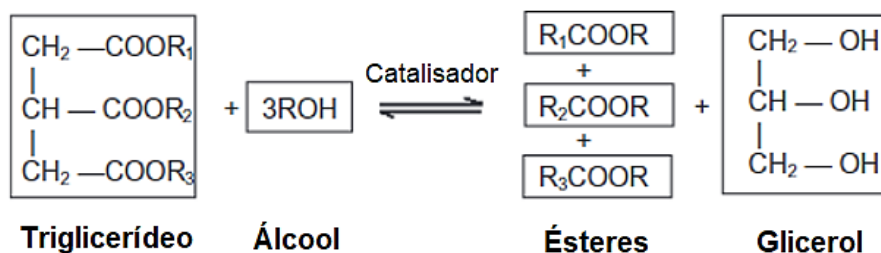
3.2 CORROSÃO DE MATERIAIS METÁLICOS EM CONTATO COM BIODIESEL

Obtido através de fontes consideradas renováveis, o biodiesel tem papel fundamental na matriz energética brasileira, junto de outros biocombustíveis, tais como etanol e bioquerosene de aviação (BioQAV). Quando comparado com o óleo diesel, que é o combustível utilizado em motores cujo ciclo termodinâmico também leva esse nome, o biodiesel apresenta em sua combustão valores menores de emissão de poluentes, tais como monóxido de carbono e fuligem, além de apresentar baixa toxicidade e não possuir enxofre em sua composição (KUGELMEIER, 2017). Porém, também apresenta algumas características desfavoráveis, tais como: instabilidade oxidativa e maior emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x) se comparado ao óleo diesel (DEMIRBAS, 2005; KNOTHE et al., 2006).

Dois processos são utilizados para a obtenção do biodiesel: a esterificação de ácidos graxos livres e a transesterificação de triglicerídeos contidos em óleos vegetais e gorduras animais (LEUNG; WU; LEUNG, 2010). A Figura 10 mostra a reação de transesterificação para a obtenção do biodiesel.

Figura 10 - Reação de transesterificação para obtenção de biodiesel

A partir de óleos vegetais.



Fonte: Adaptado de Haseeb et al. (2011)

Quando adicionado o óleo diesel, a mistura diesel/biodiesel recebe a sigla “BX”, referindo-se a letra “X” ao teor de biodiesel na mistura, expresso em percentual volumétrico. Sendo assim, misturas do tipo B15 e B30 apresentam, respectivamente, 15% e 30% de teor de biodiesel na mistura com óleo diesel. Já a designação B100 indica que o combustível é 100 % biodiesel.

O biodiesel é uma mistura de ésteres saturados e insaturados que apresentam certa instabilidade, são sensíveis à luz, à temperatura e ao contato com a presença de metais com efeito catalítico na oxidação (JAIN; SHARMA, 2010), além de sofrer influência da umidade, dos ácidos orgânicos, cetonas e outros, que podem causar corrosão quando em contato com materiais metálicos (FAZAL; HASEEB; MASJUKI, 2011b). Alguns compostos, tais como água, álcoois, ácidos graxos livres, glicerol e resíduos do catalisador utilizado no processo de produção podem aumentar a tendência do biodiesel em causar corrosão (HASEEB et al., 2011).

Quando ocorre oxidação do biodiesel sua cadeia carbônica é quebrada, há formação de ácidos graxos e aldeídos de cadeia curta, e esta é uma das principais causas da corrosão de peças metálicas presentes nos componentes de sistemas de alimentação e nos motores de combustão interna (MEIRA et al., 2014).

Segundo Setiawan, Novitrie e Nugroho (2018) os ácidos graxos insaturados que contêm maior quantidade de ligações duplas entre carbonos apresentam maior tendência à corrosão e, de acordo com Haseeb et al. (2011), a reação de hidrólise dos ésteres metílicos, iniciada em virtude da presença de água residual do processo de produção ou da umidade do ar, conduz à formação de ácidos graxos livres devido ao comportamento higroscópico do biodiesel. A Tabela 1 apresenta alguns dos ácidos graxos livres que podem estar presentes no biodiesel em função da sua matéria prima.

Tabela 1 - Principais ácidos graxos livres de alguns óleos e gorduras utilizados na produção de biodiesel

Óleo ou Gordura	Composição em ácidos graxos (% m/m)							
	12:0	14:0	16:0	18:0	18:1	18:2	18:3	22:1
Soja			2,3 - 13,3	2,4 - 6	17,7 - 30,8	49 - 57,1	2 - 10,5	0 - 0,3
Palma	0 - 0,4	0,5 - 2,4	32 - 47,5	3,5 - 6,3	36 - 53	6 - 12		
Girassol			3,5 - 7,6	1,3 - 6,5	14 - 43	44 - 74		
Sebo (bovino)		2,1 - 6,9	27 - 37	9,5 - 34,2	14 - 50	26 - 50		
Canola			1,5 - 6	1 - 2,5	55 - 66,9	16,1 - 31	6,4 - 14,1	1 - 2

Fonte: Knothe et. al (2006)

A oxidação do biodiesel tem início em posições denominadas posições alílicas e a quantidade de hidrogênio presente nessas ligações determina a taxa de oxidação do biodiesel. Em ordem crescente, os ácidos, quanto à sua capacidade oxidativa, podem ser agrupados em oleatos, linoleatos e linolenatos. Os metais também podem acelerar a reação de oxidação dos ácidos graxos através da diminuição da energia de ativação de oxidação (CHOE; MIN, 2006) e o ferro pode potencializar este processo pela decomposição de hidroperóxidos (SETIAWAN; NOVITRIE; NUGROHO, 2018).

Para garantir a confiabilidade no manuseio e na utilização do combustível, foram estabelecidos padrões de qualidade do biodiesel. Isso inclui a fixação de limites para diversas propriedades físico-químicas, de maneira que não haja efeitos prejudiciais no desempenho e integridade das peças do motor, além de garantir a segurança nas operações de transporte do biodiesel (LÔBO; FERREIRA; CRUZ, 2009). Uma importante característica da qualidade do biodiesel é a sua estabilidade à oxidação. Segundo Pullen e Saeed (2012), esta propriedade está diretamente ligada à sua tendência de reação com oxigênio na temperatura ambiente. Segundo Meira et al. (2014), fatores como concentração de oxigênio, grau de insaturação,

presença de antioxidantes, temperatura e luminosidade influenciam diretamente a estabilidade à oxidação do biodiesel.

A corrosão associada em componentes de motores, quando em contato com biodiesel, ocorre devido à composição química do mesmo, que possui moléculas insaturadas que sofrem oxidação (SINGH; KORSTAD; SHARMA, 2012). Alguns dos fatores que influenciam a vida útil de um motor de combustão interna do ciclo Diesel, utilizando biodiesel ou diesel, são o grau de insaturação, a presença de oxigênio em grupos funcionais e o potencial hidrofílico do biodiesel (FAZAL; HASEEB; MASJUKI, 2011b). Neste sentido, Kugelmeier (2017) cita a capacidade da água em promover a hidrólise do biodiesel levando assim a formação de ácidos graxos livres, e desta forma favorecendo a ocorrência de corrosão.

Diversos autores têm se dedicado à compreensão do comportamento de materiais metálicos em contato com o biodiesel. Singh, Korstad e Sharma (2012) afirmaram que o aço inoxidável apresenta alta resistência à corrosão quando em contato com misturas entre óleo diesel e biodiesel. No entanto, nos estudos de Prieto, Sorichetti e Romano (2008) foi relatado que o biodiesel obtido a partir de soja ou semente de girassol pode causar corrosão galvânica no aço.

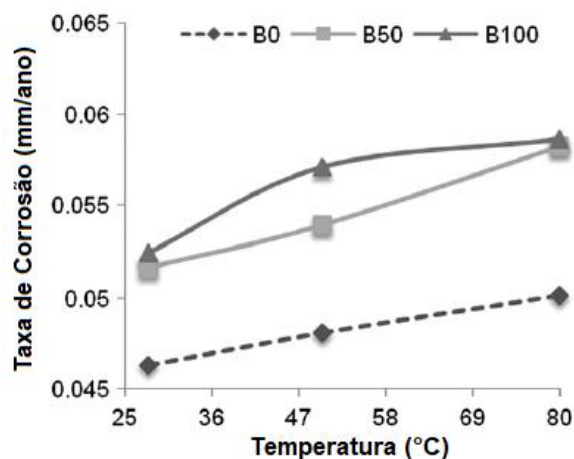
Alguns fatores exercem forte influência na taxa de corrosão metálica pelo biodiesel como temperatura, teor de umidade, presença de microorganismos e composição das matérias primas utilizadas na obtenção do biodiesel (MEIRA et al., 2014). Em relação à matéria prima, Maru et al. (2009) analisaram a interação do aço ASTM A36 com diesel (contendo 880 ppm de enxofre), biodiesel de soja e de girassol, e os resultados mostraram que a perda de massa do aço foi maior quando em contato com o biodiesel, sobretudo com aquele produzido a partir de semente de girassol. Quando a matéria prima apresenta maiores concentrações de ácidos graxos insaturados, seu biodiesel pode apresentar maiores taxas de oxidação (MEIRA et al., 2014).

Em relação à temperatura, Meira et al. (2014) afirmam que esta é uma importante variável no estudo da perda de qualidade dos combustíveis, e as propriedades do biodiesel como viscosidade, composição, corrosividade e densidade sofrem grande influência da temperatura. Destacam também que a temperatura no sistema de combustível pode estar entre 44°C e 84°C, o que pode acelerar o processo de corrosão, devido ao fato do teor de oxigênio na superfície do

metal em contato com biodiesel aumentar proporcionalmente à elevação da temperatura.

Kugelmeier (2017) estudou os efeitos do contato dos aços SAE 8620 e inoxidável martensítico (0,13% Cr), de uma liga de alumínio AA 6061 T4, do chumbo e do cobre com misturas diesel-biodiesel B7, B15 e B30, todas elas apresentando parâmetros de qualidade exigidos pela ANP. Foram realizados ensaios de imersão total e parcial, contato com fase de vapor e corrosão por frestas, na temperatura de 40°C. O chumbo e o cobre apresentaram os maiores sinais de atividade corrosiva, enquanto que o aço inoxidável, a liga de alumínio e o aço SAE 8620 apresentaram boa resistência à corrosão. Fazal, Haseeb e Masjuki (2011a) avaliaram o comportamento do aço 1020 em ensaios de imersão total e estática em biodiesel de palma (obtido comercialmente), diesel puro (B0) e uma mistura diesel-biodiesel contendo 50% de óleo diesel, em volume. Propriedades do biodiesel como teor de umidade e teor de metanol estavam dentro dos limites exigidos pela norma EN 14214. Após 1200h de ensaios foi observado que, com o aumento da temperatura, houve crescimento da taxa de corrosão (Figura 11).

Figura 11 -Taxa de corrosão do aço 1020 após imersão em óleo diesel e suas misturas com biodiesel (B50 e B100) por 1200 h em diferentes temperaturas.



Fonte: Adaptado de Fazal, Haseeb e Masjuki (2011a)

Kaul et al. (2007) estudaram o efeito da elevação da temperatura (entre 15 e 45°C) do biodiesel na corrosão de partes de pistão de motores do ciclo Diesel. O biodiesel foi obtido a partir de óleos de várias matérias-primas (*mahua*, *salvadora*, *pongamia* e *Jatropha curcas*) e dentro de especificações exigidas por normas como ASTM e Normas Europeias. Os resultados mostraram que maiores valores de

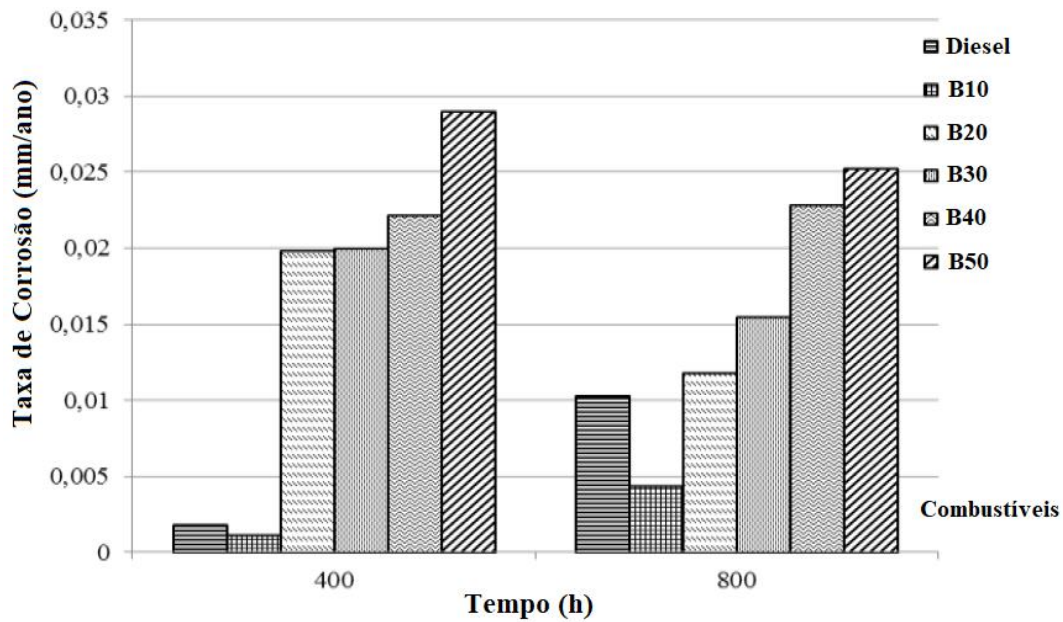
temperatura levaram a um aumento da quantidade de pites de corrosão nas amostras, uma vez que a taxa de corrosão também aumentou.

De acordo com Setiawan, Novitrie e Nugroho (2018) íons de ferro podem reagir com os ácidos graxos livres e formar sais de ácidos graxos na superfície do aço carbono. Os autores utilizaram biodiesel originado de óleo de fritura (filtrado e desidratado), obtido por transesterificação metílica a 60°C e ácido sulfúrico como catalisador, para analisar o comportamento à corrosão do aço carbono. Após 30 dias de imersão em biodiesel a 70°C, foi detectada a presença dos compostos Fe_2O_3 , $FeO(OH)$ e $Fe_2O_2CO_3$.

Para o aço SAE 1020, Pereira, Moraes e Pardal (2019) observaram em seu estudo que as taxas de corrosão desse aço, submetido a ensaios de corrosão por imersão em biodiesel de soja (obtido comercialmente e dentro de especificações da ANP) e na mistura B5/S500 (mistura entre 5% em volume de biodiesel e óleo diesel com teor de enxofre de 500 mg/kg) durante 10 dias consecutivos, foram maiores quando nas amostras imersas no biodiesel. A formação de resíduos de corrosão nas superfícies também foi maior para o B100. As temperaturas utilizadas no ensaio foram 25°C e 100°C e para ambas as misturas o aumento da temperatura causou elevação na taxa de corrosão, confirmando os resultados encontrados na literatura.

Dharma et al. (2019) estudaram a corrosão de amostras de aço 1020 em contato com óleo diesel (B0), biodiesel (B100) e as misturas diesel/biodiesel B10, B20, B30, B40 e B50. Os testes foram realizados a temperatura ambiente e as matérias-primas do biodiesel foram pinhão-manso (*Jatropha curcas*) e samaúma (*Ceila pentandra*), em uma mistura com 50% em volume de cada componente. O biodiesel foi obtido através de transesterificação utilizando hidróxido de potássio como catalisador, e suas propriedades estavam dentro de especificações das normas ASTM D6751 e EN 14214. As taxas de corrosão para tempos de teste de 400 e 800 h foram maiores para as misturas de biodiesel/diesel em comparação com o diesel puro (Figura 12), e foi constatado que as superfícies mudaram de coloração por conta dos depósitos formados pela corrosão. Os produtos de corrosão não foram especificados pelos autores.

Figura 12 -Taxa de corrosão do aço 1020 em imersão em óleo diesel e misturas diesel-biodiesel após 400 e 800h.



Fonte: Adaptado de Dharma et al. (2019).

Pereira, Moraes e Pardal (2019) destacam a ausência de trabalhos publicados relativamente ao potencial corrosivo do biodiesel de soja em aço 1020, apontando assim para a necessidade de desenvolvimento de novas pesquisas sobre o tema com esta matriz. Vale destacar que, em 2020, a soja foi a principal matéria-prima utilizada para a produção de biodiesel (B100), equivalente a 68,3% do total produzido. Outras matérias-primas oleaginosas, que incluem óleo de palma, óleo de amendoim, óleo de nabo-forrageiro, óleo de girassol, óleo de mamona, óleo de sésamo, óleo de canola, óleo de milho, óleo de fritura usado e outros materiais graxos, corresponderam a 16,5% do total, seguido por gordura animal (14,1% do total) e óleo de algodão (1,1%) (ANP, 2020b).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção é apresentada a descrição do material utilizado e o planejamento experimental realizado neste trabalho. Os parâmetros de corte e a ferramenta empregada são detalhados a seguir, bem como as estratégias de movimentação da ferramenta para obtenção dos corpos de prova. Por fim, são apresentadas as técnicas utilizadas para a caracterização das superfícies obtidas.

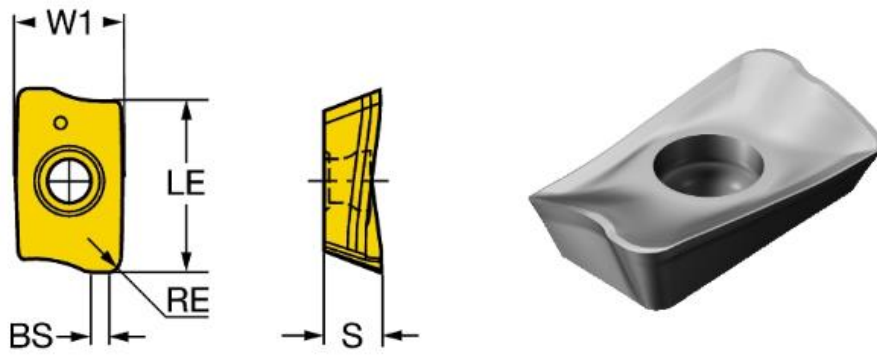
4.1 AÇO SAE 1020

Os corpos de prova utilizados neste estudo foram confeccionados em aço SAE 1020 obtido em um estabelecimento comercial especializado. O material foi escolhido pelo fato de que o meio corrosivo, composto pelas misturas diesel/biodiesel e o biodiesel, têm alta resistividade elétrica quando comparado àqueles provenientes de outras soluções utilizadas como agente corrosivo, tais como soluções de cloreto de sódio (NaCl). A seleção baseou-se no fato de que materiais muito resistentes à corrosão, como aços inoxidáveis ou ligas de outros metais, não seriam adequados para os testes de compatibilidade, pois não ofereceriam resultados significativos no período estipulado para o desenvolvimento deste trabalho.

4.2 INSERTO E FERRAMENTA DE CORTE

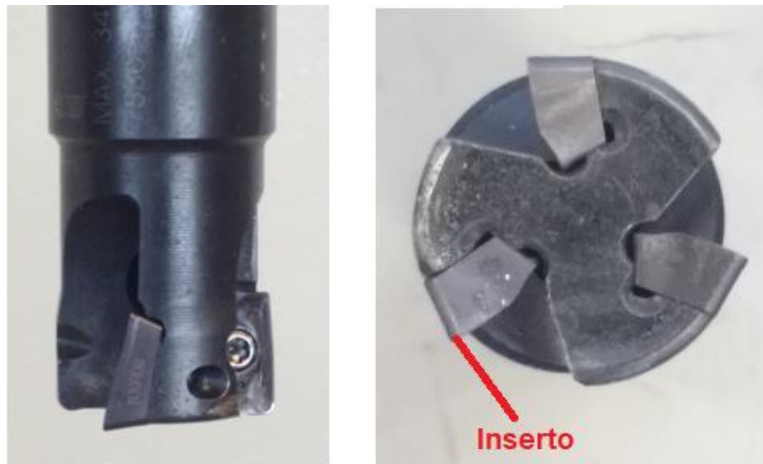
O inserto (Coromill® 390, fabricado pela Sandvik Coromant) utilizado para o fresamento dos corpos de prova é R390-11 T3 08M-PM 1130, possui uma largura $W1=6,8$ mm, comprimento efetivo da aresta de corte $LE=10$ mm, raio de ponta $RE=0,8$ mm, espessura $S=3,59$ mm, ângulo de posição $\chi_r=90^\circ$, comprimento da aresta alisadora $BS=3,59$ mm e revestimento de AlTiCrN. A Figura 13 mostra detalhes dos insertos utilizados no fresamento dos corpos de prova. A fresa utilizada na usinagem é do fabricante Sandvik Coromant, código R390-020A20-11M, diâmetro de 20 mm, comprimento funcional (total) de 110 mm e comprimento efetivo de 25 mm, com três arestas efetivas de corte (Figura 14).

Figura 13 - Características do inserto de corte.



Fonte: Sandvik Coromant (2020)

Figura 14 - Fresa e insertos.



Fonte: O Autor

4.3 PARÂMETROS DE QUALIDADE DO BIODIESEL

De acordo com a unidade produtora o biodiesel (B100) utilizado para preparação das misturas com óleo diesel tem como matéria-prima 90% de óleo de soja e 10% de óleo de palma, e foi produzido através de transesterificação metílica. O óleo diesel A foi fornecido por uma base distribuidora da cidade de Cuiabá (MT) e o biodiesel foi produzido pela Produtos Alimentícios Orlândia S/A. Os parâmetros de qualidade do biodiesel são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de qualidade do biodiesel.

Método	Descrição do teste	Resultados	Especificações		Unidade
			Mín	Máx	
ASTM 4176 (2014)	Aspecto/ Temperatura do ensaio (°C)	Passa/21,9			Límpido e livre de impurezas
ASTM D 4052 (2011)	Massa Específica a 20°C,	880,6	850	900	kg/m ³
EN 14112 (2013)	Estabilidade à Oxidação	19,5	8,0	-	horas
ASTM D 445 (2017)	Viscosidade Cinemática a 40°C	4,208	3,0	6	mm ² /s
ASTM D 6304 (2007)	Teor de Água	160	-	200	mg/kg
ASTM D 93 (2016)	Ponto de Fulgor – Procedimento C	165,0	100	-	°C
EN 14103 (2011)	Teor de Éster (FAME)	98,8	95,5	-	-
ASTM D 874 (2013)	Cinzas Sulfatadas	0,001	-	0,020	% massa
ASTM D 5453 (2012)	Enxofre Total	0,8	-	10,0	mg/kg
ASTM D130 (2012)	Corrosão ao Cobre (3h a 50°C)	1B	-	1	
ASTM D 664 (2011)	Índice de Acidez – Procedimento B	0,36	-	0,50	mg de KOH/g

Tabela 2 - Parâmetros de qualidade do biodiesel. (Cont.)

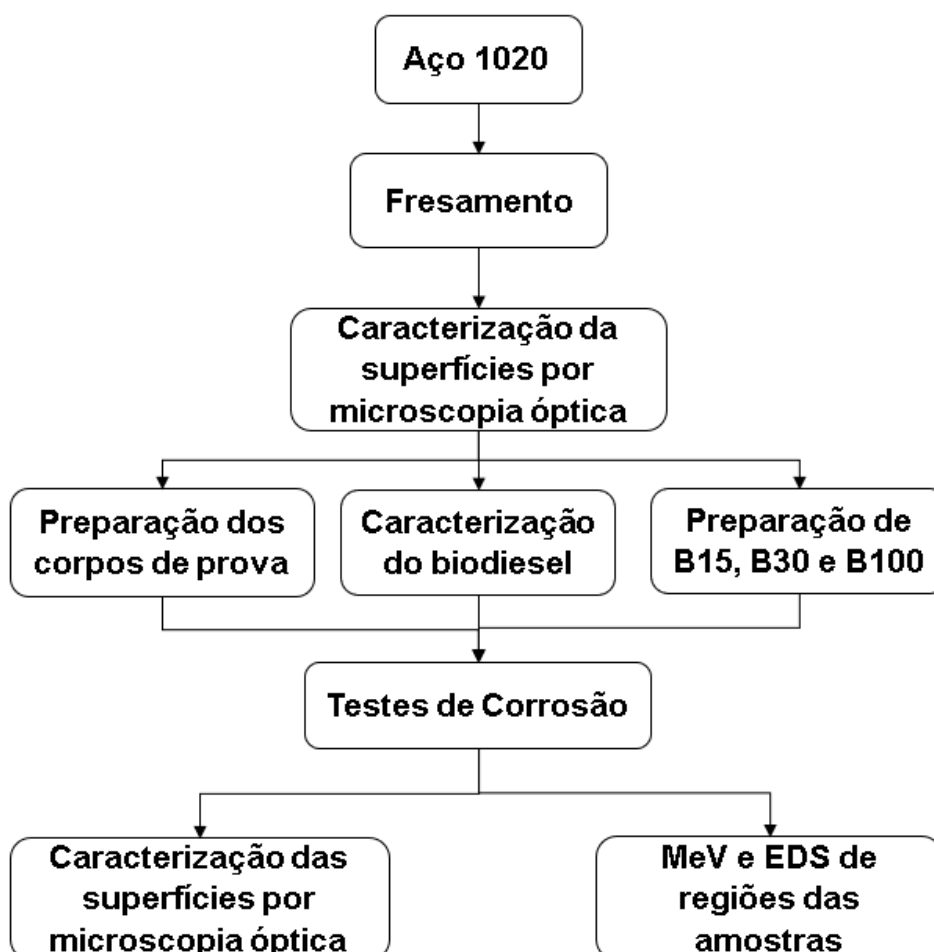
Método	Descrição do teste	Resultados	Especificações		Unidade
			Mín	Máx	
ASTM D 6371 (2010)	Ponto de Entupimento de filtro à frio	-5	-	8	°C
EN 14110 (2003)	Teor de Metanol	< 0,14	-	0,20	% massa
EN 14110 (2003)	Teor de Etanol	< 0,01	-	0,20	% massa
EN 14111 (2003)	Índice de lodo	153	-	Anotar	g de lodo/100g
EN 12662 (2014)	Contaminação Total	6,7	-	24,0	mg/kg
ASTM D 6584 (2013)	Glicerol Total	0,202	-	0,25	% massa
ASTM D 6584 (2013)	Glicerol Livre	<0,001	-	0,02	% massa
ASTM D 6584 (2013)	Monoacilglicerol	0,684	-	0,70	% massa
ASTM D 6584 (2013)	Diacilglicerol	0,146	-	0,20	% massa
ASTM D 6584 (2013)	Triacilglicerol	0,026	-	0,20	% massa

Fonte: O Autor

4.4 MÉTODOS

Inicialmente foram definidos os parâmetros de corte, as configurações de usinagem referentes aos deslocamentos da ferramenta na peça e as misturas diesel/biodiesel (B15 e B30) e o biodiesel (B100) utilizados como meios de imersão nos testes de corrosão. O planejamento experimental foi elaborado considerando três tipos de ensaios de corrosão: imersão total, corrosão por frestas e contato com fase de vapor. Apenas os ensaios de imersão total e corrosão por frestas foram realizados em duplicata em função da quantidade dos corpos de prova que foram preparados. A descrição resumida das etapas de trabalho é mostrada no fluxograma da Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma das etapas de trabalho.

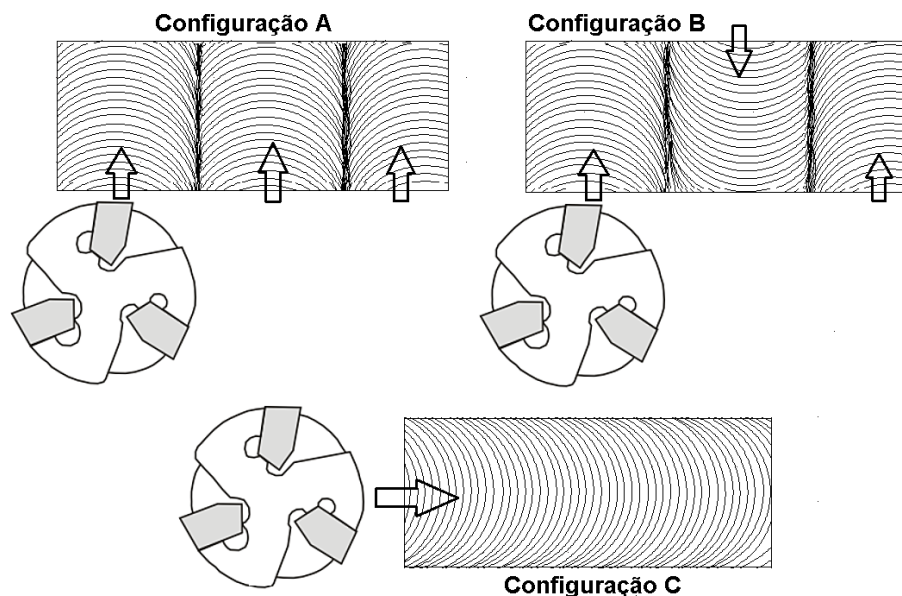


Fonte: O Autor

A operação de usinagem foi realizada em um centro de usinagem CNC, modelo D600, marca ROMI, do Laboratório de Processos de Fabricação (LPF) do

Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar. Foram usinados 27 corpos de prova de seção retangular, com dimensões de 40x18x4,1 mm, sendo usinada somente uma das faces de 40x18 mm. Três diferentes configurações de fresamento foram realizadas para avaliar o efeito da usinagem sobre o material no meio (Figura 16). A escolha dessas três configurações de fresamento teve como objetivo gerar superfícies com características topográficas diferentes, principalmente em relação à existência de intersecções entre as trajetórias da ferramenta nas configurações de usinagem A e B. A caracterização dessas regiões será detalhada na próxima seção.

Figura 16 - Configurações de fresamento (em relação à trajetória da ferramenta na peça) utilizadas na preparação dos corpos de prova.



Fonte: O Autor

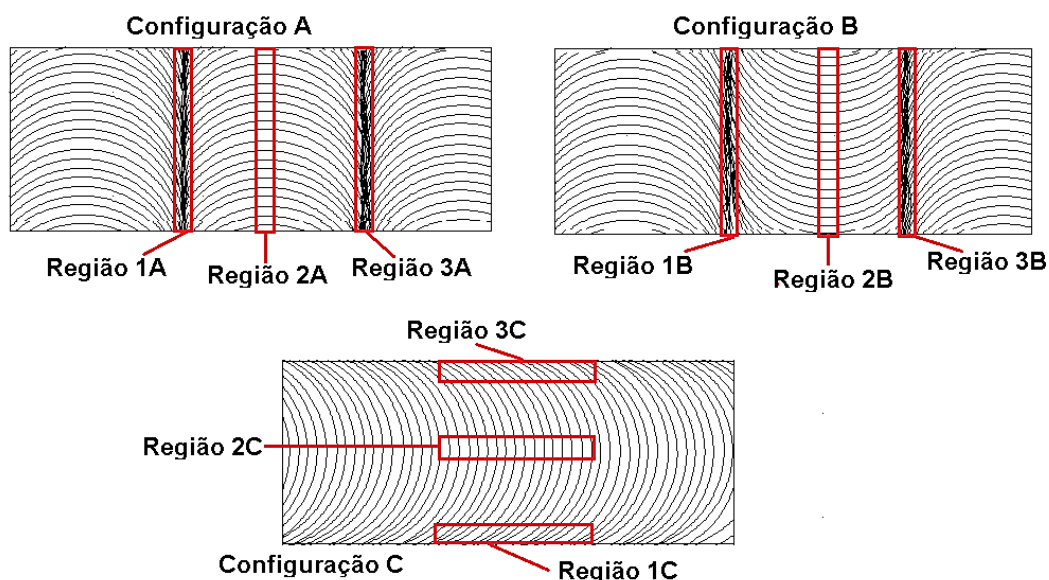
Não foi utilizado fluido de corte nesta operação, e os parâmetros de corte foram: velocidade de corte de 300 m/min, avanço por dente 0,05 mm/dente, profundidade de corte de 0,6 mm e penetração de trabalho de 15 mm para todos os passes das configurações A e B. Para a configuração C foram utilizados os mesmos parâmetros de corte, porém a ferramenta esteve centralizada em relação aos corpos de prova. Foram realizados furos na extremidade superior dos corpos de prova para que estes pudessem ser suspensos durante os testes de corrosão por imersão.

4.5 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

4.5.1 Acabamento Superficial

A textura das superfícies usinadas foi analisada utilizando o microscópio óptico confocal Alicona Infinite Focus SL, do Laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar, com aumento de 100 vezes. Os parâmetros de rugosidade S_{sk} , S_{ku} e S_{vk} foram selecionados para a caracterização das superfícies, sendo as medições realizadas em três regiões distintas dos corpos de prova preparados, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Regiões de medição dos parâmetros de acabamento superficial.



Fonte: O Autor

As regiões 1A, 1B, 3A e 3B das peças nas configurações A e B possuem marcas de intersecção deixadas pelos insertos durante a passagem da ferramenta e são objeto de estudo no presente trabalho. Na Região 2 de todas configurações de usinagem (2A, 2B e 2C) são encontrados os maiores valores para a espessura do cavaco e, conseqüentemente, o maior valor da rugosidade teórica no fresamento. Por fim, na terceira configuração, as duas regiões laterais (1C e 3C) também foram analisadas, devido ao fato de que o material removido da peça poder ser retido naquelas regiões, alterando significativamente a topografia da superfície.

Inicialmente, as regiões 1, 2 e 3 de cada corpo de prova foram submetidas a uma varredura óptica e, das imagens resultantes, foram selecionadas as áreas correspondentes à máxima espessura do cavaco e às intersecções formadas pelos insertos da fresa. As dimensões das regiões de análise foram de 18x1 mm. Uma vez determinados os parâmetros relativos à textura das superfícies, realizou-se uma análise estatística dos parâmetros obtidos, de modo a permitir a comparação entre as configurações de fresamento.

4.5.2 Análise Estatística dos Parâmetros de Superfície

A análise estatística dos dados experimentais foi realizada pelo software Minitab v.18. O Teste de Tukey foi utilizado para analisar se há diferenças significativas entre as regiões de análise das amostras usinadas, bem como entre as duas primeiras configurações de usinagem, descritas na seção de caracterização. O teste de Tukey estabelece que, para dados amostrais iguais (balanceados), há diferença significativa entre duas médias \bar{y}_i e \bar{y}_j ($i \neq j$) quando o valor da diferença entre elas ultrapassa o valor de $q(\alpha, k, v) \cdot \sqrt{S^2/n}$, conforme Equação 1 (WALPOLE et al., 2012):

$$|\bar{y}_i - \bar{y}_j| > q(\alpha, k, v) \cdot \sqrt{\frac{S^2}{n}}, \quad (1)$$

em que:

q: valor tabelado para o Teste de Tukey, com confiabilidade de 95%;

v: número de observações independentes;

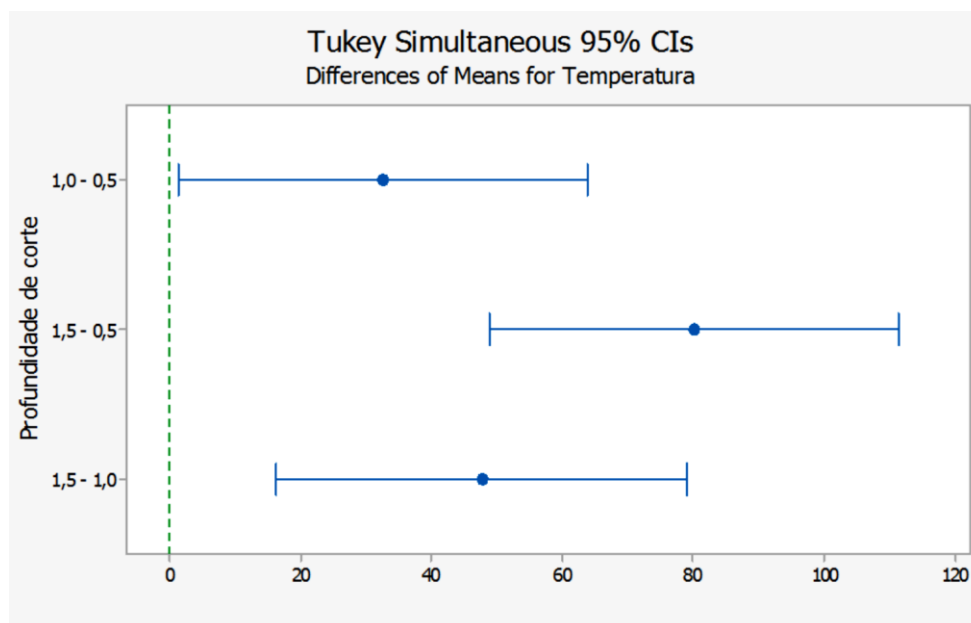
k: total de observações;

S²: erro médio quadrático;

n: número de réplicas do nível.

Graficamente, quando não houver intersecção entre o intervalo das diferenças das duas médias e a linha correspondente ao zero no gráfico de comparações de Tukey, há diferença estatisticamente significativa entre os valores dessas médias. A Figura 18 exemplifica o uso do teste de Tukey para avaliar se há diferença entre médias de temperaturas para diferentes valores de profundidade corte, em um determinado processo de usinagem.

Figura 18 - Teste de Tukey para a variável profundidade de corte.



Fonte: Reis, Pinto e Soares (2016)

De acordo com a Figura 20, os intervalos de comparação entre as médias da variável de saída temperatura não cruzam a linha do zero. Isto significa que há diferença significativa entre elas, e a variação dos três níveis de profundidade de corte é capaz de alterar a variável de resposta (temperatura).

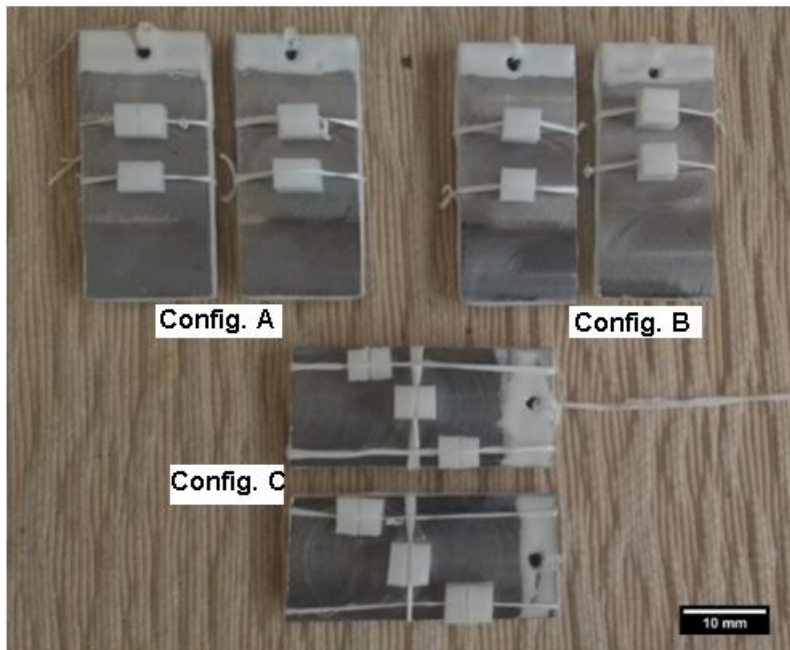
4.6 ENSAIOS DE CORROSÃO

O volume do biodiesel e das misturas diesel/biodiesel empregado nas condições de imersão dos corpos de prova segue proporcionalidade (área do corpo de prova x volume do meio corrosivo) estabelecida pela norma ASTM G31 (2012) – Prática padrão para testes de corrosão de metais por imersão. Foram realizados três tipos de ensaios: imersão total, corrosão por frestas e contato com fase de vapor, sendo que as misturas permaneceram em contato com os corpos de prova durante 2400h, em temperatura ambiente pela impossibilidade da realização destes ensaios em temperaturas elevadas.

As amostras foram inicialmente cobertas com a resina epoxi Novolac®, inerte em biodiesel, para que somente a face usinada estivesse em contato com as misturas. Posteriormente foram colocadas peças de Teflon® (dimensões 4x3 mm) nos corpos de prova dos ensaios de imersão e corrosão por frestas, de acordo com

a Figura 19. A presença dessas peças tem por objetivo criar ambientes restritos e que favoreçam as condições para que ocorra corrosão por frestas nas regiões de interface entre o metal e as peças de Teflon®.

Figura 19 - Corpos de prova para o ensaio de imersão e frestas.



Fonte: O Autor

O meio corrosivo e os corpos de prova foram mantidos em frascos erlenmeyers com capacidade de 2 L e fechados com rolhas, conforme Figura 20.

Figura 20 - Ensaio de imersão total, frestas e contato com fase de vapor.



Fonte: O Autor

A definição do tempo total de ensaio baseou-se na impossibilidade operacional de utilizar temperaturas maiores que a do ambiente, e também pelo fato do biodiesel possuir baixa resistividade elétrica, sendo então necessário um elevado período de contato com os corpos de prova para que os efeitos do meio corrosivo pudessem ser evidenciados.

Os ensaios de imersão total e frestas foram realizados em duplicata, onde os corpos de prova foram suspensos por fios de Teflon®. Para estes ensaios foram inseridos em cada uma das três misturas dois corpos de prova de cada configuração de usinagem. Os ensaios por fase de vapor foram realizados com apenas um corpo de prova de cada configuração, onde os mesmos estiveram suspensos e em contato somente com as frações de vapor dos meios corrosivos analisados.

Ao final dos ensaios os corpos de prova foram imersos por 10 minutos em um banho ultrassônico, com acetona, conforme recomendação da norma ASTM G01 (ASTM, 2017) para limpeza de amostras de aço após os ensaios de imersão.

4.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS)

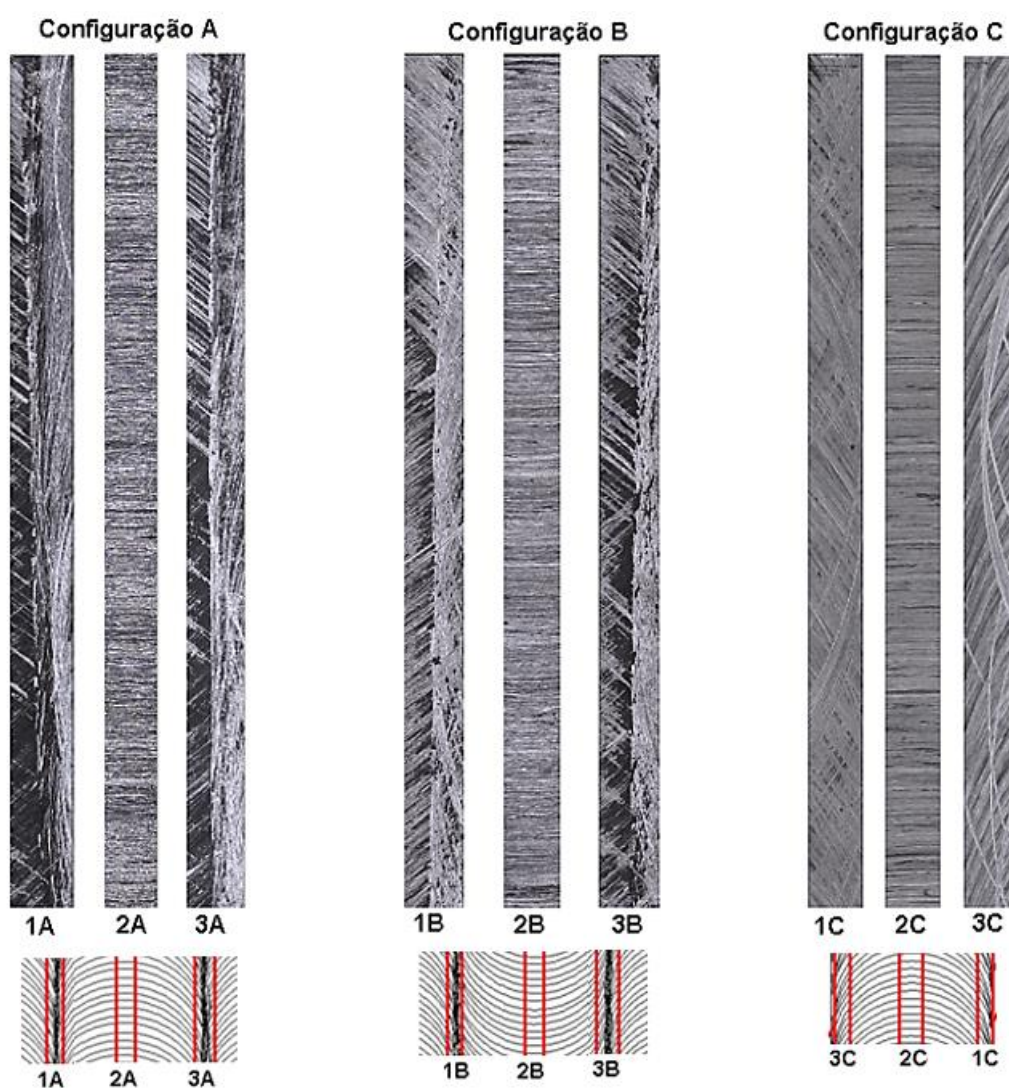
As análises das superfícies dos corpos de prova utilizados neste estudo foram realizadas no microscópio eletrônica de varredura (PhilipsXL-30 FEG) do Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da UFSCar. Essa análise visa detectar efeitos expressivos de corrosão, tais como pites e regiões de oxidação que possam estar presentes na superfície do metal. A espectroscopia de energia dispersiva desses pontos teve como objetivo a caracterização dos elementos químicos presentes nas três regiões das amostras.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES ANTES DOS ENSAIOS

As imagens mostradas na Figura 21 ilustram os três tipos de textura característica encontrados nos corpos de prova usinados. Antes dos ensaios de corrosão, os valores dos parâmetros Ssk, Svk e Sku foram obtidos para essas regiões e utilizados na análise estatística para identificar a existência de diferenças significativas das médias desses parâmetros entre as configurações de usinagem A, B e C. Em uma mesma configuração não foram observadas diferenças significativas entre as três regiões das peças.

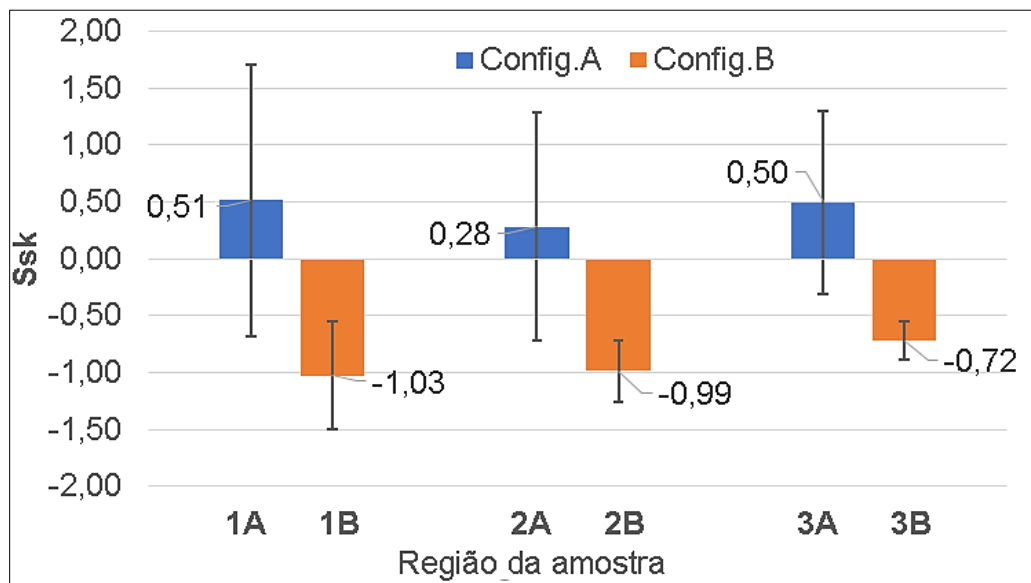
Figura 21 - Textura das superfícies das regiões 1, 2 e 3 de corpos de prova das configurações de usinagem A, B e C.



Fonte: O Autor

Através do Teste de Tukey, foi feita a comparação entre as regiões com intersecção dos dentes da fresa e entre as regiões de máxima espessura do cavaco, considerando um nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$). A Figura 22 e a Figura 23 apresentam as comparações entre as configurações de usinagem A e B para o parâmetro Ssk.

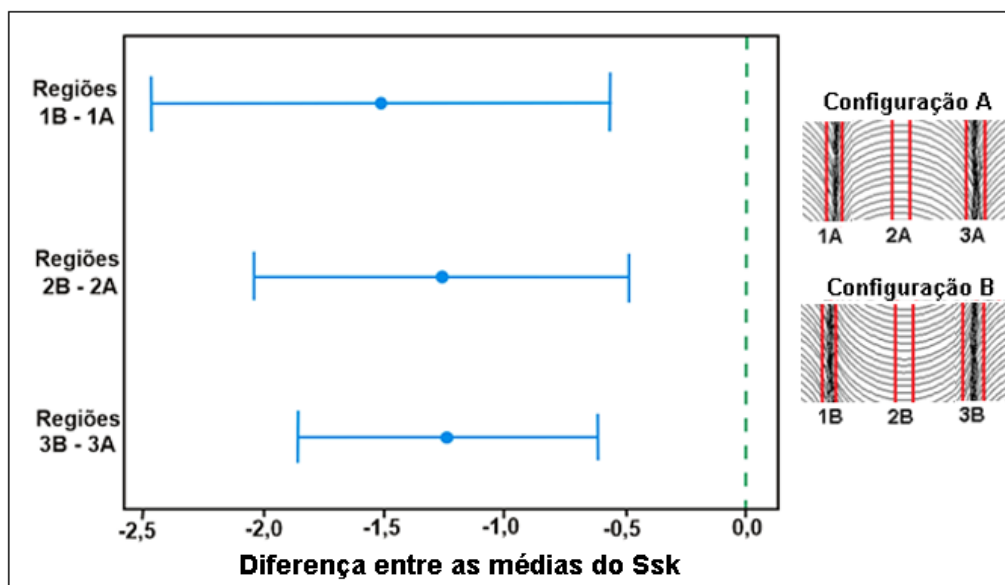
Figura 22 - Comparação entre as médias dos valores de Ssk das regiões das configurações de usinagem A e B – 0h de teste.



Fonte: O Autor

Pela análise da Figura 22, a configuração de usinagem B possui apenas valores negativos de Ssk, o que indica que suas superfícies apresentam predominância de vales (BLATEYRON, 2013) em relação às superfícies da configuração A. A Figura 23 mostra o resultado do teste de Tukey, indicando que existe diferença significativa entre as médias das três regiões comparadas.

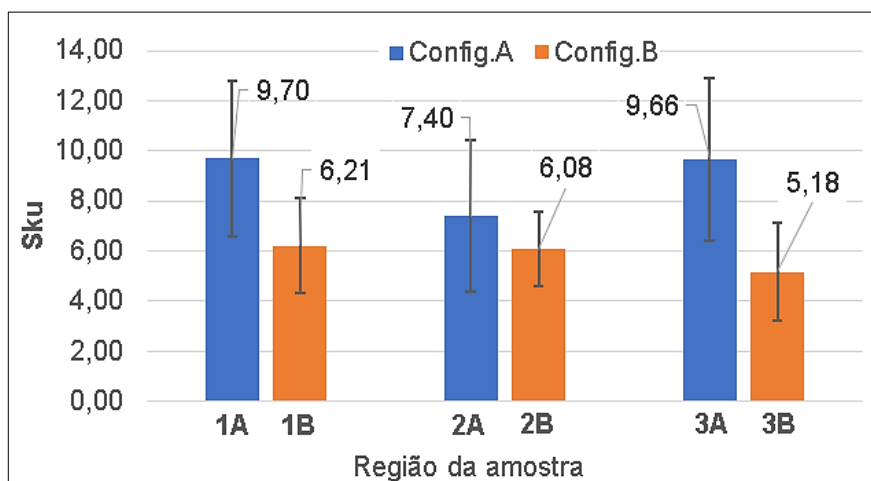
Figura 23 - Intervalos das diferenças entre as médias de Ssk das regiões das configurações de usinagem A e B.



Fonte: O Autor

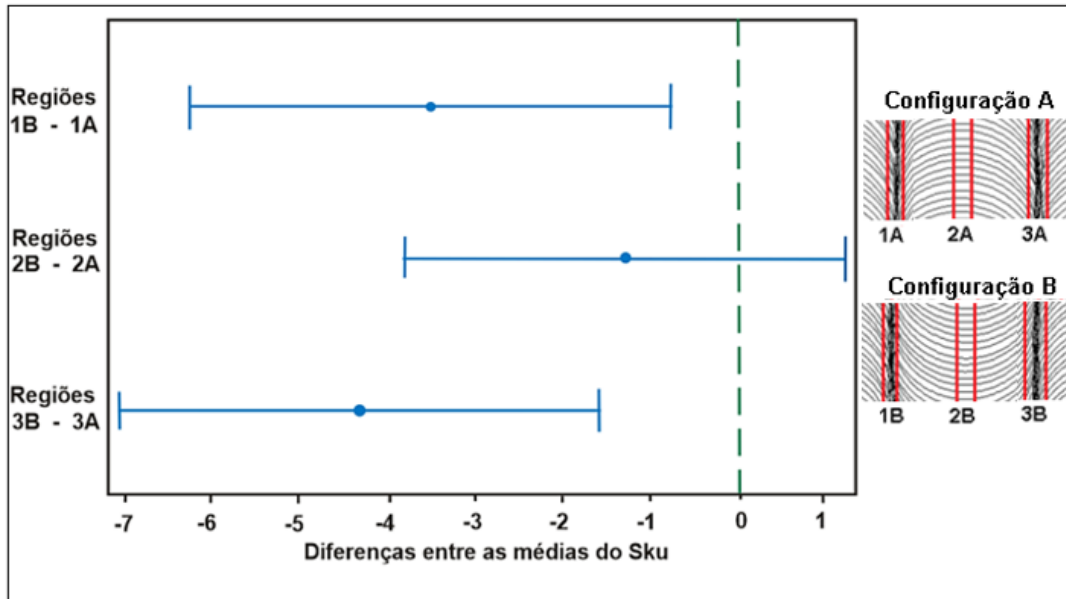
As médias do Sku apresentaram diferenças estatisticamente significativas para as regiões 1A e 3A (Figura 24 e Figura 25), sendo que a configuração A apresentou maiores valores médios de Sku. Isto indica que as superfícies da primeira condição de usinagem apresentam picos relativamente mais altos e agudos nessas regiões em relação à configuração B, podendo conter locais mais suscetíveis à corrosão localizada (BENKAFADA; KERDOUD; BOUCHOUCHA, 2018).

Figura 24 - Comparação entre as médias dos valores de Sku das regiões das configurações de usinagem A e B, 0h de teste.



Fonte: O Autor

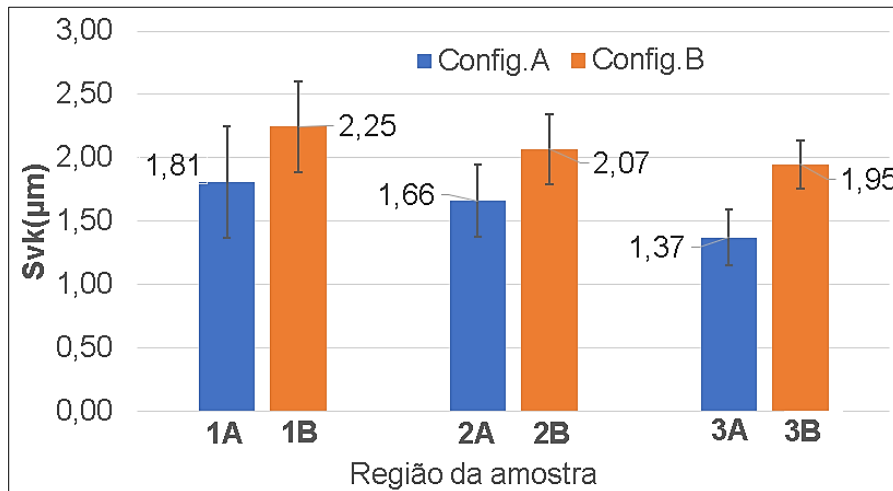
Figura 25 - Intervalos das diferenças entre as médias de Sku das regiões das configurações de usinagem A e B, 0h de teste.



Fonte: O Autor

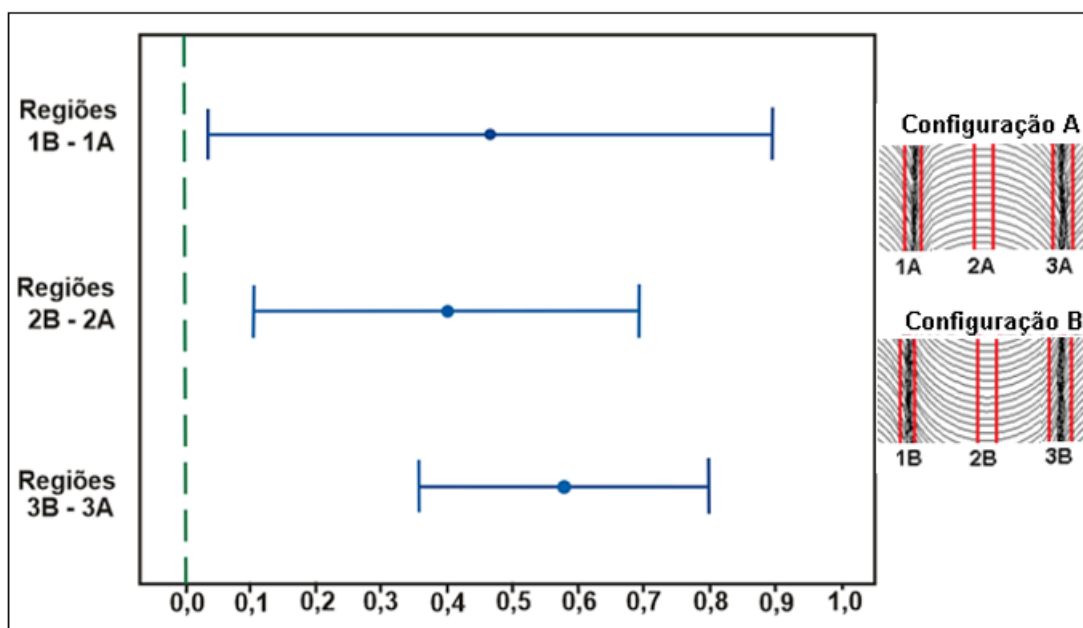
Em relação ao Svk, a configuração B possui os maiores valores médios para esse parâmetro (Figuras 26 e 27), e pode conter vales de maior profundidade quando comparados aos da configuração A. Essas características superficiais contribuem para a maior retenção de fluidos (GRZESIK, 2016), como as misturas biodiesel/diesel.

Figura 26 - Comparação entre as médias dos valores de Svk (μm) das regiões das configurações de usinagem A e B.



Fonte: O Autor

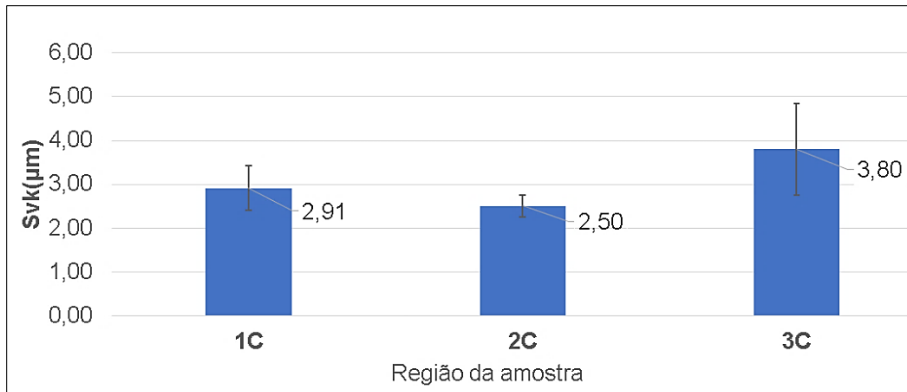
Figura 27 - Intervalos das diferenças entre as médias de S_{vk} (μm) das regiões das configurações de usinagem A e B.



Fonte: O Autor

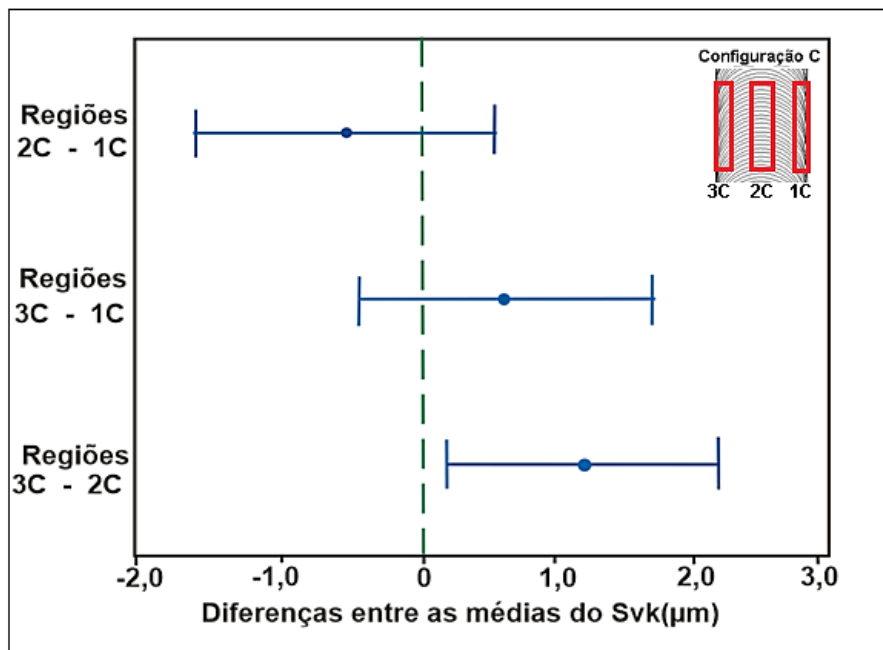
A configuração de usinagem C foi analisada de maneira distinta àquela das configurações A e B, pois não possui regiões de intersecção entre os caminhos da ferramenta de corte. As duas regiões 1C e 3C, que apresentam a menor espessura do cavaco, foram comparadas com a região de maior espessura do cavaco (2C), devido à possibilidade de haver rebarbas nas superfícies próximas às bordas da peça. Na análise estatística as diferenças entre as médias do S_{sk} e S_{ku} não foram significativas. Somente há significância para a diferença entre as médias do S_{vk} (Figura 28 e Figura 29) para as regiões 2C e 3C.

Figura 28 - Comparação entre as médias de Svk (μm) das regiões da configuração de usinagem C.



Fonte: O Autor

Figura 29 - Intervalos das diferenças entre as médias de Svk (μm) das regiões da configuração de usinagem C.



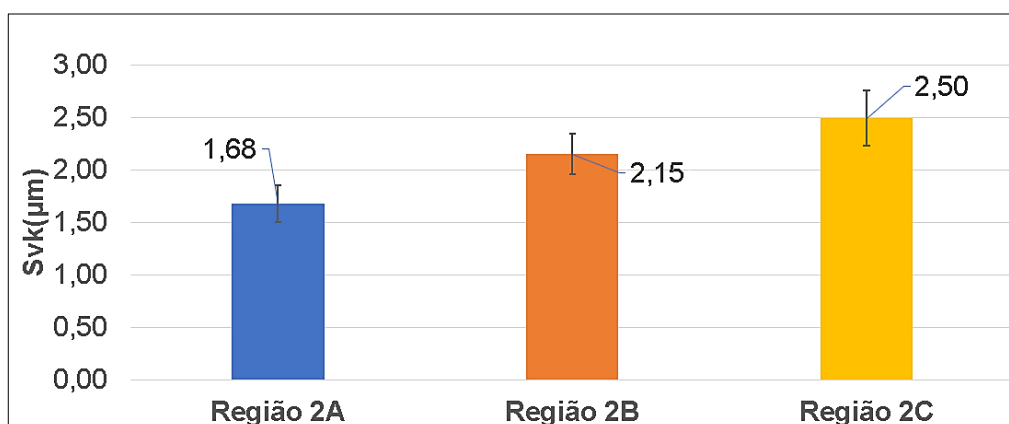
Fonte: O Autor

A região 3C dessa configuração possui o maior valor médio para a profundidade reduzida de vales da superfície (Svk), podendo ser considerada como sendo de interesse nos testes de corrosão.

A comparação das configurações A, B e C foi realizada na região 2, a única região comum entre elas. No fresamento esta região apresenta o maior valor de rugosidade teórica devido à maior espessura do cavaco (WHITEHOUSE, 2004) e também é avaliada nesse estudo. Somente as médias do parâmetro Svk são

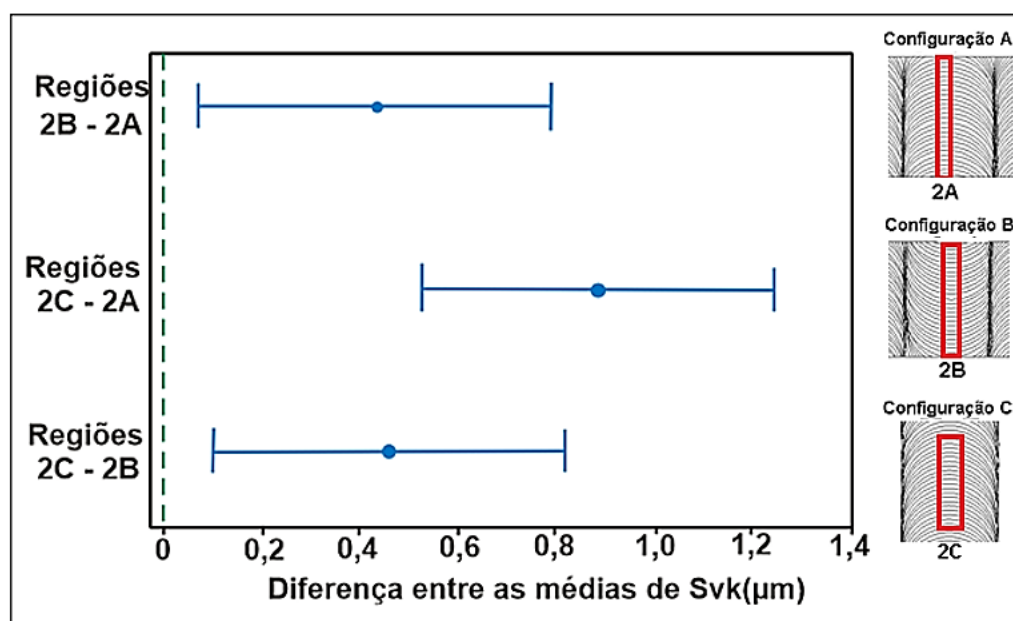
diferentes entre as três configurações, sendo que os vales da configuração C são os mais profundos (Figura 30 e Figura 31). Isto indica que a região 2 desta configuração pode armazenar maiores volumes de combustível em seus vales (GRZESIK, 2016), podendo assim contribuir para maiores efeitos corrosivos que as superfícies das demais configurações (A e B).

Figura 30 - Comparação entre as médias dos valores de $Svk(\mu m)$ na região 2 das configurações de usinagem A, B e C.



Fonte: O Autor

Figura 31 - Intervalo das diferenças entre as médias de $Svk(\mu m)$ da região 2 das configurações de usinagem A, B e C.



Fonte: O Autor

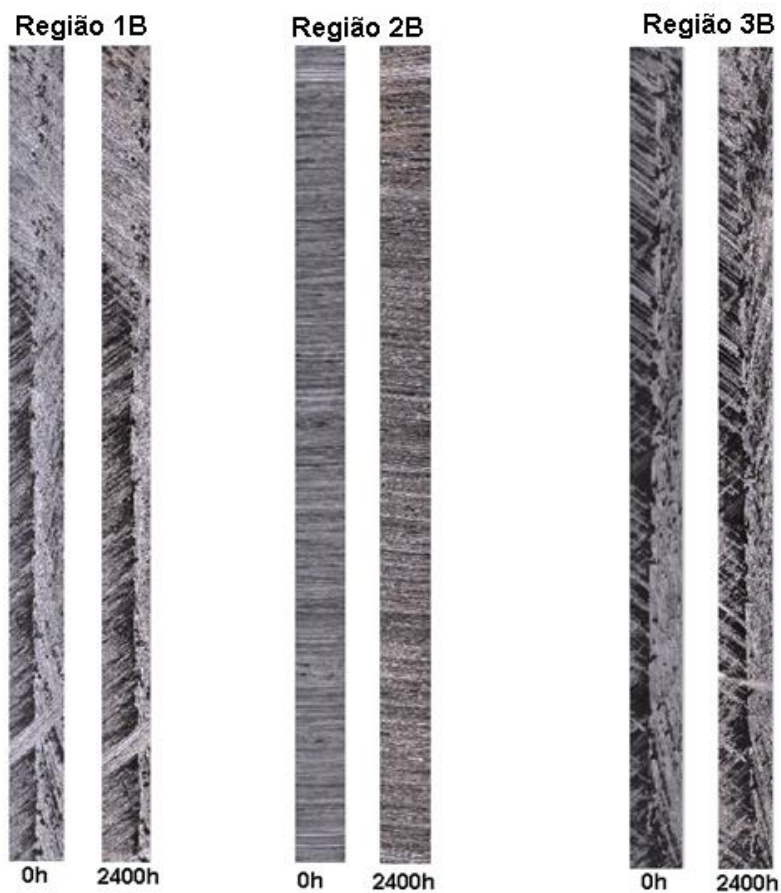
A configuração C apresentou o maior valor médio para o Svk , e constitui uma

região de interesse para comparação dos efeitos da corrosão pelo contato com as misturas diesel/biodiesel e o biodiesel.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES APÓS OS ENSAIOS DE IMERSÃO E FASE DE VAPOR

Após as 2400 h os valores de Ssk, Sku e Svk foram novamente determinados para avaliar possíveis mudanças decorrentes do contato das superfícies com as misturas B15, B30 e o biodiesel (B100). A Figura 32 e a Figura 33 contêm a textura das regiões de duas amostras antes e após imersão em B15 e B30.

Figura 32 - Comparação entre as superfícies de um corpo de prova da configuração B imerso na mistura B15.



Fonte: O Autor

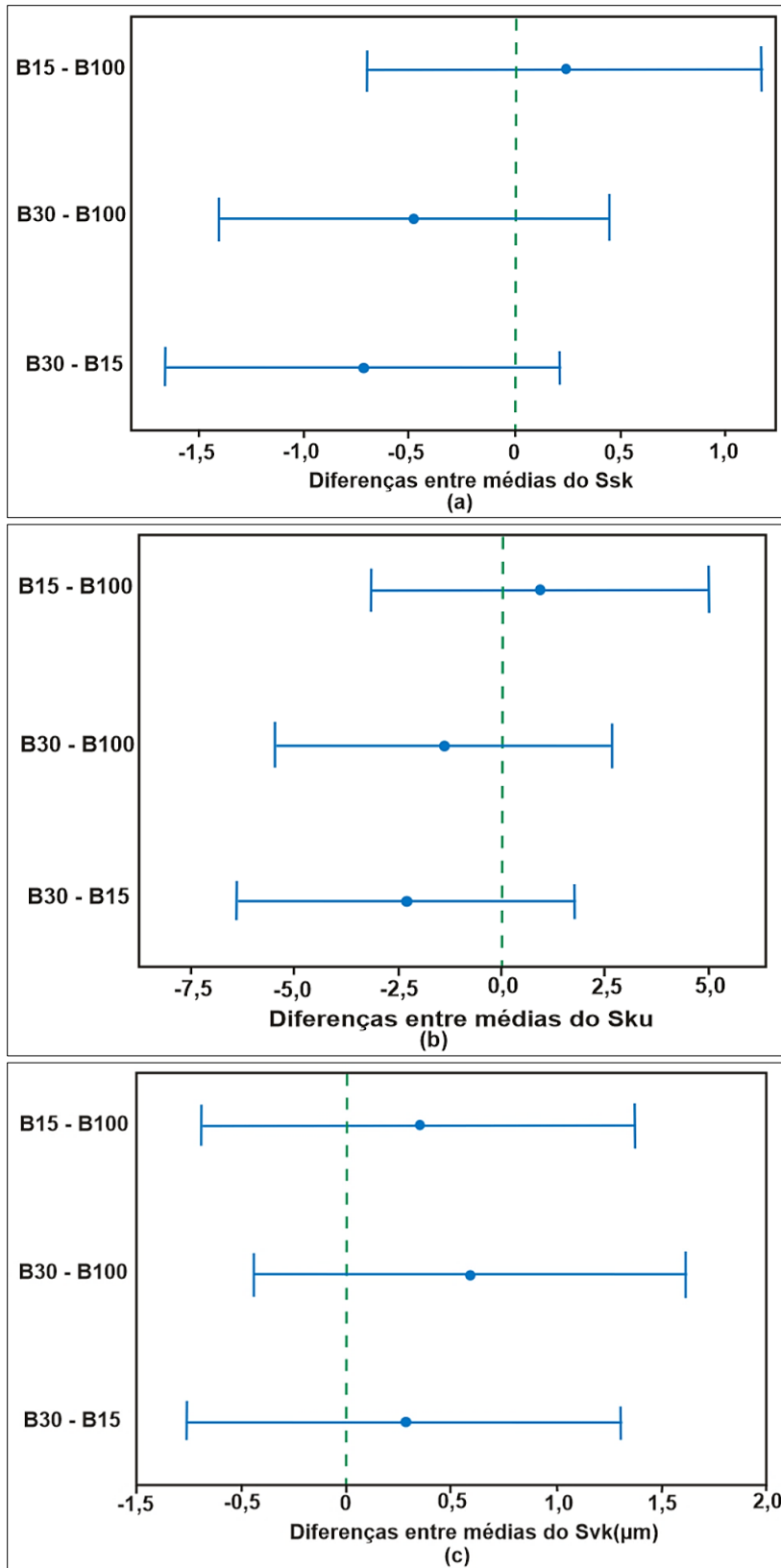
Figura 33 - Comparação entre as superfícies de um corpo de prova da configuração A imerso na mistura B30.



Fonte: O Autor

Embora seja possível notar pequenas diferenças em locais específicos das superfícies, além do fato de que maiores volumes de biodiesel podem tornar as misturas potencialmente mais corrosivas (FAZAL; HASEEB; MASJUKI, 2011a; DHARMA et al., 2019) de maneira geral, por meio do teste de Tukey foi possível verificar que as três misturas estudadas (B15, B30 e B100) não causaram mudanças significativas nos parâmetros de superfície mencionados, como pode ser visto na Figura 34, que mostra os resultados para um corpo de prova da configuração A em ensaios de imersão de frestas.

Figura 34 - Intervalos das diferenças entre médias do Ssk (a), Sku (b) e Svk(c) em relação às misturas B15, B30 e biodiesel(B100) - Configuração A.



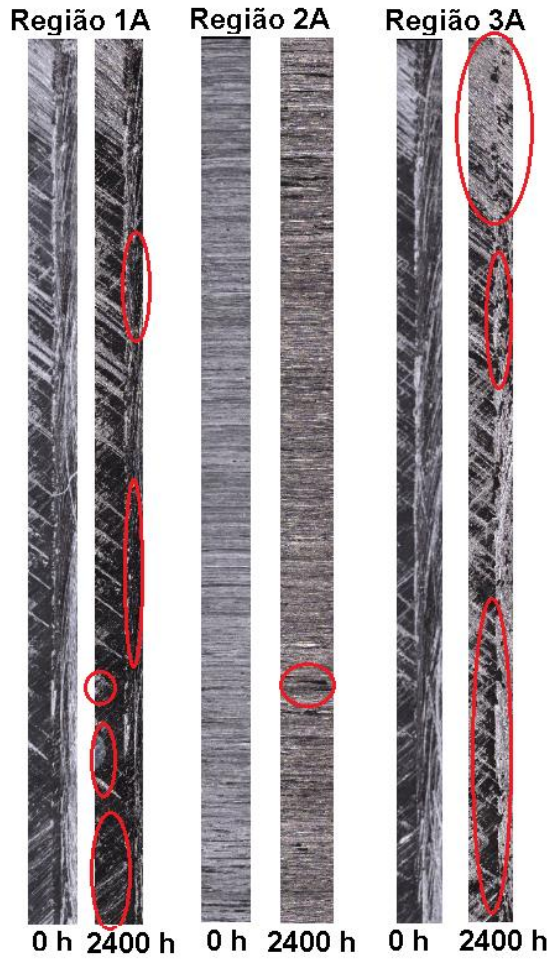
Fonte: O Autor

Os resultados relativos às misturas são semelhantes aos reportados por

Viana (2013), em que ensaios de imersão de aço 1020 realizados durante 120 dias (2880h) com as misturas B4, B5 e B100 (obtido através de transesterificação de óleo de soja comercial com etanol, e hidróxido de sódio como catalisador) não provocaram alterações significativas nas superfícies das amostras de aço analisadas. Isto se deve ao fato de que, em contato com o ar e a água, o aço pode reagir rapidamente com o oxigênio formando uma camada de óxido nas superfícies, sendo neste caso menos suscetível à oxidação por parte das misturas diesel-biodiesel (VIANA, 2013).

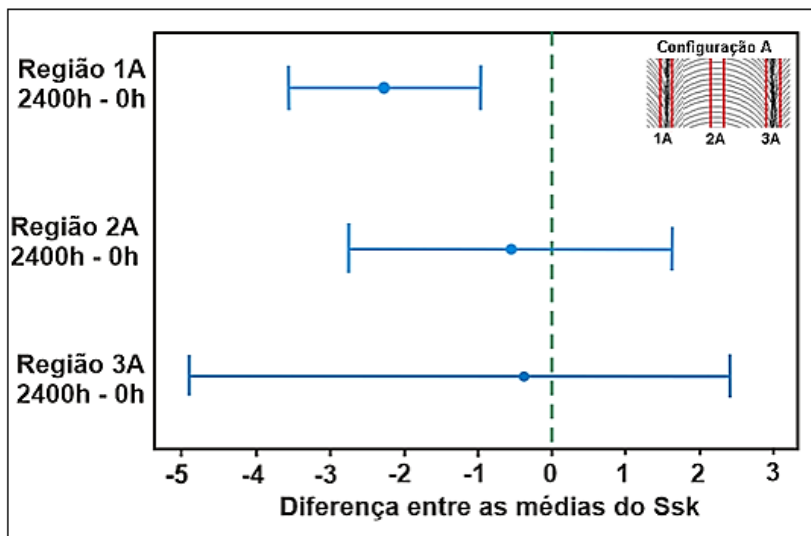
Apesar do fato de que as misturas não produziram efeitos significativos, os resultados do biodiesel (B100) indicam que mudanças mais evidentes foram observadas nas superfícies da configuração A que ficaram imersas nesse combustível. Na Figura 35 as áreas em destaque das regiões 1A, 2A e 3A em 2400h sofreram alterações na topografia em relação à sua condição em 0h, indicando que essas regiões foram atacadas pelo biodiesel (B100). Tal ocorrência pode explicar os resultados da Figura 36, que mostra diferença entre as médias de Ssk a 0h e 2400h na região 1A. Sendo negativa a diferença entre médias, é provável que o biodiesel tenha causado corrosão leve nessas regiões. Apesar do fato de que a região 3A também apresenta mudanças, estas não foram suficientes para provocar alterações no valor de Ssk.

Figura 35 - Topografia das superfícies de um corpo de prova da configuração A após imersão em biodiesel (B100).



Fonte: O Autor

Figura 36 - Intervalos das diferenças entre médias de Ssk de corpos de prova da configuração A em biodiesel (B100).

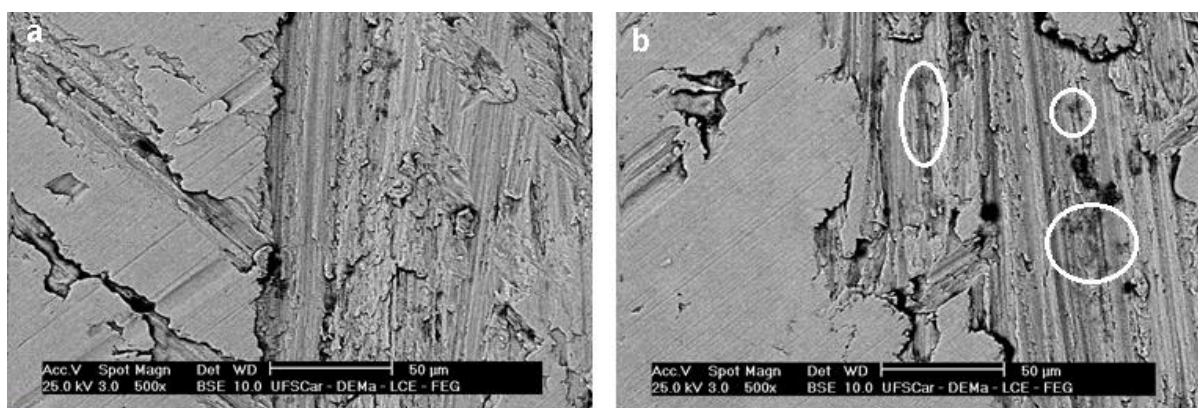


Fonte: O Autor

Apesar dos resultados referentes ao Ssk, as médias dos parâmetros Sku e Svk se mostraram estatisticamente iguais após 2400h de imersão no biodiesel (B100), evidenciando assim que o contato das superfícies com esse combustível não provocou alterações significativas a ponto de serem detectadas pela variação desses parâmetros.

Considerando o fator tipo de ensaio, os ensaios de imersão e corrosão por frestas não produziram alterações significativas nas médias dos parâmetros de rugosidade (Ssk, Sku e Svk). Esperava-se que a diferença de concentração de oxigênio nessas regiões pela presença das frestas causasse efeitos corrosivos detectáveis, porém não foram observados sinais de corrosão nesses locais, mas tão somente alguns possíveis pontos de oxidação, conforme apresentado na Figura 37. Nesses pontos a análise de EDS permitiu identificar a presença de traços de oxigênio (0,7% em massa), possivelmente decorrente da oxidação nos pontos em destaque.

Figura 37 - MeV (500x) das regiões do ensaio de imersão (a) e frestas (b).



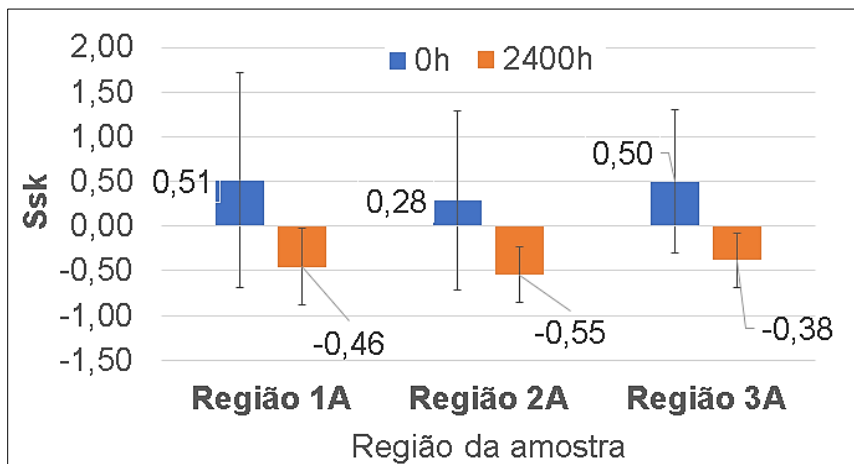
Fonte: O Autor

No ensaio de fase de vapor não foram encontradas alterações superficiais significativas nos corpos de prova analisados, e a razão para isto pode estar no fato de que seja necessário um maior tempo de contato entre vapores das misturas e as superfícies para que efeitos corrosivos mais severos possam ser detectados.

Uma vez que as misturas B15, B30 e B100 utilizadas nos testes de imersão, frestas e fase de vapor não produziram efeitos significativos nos parâmetros de rugosidade, todas as peças de cada configuração foram avaliadas em conjunto para verificar se houve alguma alteração em relação ao tempo de teste. O teste de Tukey apontou que a configuração A apresenta diferenças entre médias do Ssk a 0h e

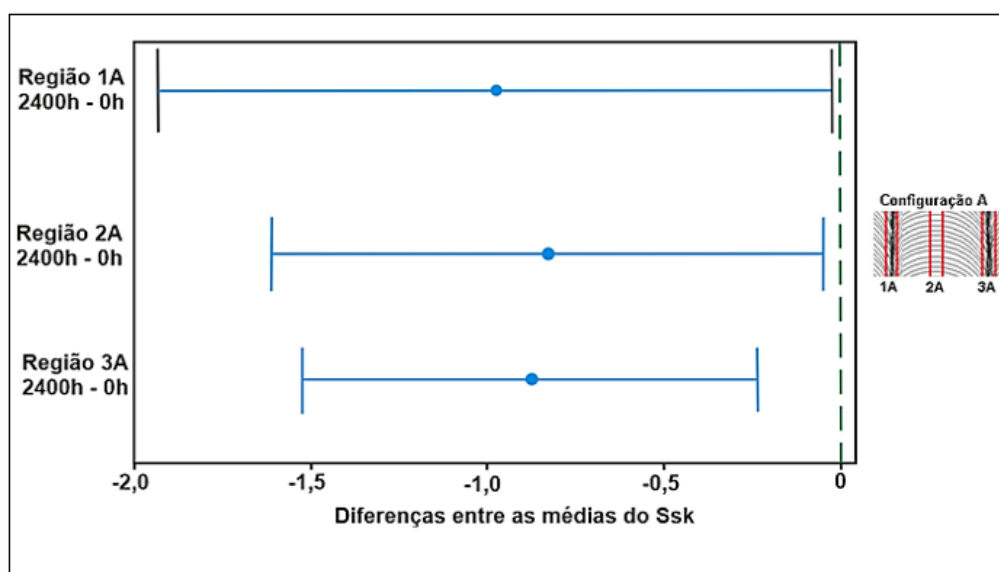
2400h (Figura 38 e Figura 39). A variação desses valores indica que as superfícies dessa configuração apresentam maior percentual médio de vales após 2400h de ensaio. Uma possível justificativa para essa mudança está no fato de que a predominância de picos antes dos testes (Figura 38 – 0h) pode ter sido responsável por tornar essas superfícies eletroquimicamente mais ativas que as da configuração B devido à maior área de exposição da superfície ao combustível (TOLOEI; STOILOV; NORTHWOOD, 2013). Desta forma, há maior possibilidade de formação de uma espessura de filme de óxido irregular, que favorece o processo de transmissão de cargas elétricas entre as misturas e a superfície, conforme reportado por Guangjun et al. (2020).

Figura 38 - Comparação entre as médias dos valores de Ssk em 0h e 2400h de ensaios, configuração de usinagem A.



Fonte: O Autor

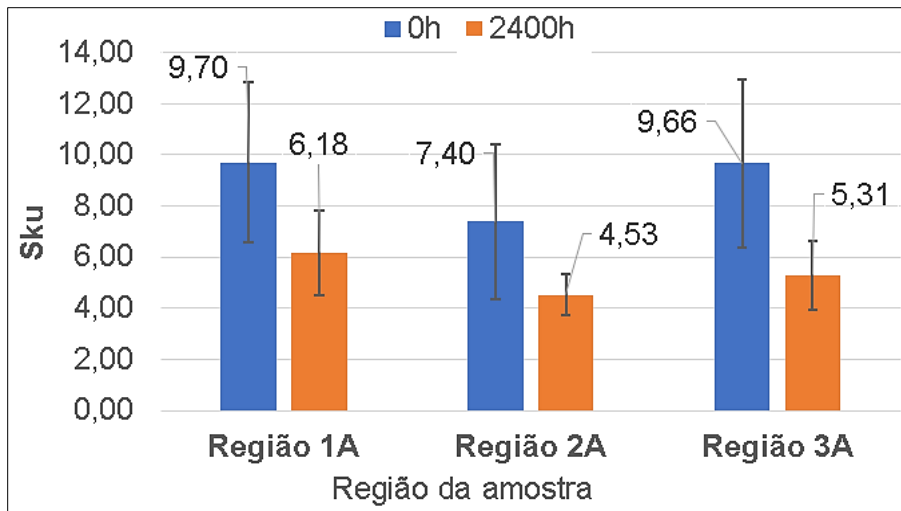
Figura 39 - Intervalos das diferenças entre médias do Ssk entre 0h e 2400h de ensaios – Configuração A



Fonte: O Autor

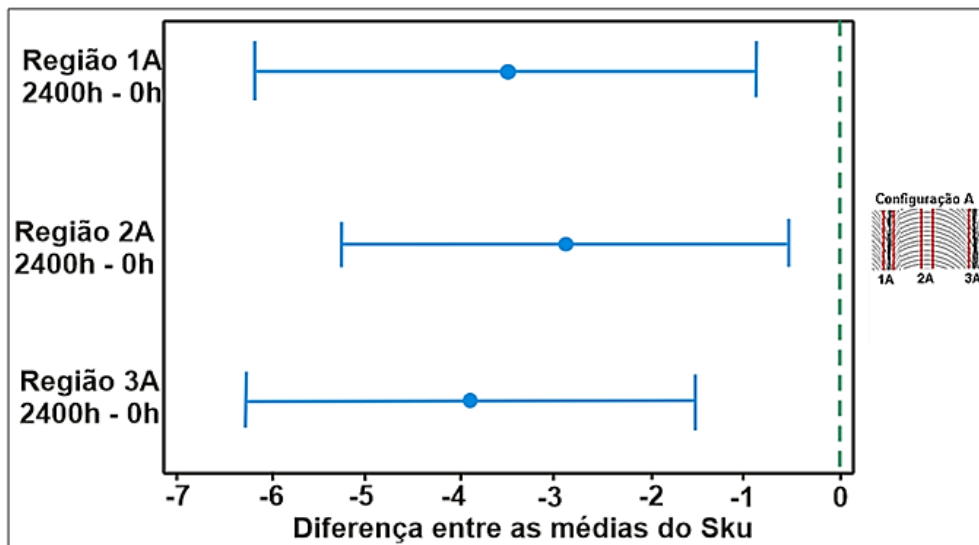
Para esta mesma configuração de usinagem houve uma diminuição no valor de S_{ku} (Figura 40 e Figura 41). Isto sugere que, pelo fato dessas superfícies apresentarem os maiores valores para esse parâmetro antes dos ensaios, suas superfícies eram eletroquimicamente mais ativas que as da configuração B devido à presença de picos mais expostos ao biodiesel (B100) e às misturas diesel/biodiesel B15, B30 (GUANGJUN et al, 2020; TOLOEI; STOILOV; NORTHWOOD, 2013), o que pode ter sido a causa das alterações estatisticamente significativas após as 2400h de ensaio. A diminuição nesses valores segue tendência semelhante à que foi verificada por To, Umezawa e Shinohara (2018) em testes de corrosão de amostras de aço expostas à atmosfera, onde os valores de S_{ku} sofreram uma queda e se aproximaram de 3 (três). Segundo os autores, a formação de camada de óxido regular nas superfícies ao longo do tempo de exposição é responsável pelo comportamento deste parâmetro.

Figura 40 - Comparação entre as médias dos valores de Sku em 0h e 2400h de teste, configuração de usinagem A.



Fonte: O Autor

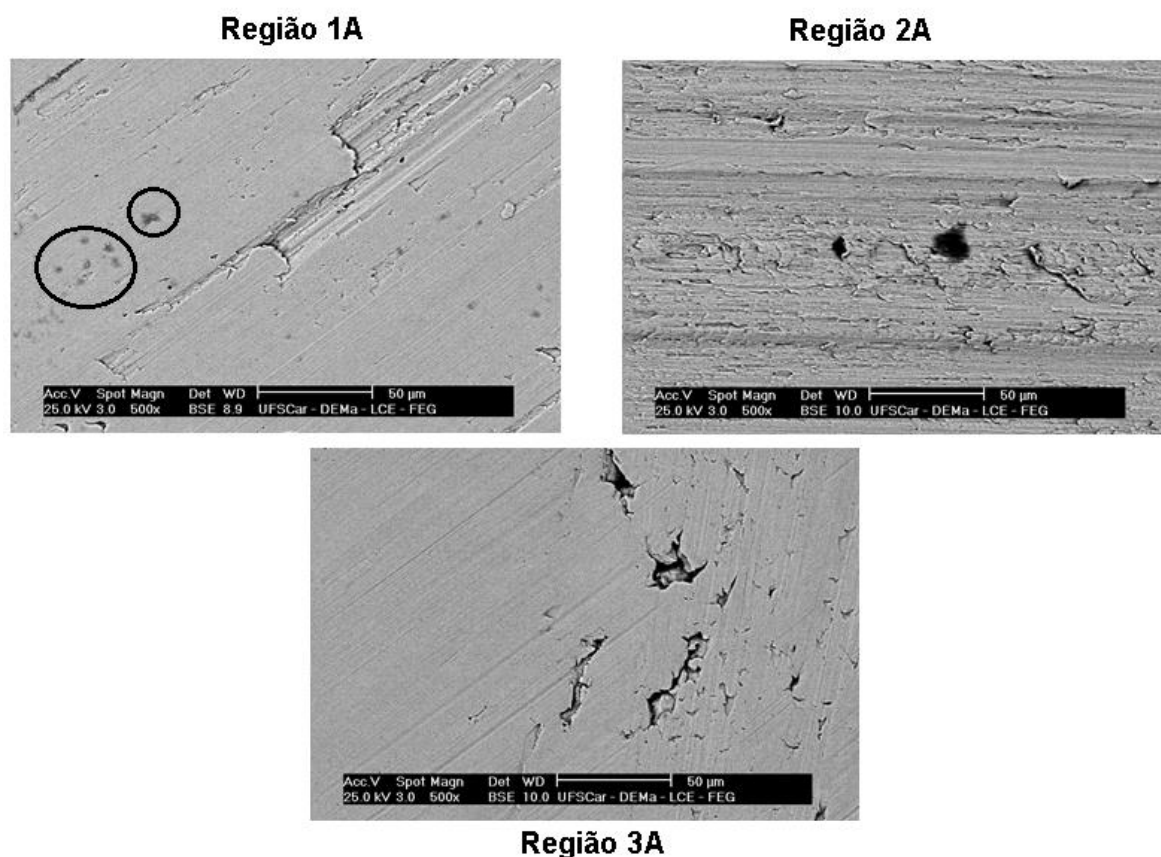
Figura 41 - Intervalos das diferenças entre médias do Sku entre 0h e 2400h de teste - Configuração A.



Fonte: O Autor

As médias do Svk não apresentaram diferenças significativas para as superfícies desta configuração. Nas imagens de microscopia eletrônica (Figura 42) é possível observar em destaque alguns pontos de oxidação na região 1A de um corpo de prova da configuração de usinagem A. Nas regiões 1A e 3A foram encontrados traços de oxigênio de 1,14% e 0,14% em massa, respectivamente. A região 2A não apresentou quantidades significativas de oxigênio.

Figura 42 - MeV (500x) das regiões de um corpo de prova da configuração A após 2400h de ensaio.

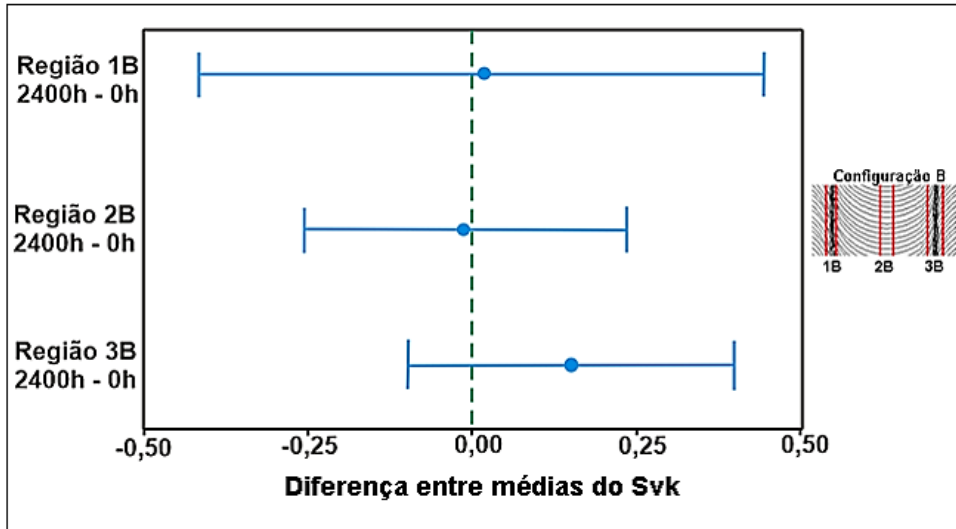


Fonte: O Autor

Para a configuração B as diferenças médias dos valores do Ssk, Sku e Svk em 0h e 2400h não foram estatisticamente significativas. Levando-se em conta estes parâmetros, pode-se afirmar que as características dessas regiões podem ter favorecido o aparecimento de um filme de óxido nas três regiões, o que pode ter contribuído para retardar os efeitos decorrentes da corrosão (SCHWEITZER, 2009), sendo a maior presença de vales um efeito pouco ou nada significativo nos testes realizados.

Antes dos ensaios de corrosão foi verificado que o valor médio do Svk da configuração B era maior em relação à configuração A, e para essas superfícies esperava-se que a média deste parâmetro aumentasse após 2400h em decorrência da corrosão, porém isso não foi observado (Figura 43). Segundo Chen e Ju (2015) o valor do Svk é mais fortemente afetado pela presença de pites na superfície, e um aumento em seu valor está condicionado à presença de grandes quantidades de pites nas áreas analisadas. Como não há presença de pites nas regiões caracterizadas não houve variação significativa desse parâmetro.

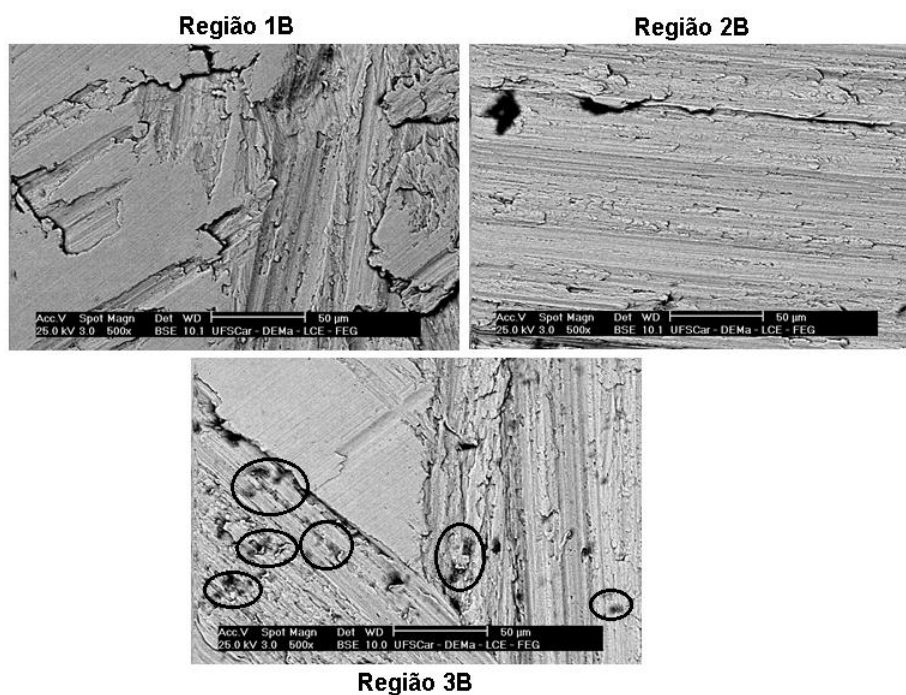
Figura 43 - Intervalos das diferenças entre médias do Svk das amostras da configuração B - 0h e 2400h de ensaio.



Fonte: O Autor

As imagens de obtidas por microscopia eletrônica de varredura mostram que existem pontos específicos em destaque que sugerem um processo de oxidação na região 3B (Figura 44), visto que traços de oxigênio (0,7% em massa) foram detectados nessa região.

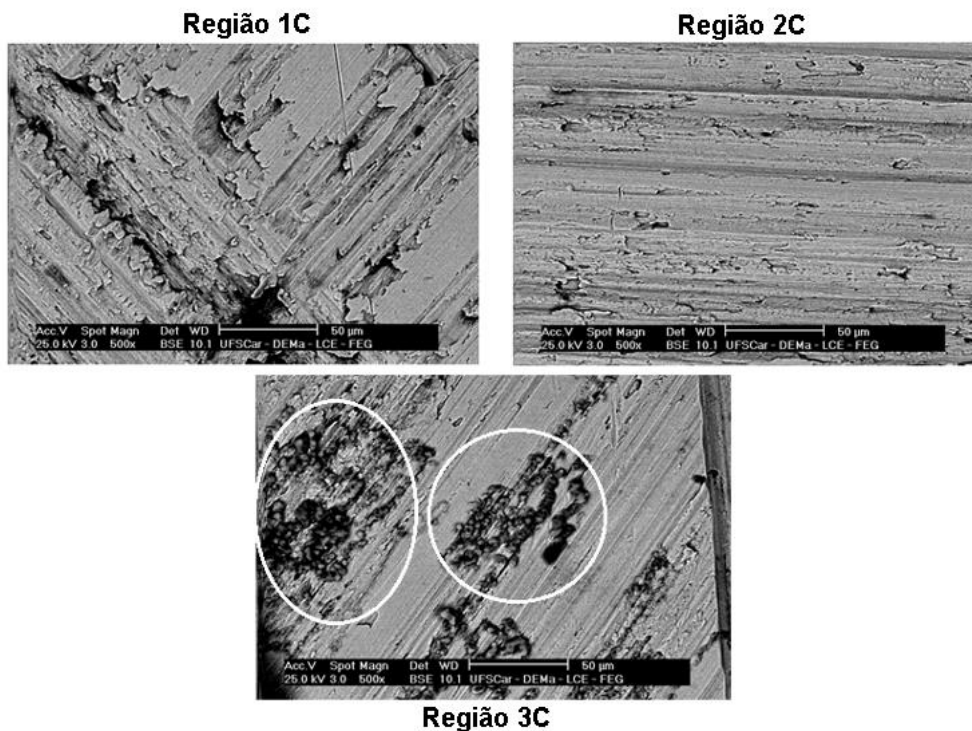
Figura 44 - MeV (500x) das regiões de um corpo de prova da configuração B após 2400h de ensaio.



Fonte: O Autor

De acordo com o teste de Tukey, na configuração C não existe diferença entre as médias de todos os parâmetros de rugosidade em 0h e 2400h de ensaios, porém nas regiões em destaque da Figura 45 a análise de EDS encontrou traços de oxigênio (2,77% em massa), indicando que pode ter ocorrido oxidação nesses locais.

Figura 45 - MeV (500x) das regiões de um corpo de prova da configuração C após 2400h de ensaio.

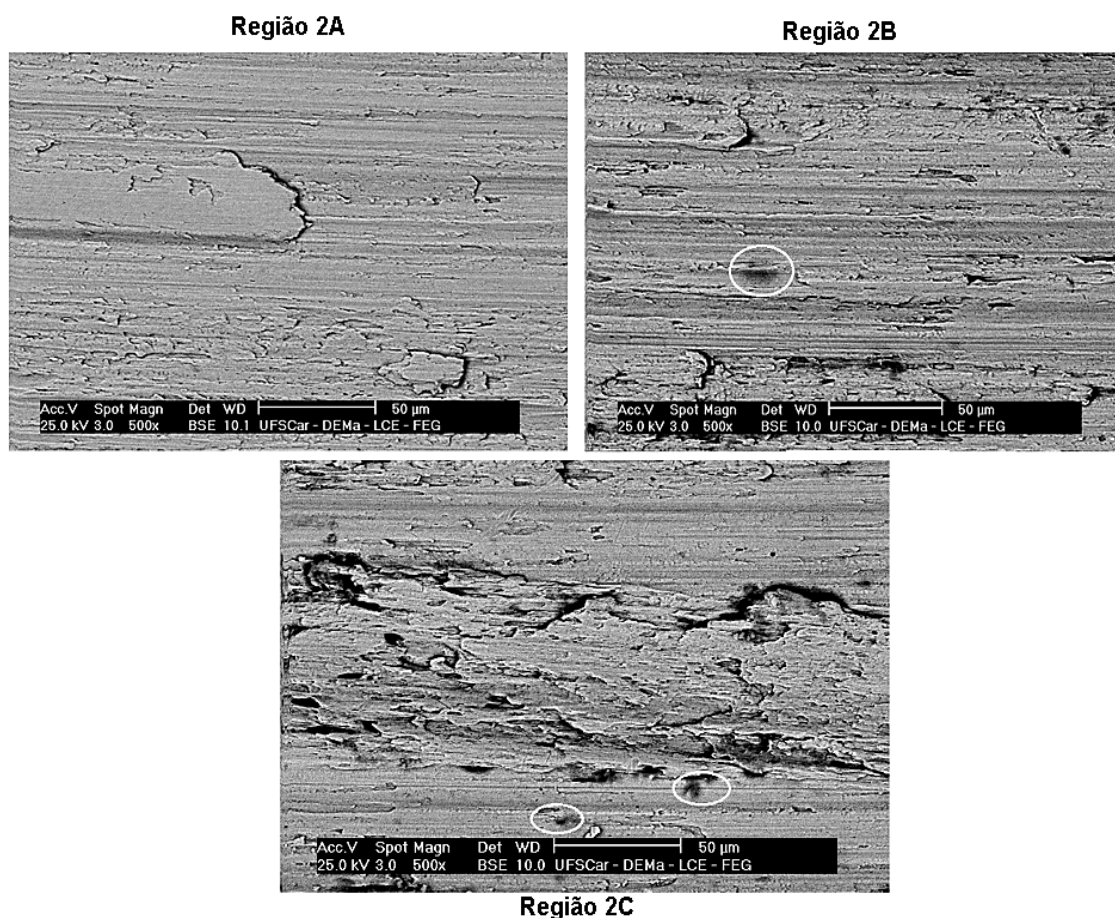


Fonte: O Autor

A região 2, comum à todas as três configurações de usinagem, também não apresentou mudanças nas médias de S_{sk} , S_{ku} e S_{vk} após os ensaios. Antes dos ensaios de corrosão foi verificado que a configuração C apresentou o maior valor médio do S_{vk} , sendo esperada maior variação desse parâmetro em função da capacidade de armazenar maiores volumes das misturas nos vales dessas superfícies. Porém, nas regiões 2C não foram observadas diferenças significativas para este parâmetro, e também não foi detectada a presença de pites de corrosão nessas superfícies, o que provavelmente seria a principal causa de grandes variações nos valores do S_{vk} (CHEN; JU, 2015).

A Figura 46 mostra regiões em destaque das configurações B e C onde possivelmente houve oxidação, sendo que o teor de oxigênio em massa encontrado nessas regiões é de 0,29% na configuração B e 0,11% na configuração C. Porém, isso não foi suficiente para que os efeitos mais expressivos da corrosão e a alteração significativa dos parâmetros de rugosidade pudessem ser detectados.

Figura 46 - MeV (500x) da região 2 de corpos de prova das configurações de usinagem A, B e C após 2400h de ensaio.



Fonte: O Autor

Sendo assim, o contato do metal usinado nas condições descritas anteriormente com as misturas B15, B30 e B100 não promoveu variações significativas na rugosidade da região 2 das três configurações de usinagem. A alta resistividade elétrica do biodiesel e suas misturas (AMBROZIN; KURI; MONTEIRO, 2009), somada à possibilidade de formação de óxido nas superfícies podem ter retardado os efeitos do meio na corrosão metálica.

Os resultados deste estudo foram obtidos através da utilização de um biodiesel proveniente de óleo de soja e óleo de palma, tendo seus parâmetros de qualidade atendendo os limites de especificação estabelecidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. No estudo realizado observou-se que os dados da literatura sobre a temática nem sempre apresentavam informações sobre a qualidade do biodiesel utilizado. Assim sendo, esses resultados reportados podem representar condições distintas em função da matéria-prima e dos parâmetros de

qualidade do biodiesel. Parâmetros de qualidade fora dos limites, tais como contaminação total, índice de acidez, teor de sódio, potássio, metanol, glicerol, teor de água, entre outros, podem influenciar nos ensaios de corrosão, por isso, é de suma importância que tais parâmetros sejam sempre determinados e levados em consideração na análise global dos resultados.

6. CONCLUSÕES

A análise completa das condições de uma superfície após um processo de fabricação é de suma importância, pois envolve a utilização de parâmetros de rugosidade 3D, que estão relacionados às características funcionais para determinadas aplicações, como é o caso da presença de superfícies metálicas em ambientes corrosivos. Pela diferença dos parâmetros Ssk, Sku e Svk nas regiões de intersecção entre trajetórias da ferramenta, para as configurações de fresamento testadas nesse trabalho, eram esperadas alterações mais significativas nos valores desses parâmetros após os ensaios de corrosão, porém apenas a configuração A apresentou diferenças médias significativas para o Ssk e o Sku. Isto pode indicar que suas superfícies foram eletroquimicamente mais ativas que as da configuração B, devido à predominância de picos e à presença de áreas mais expostas às misturas diesel/biodiesel. Sendo assim, o efeito do maior percentual de vales nas configurações B e C não indicou uma influência significativa no processo de corrosão, uma vez que após os ensaios as médias dos valores do Svk não apresentaram diferenças estatisticamente significativas.

Para melhor entendimento dos efeitos das características da superfície no contato com misturas diesel/biodiesel, biodiesel e outros combustíveis sugere-se o desenvolvimento de testes em temperatura superior à ambiente e que envolvam medidas eletroquímicas para avaliar o comportamento à corrosão de materiais metálicos em contato com esses combustíveis. Esta ação pode reduzir o elevado tempo para determinar as taxas de corrosão do biodiesel e suas misturas com óleo diesel, e desta forma, será possível avaliar a compatibilidade dos materiais metálicos em relação ao combustível, ampliando a possibilidade do uso de outros materiais e processos de fabricação para a obtenção de componentes com diferentes características superficiais. Além disso, é importante avaliar a influência da superfície do metal na alteração dos parâmetros de qualidade do biodiesel e das misturas diesel/biodiesel.

Esse conjunto de dados corrobora para a geração de conhecimentos que favoreçam o uso de novas matérias-primas para a produção de biodiesel, que tem se destacado como um importante biocombustível na matriz energética veicular mundial.

REFERÊNCIAS

ABOSRRA, L. et al. Corrosion Of Mild Steel And 316L Austenitic Stainless Steel With Different Surface Roughness In Sodium Chloride Saline Solutions. **Electrochemical Process Simulation III**. Seville, Spain, v. 65, p. 161-172, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Óleo diesel brasileiro passa a conter mínimo de 12% de biodiesel**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/noticias/5633-oleo-diesel-brasileiro-passa-conter-minimo-12-biodiesel>. Acesso em: 17 mar. 2020(ref. a).

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**. 2020. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2020/anuario-2020.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2020(ref. b)

ALI, R. A. et al. Multi-Response Optimization of Face Milling Performance Considering Tool Path Strategies in Machining of Al-2024. **Materials**. [s. L.], p. 1013-1032. abr. 2019.

ALVAREZ, R. B. et al. Corrosion relationships as a function of time and surface roughness on a structural AE44 magnesium alloy. **Corrosion Science**. [s. L.], p. 1635-1648, mai. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G01**: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. [s. L.]: ASM International, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G31-12A**: Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. [s. L.]: ASM International, 2012.

AMBROZIN, A. R. P.; KURI, S. E.; MONTEIRO, M. R. Corrosão metálica associada ao uso de combustíveis minerais e biocombustíveis. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 7, p. 1910-1916, ago. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422009000700037>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422009000700037. Acesso em: 07 maio 2021.

ARIS, N.F.M.; CHENG, K. Characterization of the surface functionality on precision machined engineering surfaces. **International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**. [s. L.], v. 38, p. 402-409, ago. 2008.

ASTAKHOV, V. P. Surface integrity - Definition and importance in functional performance. In: DAVIM, J. Paulo. **Surface Integrity in Machining**. London: Springer, 2010. cap. 1, p. 1-35.

BENKAFADA, F.; KERDOUD, D.; BOUCHOUCHA, A. **Evolution Study of the Surface States of Low Carbon Microalloyed Steel before and after Corrosion in NaCl Solution**. 2018. Disponível em: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2018/24/matecconf_fatigue2018_03013.pdf. Acesso em: 22 fev. 2021.

BHALE, P.; SORATE, K. A. Impact of biodiesel on fuel system materials durability. **Journal Of Scientific And Industrial Research**. [s. L.], v.72, p. 48-57. jan. 2013.

BLATEYRON, F. The Areal Field Parameters. In: LEACH, R. **Characterisation of Areal Surface Texture**. Berlin: Springer, 2013. Cap. 2. p. 15-43.

CAO, P. et al. Effect of Membrane Pore Size on the Performance of a Membrane Reactor for Biodiesel Production. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. [s. L.], v. 46, n. 1, p. 52-58. dez. 2007.

CHEN, A.; JU, Lu-Kwang. Method for Fast Quantification of Pitting Using 3D Surface Parameters Generated with Infinite Focus Microscope. **Corrosion: The journal of science and engineering**. [S.L.], p. 1184-1196. jun. 2015.

COROMANT, S. **Pastilha CoroMill® 390 para fresamento**. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/Pages/productdetails.aspx?c=R390-11%20T3%2008M-PM%20%20%201130>. Acesso em: 17 mar. 2020.

DEMIRBAS, A. Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods. **Progress In Energy And Combustion Science**. [s. L.], v. 31, n. 5-6, p. 466-487. jan. 2005.

DHARMA, S. et al. Properties and corrosion behaviors of mild steel in biodiesel-diesel blends. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**. [s. L.], p. 1-13. set. 2019.

DINIZ, A.; MARCONDES, F.; COPPINI, N. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2014. 272 p.

FAZAL, M. A.; HASEEB, A. S. M. A.; MASJUKI, H. H. Biodiesel feasibility study: an evaluation of material compatibility; performance; emission and engine durability. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**. [s. L.], v.15, n. 2, p. 1314-1324. fev. 2011b.

FAZAL, M.A.; HASEEB, A.S.M.A.; MASJUKI, H.H. Effect of temperature on the corrosion behavior of mild steel upon exposure to palm biodiesel. **Energy**. [S.L.], p. 3328-3334. maio 2011a.

FIELD, M.; KAHLES, J. F.; KOSTER, W. P. Surface Finish and Surface Integrity. In: INTERNATIONAL, ASM. **Metals Handbook - Machining**. 16. ed. [s. L.]: ASM International, 1989. p. 19-36.

FRANCO, P.; ESTREMS, M.; FAURA, F. Influence of radial and axial runouts on surface roughness in face milling with round insert cutting tools. **International Journal Of Machine Tools And Manufacture**. [s. L.], v. 14, n. 15, p. 1555-1565. jun. 2004.

GUANGJUN, C. et al. Optimization of Machining Parameters and Electrochemical Corrosion Behavior of hardened Cr12MoV Mold Steel. **International Journal Of Electrochemical Science**. [S. L.], p. 3646-3659. abr. 2020.

GELLER, D. P. et al. Storage stability of poultry fat and diesel fuel mixtures: Specific gravity and viscosity. **Fuel**. [s. L.], v. 87, n. 1, p. 92-102. jan. 2008.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 376 p.

GEORGESCU, C. et al. **Evaluating lubricating capacity of vegetal oils using Abbott-Firestone curve**. 2017. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/174/1/012057>. Acesso em: 13 abr. 2020.

GAZZONI, D. L. **Balanco de emissões de CO2 por biocombustíveis no Brasil: histórico e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Embrapa, 2014. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/939784/balanco-de-emissoes-de-co2-por-biocombustiveis-no-brasil-historico-e-perspectivas>. Acesso em: 16 jul. 2021.

GRZESIK, W. Influence of surface textures produced by finishing operations on their functional properties. **Journal Of Machine Engineering**. [s. L.], v. 16, n. 1, p. 15-23. mar. 2016a.

GRZESIK, W. Prediction of the Functional Performance of Machined Components Based on Surface Topography: State of the Art. **Journal Of Materials Engineering And Performance**. [s.l.], p. 4460-4468. ago. 2016b.

GRZESIK, W.; KRUSZYNSKI, B.; RUSZAJ, A. Surface Integrity of Machined Surfaces. In: DAVIM, J. P. (ed.). **Surface Integrity in Machining**. London: Springer, 2010. cap. 5, p. 143-179.

GUANGJUN, C. et al. Optimization of Machining Parameters and Electrochemical Corrosion Behavior of hardened Cr12MoV Mold Steel. **International Journal Of Electrochemical Science**. [S. L.], p. 3646-3659. abr. 2020.

GÜMPEL, P.; HÖRTNAGL, A.. Influence of the surface condition on corrosion behavior of stainless steel. **Materials And Corrosion**. [s. L.], v. 67, n. 6, p. 607-620. jun. 2016.

HANAKI, K.; PORTUGAL-PEREIRA, Joana. The Effect of Biofuel Production on Greenhouse Gas Emission Reductions. In: TAKEUCHI, Kazuhiko *et al.* **Biofuels and Sustainability: holistic perspectives for policy-making**. Tokyo: Springer Open, 2018. Cap. 6. p. 53-74.

HASEEB, A. S. M. A. et al. Compatibility of automotive materials in biodiesel: A review. **Fuel**. [s. L.], v. 90, n. 3, p. 922-931. jan. 2011.

HEIDARI, M.; YAN, J.. Fundamental characteristics of material removal and surface formation in diamond turning of porous carbon. **International Journal Of Additive And Subtractive Materials Manufacturing**. [s. L.], v. 1, n. 1, p. 23-41. mar. 2017.

HILBERT, L. R. et al. Influence of surface roughness of stainless steel on microbial adhesion and corrosion resistance. **International Biodeterioration And Biodegradation**. [s. L.], v. 52, n. 3, p. 175-185. out. 2003.

HONG, T.; NAGUMO, M.. Effect of surface roughness on early stages of pitting corrosion of Type 301 stainless steel. **Corrosion Science**. [s. L.], v. 39, n. 9, p. 1665-1672. set. 1997.

JAIN, S.; SHARMA, M. P. Stability of biodiesel and its blends: a review: A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**. [s. L.], v. 14, n. 2, p. 667-678. fev. 2010.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. New Jersey. Prentice Hall, 2013. 1180p.

KAUL, S. et al. Corrosion behavior of biodiesel from seed oils of Indian origin on diesel engine parts. **Fuel Processing Technology**. [s. L.], v. 8, n. 2, p. 303-307. mar. 2007.

KNOTHE, G. et al. **Manual de Biodiesel**. São Paulo: Blucher, 2006. 352 p.

KOÇAR, G.; CIVAŞ, N. An overview of biofuels from energy crops: Current status and future prospects. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**. [s. L.], v. 8, p. 900-916. dez. 2013.

KUGELMEIER, C. L. **Estudo dos Efeitos do Biodiesel e Suas Misturas com Óleo Diesel em Materiais Metálicos**. 2017. 139 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

LACALLE, L. N. L. de; CAMPA, F. J.; LAMIKIZ, A. Milling. In: DAVIM, J P. **Modern Machining Technology: a practical guide**. A Practical Guide. [s. L.]: Woodhead Publishing, 2011. cap. 3, p. 213-297.

LAGE, R.; MØLLER, P.; FALLESEN, H. E.. The effect of surface treatment and topography on corrosion behavior of EN 1.4404 stainless steel. **Materials And Corrosion**. [s. L.], v. 66, n. 10, p. 1060-1067. out. 2015.

LEUNG, D. Y. C.; WU, X.; LEUNG, M. K. H. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. **Applied Energy**. [s. L.], v. 87, n. 4, p. 1083-1095. abr. 2010.

LÔBO, I. P.; FERREIRA, S. L. C.; CRUZ, R. S. Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos: parâmetros de qualidade e métodos analíticos. **Química Nova**, [s.l.], v. 32, n. 6, p. 1596-1608, abr. 2009.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Blucher, 2015. 408 p.

MARU, M. M. et al. Biodiesel compatibility with carbon steel and HDPE parts. **Fuel Processing Technology**. [s. L.], v. 90, n. 9, p. 1175-1182. set. 2009.

M'SAOUBI, R. et al. A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. **International Journal Of Sustainable Manufacturing**. [S. L.], p. 203-236. jul. 2008.

MEIRA, M. et al. Oxidative degradation and corrosiveness of biodiesel. **Corrosion Reviews**. [s. L.], v. 34, n. 3-4, p. 143-161. jul. 2014.

NIU, J. et al. Effect of machining-induced surface integrity on the corrosion behavior of Al-Li alloy 2A97 in sodium chloride solution. **Materials And Corrosion**. [s. L.], v. 70, n. 2, p. 259-267. fev. 2019.

PEREIRA, R. G.; MORAES, J. O. C.; PARDAL, J. M. The influence of soybean biodiesel and diesel on corrosion of SAE 1020 carbon steel. **Revista Ibero-americana de Ciências Ambientais**, [s.l.], v. 9, n. 8, p. 158-167, maio 2019.

PETROPOULOS, G. P.; PANDAZARAS, C. N.; DAVIM, J. P. Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining. In: DAVIM, J. Paulo. **Surface Integrity in Machining**. London: Springer, 2010. cap. 2, p. 37-66.

PIMENOV, D. Y. et al. Effect of the Relative Position of the Face Milling Tool towards the Workpiece on Machined Surface Roughness and Milling Dynamics. **Applied Sciences**. [s. L.], v. 9, n. 5, p. 842-859. jan. 2019.

PRIETO, L. E. G.; SORICHETTI, P. A.; ROMANO, S. D.. Electric properties of biodiesel in the range from 20 Hz to 20 MHz. Comparison with diesel fossil fuel. **International Journal Of Hydrogen Energy**. [s. L.], v. 33, n. 13, p. 3531-3537. jul. 2008.

PULLEN, J.; SAEED, K.. An overview of biodiesel oxidation stability. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**. [s. L.], v. 16, n. 8, p. 5924-5950. out. 2012.

REIS, B. C. M.; PINTO, R. L. M.; SOARES, C. L. Aplicação da Análise Estatística via Teste de Tukey e Análise de Variância para a avaliação dos parâmetros de qualidade de corte em um processo de fabricação. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 36., 2016, João Pessoa, PB, **Anais [...]**, Rio de Janeiro: ABEPRO, 2016. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_227_328_29448.pdf.

RÎPĂ, M. et al. Tribological Characterisation of Surface Topography using Abbott-Firestone Curve. In: "Dunărea de jos" of Galati fascicle viii, Tribology, 8., 2003, Galati. **Anais [...]**. Galati, Romênia: University Of Galati, 2003. p. 208-2012.

Disponível em: <http://www.om.ugal.ro/AnnalsFasc8Tribology/>. Acesso em: 13 abr. 2020.

SAHAY, C.; GHOSH, S. Understanding surface quality: Beyond average roughness (Ra) materials science. In: American Society for Engineering Education Annual Conference and Exposition 2018, 2., 2018, Salt Lake City. **Proceedings [...]**. New York: American Society For Engineering Education, 2018. p. 17363-17383.

SCHWEITZER, P. A. **Fundamentals of Corrosion-Mechanisms, Causes, and Preventative Methods**. London: CRC Press, 2009. 416 p.

SETIAWAN, A. et al. Corrosion Characteristics of Carbon Steel upon Exposure to Biodiesel Synthesized from Used Frying Oil. **Reaktor**. [s. L.], v. 17, n. 4, p. 177-184. dez. 2018.

SHARLAND, S. M.. A review of the theoretical modelling of crevice and pitting corrosion. **Corrosion Science**. [s. L.], v. 27, n. 3, p. 289-323. mar. 1987.

SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. 2. ed. New York: Oxford University, 2005. 633 p.

SINGH, B.; KORSTAD, J.; SHARMAA, Y. C.. A critical review on corrosion of compression ignition (CI) engine parts by biodiesel and biodiesel blends and its inhibition. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**. [s. L.], v. 16, n. 5, p. 3401-3408. jun. 2012.

SURNAM, B. Y. R.; OLETI, C.V.. Using three-dimensional surface roughness parameters in analysis of atmospheric corrosion degradation. **Corrosion Engineering, Science And Technology**. [s. L.], v. 42, n. 2, p. 96-106. nov. 2013.

TAKAHASHI, Y. A. et al. Influence of Roughness on Corrosion Resistance of Carbon Steel SAE 1020 and DOMEX® 700 MC Steel. **Materials Science Forum**. [S. L.], p. 441-446. out. 2020.

TANG, Y. et al. Effect of Surface Roughness on Pitting Corrosion of 2205 Duplex Stainless Steel Investigated by Electrochemical Noise Measurements. **Materials**. [s. L.], v 12., n. 5, p. 738-758. mar. 2019.

TAUFIK, M.; JAIN, Prashant K.. Laser assisted finishing process for improved surface finish of fused deposition modelled parts. **Journal Of Manufacturing Processes**. [S. L.], p. 161-177. out. 2017.

TO, Dara; UMEZAWA, Osamu; SHINOHARA, Tadashi. Detection of Surface Roughness Evolution of Carbon Steel Subjected to Outdoor Exposure and Constant Humidity Corrosion Tests. **Materials Transactions**. [S. L.], p. 1239-1243. jul. 2018.

TOLOEI, A. S.; STOILOV, V.; NORTHWOOD, D. O.. The Effect Of Different Surface Topographies On The Corrosion Behaviour Of Nickel. In: BREBBIA, C. A.; KLEMM, A. (ed.). **Materials Characterisation VI**. Prague, Czech Republic: Wit Press, 2013. v. 77, p. 193-204.

TOLOEI, A.; STOILOV, V.; NORTHWOOD, D. O.. Simultaneous Effect Of Surface Roughness And Passivity On Corrosion Resistance Of Metals. In: BREBBIA, C.A. **Materials Characterisation VII**. [s. L.]: Wit Press, 2015. p. 355-367.

VÁRADI, K. et al. **3D Characterization of Engineering Surfaces**. 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/239590287_3D_Characterization_of_Engineering_Surfaces. Acesso em: 10 jan. 2020.

VIANA, F. B. **Avaliação da corrosividade do biodiesel e misturas em aço por espectroscopia de impedância eletroquímica**. 2013. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luiz, 2013.

WALPOLE, R. E. et al. **Probability and Statistics for Engineers and Scientists**. 9. ed. [s. L.]: Pearson Prentice Hall, 2012. 816 p.

WEBER, M. **Protect your business and safety goals with a proactive approach to corrosion problems**. 2017. Disponível em: <https://chemical-materials.elsevier.com/chemical-manufacturing-excellence/protect-business-safety-goals-proactive-approach-corrosion-problems/>. Acesso em: 10 fev. 2020.

WHITEHOUSE, D. **Surfaces and their Measurement**. [s. L.]: Butterworth-heimemann, 2004. 432 p.

YUE, C. et al. Part Functionality Alterations Induced by Changes of Surface Integrity in Metal Milling Process: A Review. **Applied Sciences**. [S. L.], p. 2550-2568. dez. 2018.

ZENG, Q. et al. Correlating and evaluating the functionality-related properties with surface texture parameters and specific characteristics of machined components. **International Journal Of Mechanical Sciences**. [S. L.], p. 62-72. dez. 2018.

ZHENYU, S.; LUNING, L.; ZHANQIANG, L. Influence of dynamic effects on surface roughness for face milling process. **International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**. [s. L.], v. 80, p. 1823-1831. abr. 2015.