

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

MICHELE CRAVO DE LIMA

**EFEITO DO PROCESSO DE USINAGEM NO
COMPORTAMENTO DE CORROSÃO SOB TENSÃO
DO AÇO SAE 1020**

SÃO CARLOS - SP

2021

MICHELE CRAVO DE LIMA

EFEITO DO PROCESSO DE USINAGEM NO COMPORTAMENTO DE
CORROSÃO SOB TENSÃO DO AÇO SAE 1020

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

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Carlos Eiji Hirata Ventura

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Della Rovere

Agência financiadora: Coordenação de Apoio de Pessoal de Ensino Superior (CAPES)

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 da candidata Michele Cravo de Lima, realizada em 16/06/2021.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura (UFSCar)

Prof. Dr. Armando Ítalo Sette Antonialli (UFSCar)

Prof. Dr. José Benedito Marcomini (USP)

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 esse trabalho ao meu companheiro e à minha sogra, que sempre me apoiaram e me auxiliaram nessa jornada, e ao Prof. Dr. Rinaldo Gregorio Filho, que me convenceu a entrar neste complicado e maravilhoso mundo acadêmico, me dando todo o suporte necessário em cada conquista.

AGRADECIMENTO

Agradeço ao meu companheiro, Vinícius, pelo apoio durante toda a jornada, por estar ao meu lado durante os melhores momentos e, principalmente, me dando todo suporte nos piores momentos. Por sempre acreditar que tudo ia dar certo.

Agradeço à minha sogra, Solange, por sempre comemorar cada detalhe e me mostrar que no final tudo dá certo e por me dar conselhos e chás calmantes quando começava a dar errado.

Agradeço ao meu sogro, Dr. Rinaldo Gregorio Filho, por dedicar tempo para escutar minhas dúvidas e respondê-las tão sabiamente, por pesquisar quando não sabia de algo apenas para poder me ajudar, por me emprestar livros e espaço em sua casa para fazer os ensaios quando a Universidade não podia (devido à pandemia).

Agradeço aos meus cunhados, Gustavo, por me ajudar quando tinha dúvidas na parte teórica da dissertação, e Henrique, por me ajudar na parte prática.

Agradeço aos meus amigos por comemorarem ao meu lado cada conquista e compreenderem os momentos em que eu não poderia estar presente.

Agradeço aos meus colegas de pesquisa, que sempre me ajudaram e respondiam minhas dúvidas com sabedoria. Agradeço, principalmente, por nunca me julgarem apesar da minha pouca idade e por ser a única mulher da turma, me tratando com respeito e igualdade. Agradeço ao Dennis por ajudar, não só a mim, mas a todos os alunos da pós-graduação, sempre disponível para responder nossas perguntas e nos ajudando com qualquer problema.

Agradeço ao Dr. Levi de Oliveira Bueno por me ajudar nos ensaios de tração, disponibilizando seu tempo e equipamentos, com um excelente trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Dr.-Ing. Carlos Eiji Hirata Ventura, por me aceitar como orientanda, apesar da minha pouca idade e conhecimento mínimo na área. Agradeço por todas as conversas e conhecimentos passados e por sempre me responder independente do dia ou horário. Agradeço ao meu coorientador, Dr. Carlos Alberto Della Rovere pelo auxílio na pesquisa e pela contribuição com os assuntos técnicos.

Agradeço aos meus pais e à minha irmã por me ensinarem a sempre perseguir meus objetivos com trabalho, confiança, dedicação e acreditando na minha capacidade.

Agradeço aos técnicos, Leonildo e Djalma, por confeccionarem os componentes e corpos de prova necessários, e à Universidade Federal de São Carlos por me proporcionar o conhecimento e estrutura para a pesquisa.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”
(Theodore Roosevelt)

RESUMO

Corrosão é um fenômeno natural que causa redução da vida de componentes fabricados com materiais metálicos e não metálicos. A fim de ser evitado pelas indústrias, tal processo tem sido constantemente investigado, assim como técnicas de detecção e métodos anticorrosivos. Um tipo de corrosão de grande impacto é a corrosão sob tensão (CST), fenômeno que ocorre quando um metal (suscetível) é exposto a um meio agressivo e, ao mesmo tempo, é tensionado trativamente, situação bastante comum em dutos de petróleo. Tendo em vista a importância de se aumentar a vida de componentes por meio da redução dos efeitos da corrosão e sabendo que a maior parte das peças produzidas tem seu acabamento feito por processos que envolvem remoção de material e estes processos geram defeitos nas superfícies que podem levar o componente à falha prematura, esta pesquisa visa compreender o efeito da usinagem na vida de um aço SAE 1020 submetido à CST. Para isso, corpos de prova do material citado foram torneados com diferentes condições de avanço e expostos em um ambiente agressivo (solução de NaOH), a uma temperatura de 55°C, e submetidos simultaneamente a uma carga fixa de tração, conforme a norma ASTM G49-85. Além dos ensaios de CST, foram confeccionados corpos de prova para ensaios de corrosão por imersão na mesma solução, a fim de se determinar o efeito da tensão. Os resultados obtidos demonstraram que peças usinadas com maiores valores de avanço são mais degradadas, tanto em corrosão generalizada quanto em CST. No primeiro caso, verificou-se corrosão alveolar na superfície, enquanto no segundo, notou-se a formação de trincas.

Palavras-chave: Materiais metálicos. Acabamento. Torneamento. Corrosão alveolar.

ABSTRACT

Corrosion is a natural phenomenon that causes a reduction in the life of components made with metallic and non-metallic materials. This process remains in constant research in order to be avoided by industries through detection techniques and anticorrosive methods. One type of high impact corrosion is stress corrosion cracking (CST), a phenomenon that occurs when a (susceptible) metal is exposed to an aggressive environment and, at the same time, it is tensioned, a very common situation in oil pipelines. Considering the importance of increasing the life of components by reducing the effects of corrosion and knowing that most parts produced are finished by material removal processes and these processes generate defects on the surfaces that can lead the component to premature failure, this research aims to understand the effect of machining on the life of a SAE 1020 steel subjected to CST. For this purpose, specimens of the aforementioned material were turned under different feed rates and exposed to an aggressive environment (NaOH solution), at a temperature of 55°C, and subjected to a fixed tensile load, according to ASTM G49- 85. In addition to the CST tests, specimens were made for corrosion tests by immersion in the same solution, in order to determine the effect of stress. The results obtained showed that the parts machined with higher feed values were more degraded, both in generalized corrosion and in CST. In the first case, alveolar corrosion on the surface was verified, while in the second, crack formation was noted.

Keywords: *Metallic materials. Finishing. Turning. Alveolar Corrosion.*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Características de uma superfície | 25 |
| Figura 2. Principais parâmetros que afetam a rugosidade superficial | 26 |
| Figura 3. Perfil teórico de rugosidade de uma peça torneada | 27 |
| Figura 4. Tipos de corrosão | 31 |
| Figura 5. Pilares responsáveis pela CST e seus efeitos | 33 |
| Figura 6. Dispositivo para teste de CST utilizando (a) um sistema porca-fuso e (b) um mecanismo hidráulico | 41 |
| Figura 7. Dispositivo para teste de CST utilizando base e polias | 42 |
| Figura 8. (a) Esquema aplicador de força e (b) detalhe do sistema de roldanas | 43 |
| Figura 9. Dispositivo para teste de CST com aplicação de carga constante:(1) pesos; (2) braço de alavanca; (3) autoclave; (4) forno para aquecimento | 43 |
| Figura 10. Desenhos técnicos do dispositivo para ensaio de CST | 44 |
| Figura 11.(a) Mangueira cristal de PVC e (b) anéis de vedação | 45 |
| Figura 12. Montagem do corpo de prova com compartimento para armazenagem do líquido corrosivo no dispositivo | 46 |
| Figura 13. Estufa para ensaio de corrosão sob tensão | 46 |
| Figura 14. Amostra de aço SAE 1020 (transversal) com presença de inclusões | 48 |
| Figura 15. (a) Microscopia óptica e (b) eletrônica de varredura após ataque químico na amostra de aço SAE 1020 | 48 |
| Figura 16. Dimensões do corpo de prova para ensaio de CST, com base na norma NACE TM0177-2005 | 49 |
| Figura 17. Corpos de prova submetidos a corrosão com e sem aplicação de tensão, no interior da estufa | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 18. Peça fixada para realização de ensaio de tração | 51 |
| Figura 19. Imagens das superfícies do aço SAE 1020 geradas no processo de torneamento com diferentes valores de avanço | 53 |
| Figura 20. Rugosidade Rz após usinagem com diferentes valores de avanço | 54 |
| Figura 21. Rugosidade Rp após usinagem com diferentes valores de avanço | 54 |
| Figura 22. Rugosidade Rv após usinagem com diferentes valores de avanço | 55 |
| Figura 23. Parâmetro Rsk após usinagem com diferentes valores de avanço | 55 |
| Figura 24. Parâmetro Rku após usinagem com diferentes valores de avanço | 56 |
| Figura 25. Imagens da superfície dos corpos de prova submetidos a CST após usinagem com (a) $f = 0,1$ mm/rot, (b) $f = 0,4$ mm/rot e (c) $f = 0,7$ mm/rot | 57 |
| Figura 26. Imagens da superfície dos corpos de prova submetidos a corrosão sem aplicação de carga após usinagem com (a) $f = 0,1$ mm/rot, (b) $f = 0,4$ mm/rot e (c) $f = 0,7$ mm/rot | 58 |
| Figura 27. Comparação das superfícies de corpos de prova após serem submetidos a ensaios de corrosão (a) sem e (b) com aplicação de carga | 59 |
| Figura 28. Limite de resistência à tração de corpos de prova produzidos com diferentes valores de avanço e submetidos a ensaios de corrosão sem e com aplicação de carga | 60 |
| Figura 29. Tensão de ruptura de corpos de prova produzidos com diferentes valores de avanço e submetidos a ensaios de corrosão sem e com aplicação de carga | 61 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 19 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 21 |
| 2.1 | EFEITOS DA USINAGEM SOBRE A INTEGRIDADE SUPERFICIAL | 21 |
| 2.1.1 | Rugosidade de Peças Usinadas | 24 |
| 2.2 | CORROSÃO SOB TENSÃO | 29 |
| 3 | DISPOSITIVO PARA ENSAIOS DE CORROSÃO SOB TENSÃO | 41 |
| 4 | METODOLOGIA | 47 |
| 4.1 | MATERIAL | 47 |
| 4.2 | PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA | 49 |
| 4.3 | CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA | 49 |
| 4.4 | ENSAIOS DE CORROSÃO COM E SEM APLICAÇÃO DE TENSÃO | 50 |
| 4.5. | ENSAIOS DE TRAÇÃO | 51 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 53 |
| 5.1 | ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DOS CORPOS DE PROVA APÓS A USINAGEM | 53 |
| 5.2 | ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA APÓS O ENSAIO DE CST | 56 |
| 5.3 | ANÁLISE DOS CORPOS DE PROVA APÓS ENSAIO DE CORROSÃO EM APLICAÇÃO DE CARGA. | 58 |
| 5.4 | TESTES DE TRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA APÓS ENSAIOS DE CORROSÃO SEM APLICAÇÃO DE CARGA | 59 |
| | CONCLUSÃO | 63 |
| | REFERÊNCIAS | 65 |
| | APÊNDICE I - Desenhos técnicos das Bases 1 e 2 do dispositivo de ensaio de CST | 75 |

1. INTRODUÇÃO

O aço está presente na vida e no cotidiano das pessoas. Dentre as múltiplas funções e utilizações desse material estão as utilidades domésticas, o transporte, a construção civil, as embalagens e recipientes, as torres e linhas de transmissão elétrica, a agricultura, entre outros. O aço está presente nas máquinas e equipamentos responsáveis pelo avanço tecnológico, assim como nos segmentos industriais e educacionais. Segundo o Instituto Aço Brasil, foram produzidos no mundo $1806,1 \times 10^6$ toneladas de aço no ano de 2018, sendo 51,1% apenas na China. O Brasil produziu $35,4 \times 10^6$ toneladas (IABr, 2019).

Tanto em tempos remotos quanto hoje em dia, a utilização do aço é bastante abrangente, porém, assim como a maioria dos materiais siderúrgicos, está suscetível ao processo de corrosão, resultado de uma interação química ou eletroquímica em um determinado meio ao qual o material está exposto (ar ou umidade, por exemplo), com conseqüente liberação de energia. A corrosão vem sendo estudada para que seus efeitos sejam reduzidos, pois ela diminui a vida do componente e, por conseqüência, causa grandes perdas financeiras de tempo e de material.

Com o crescimento da utilização do aço e o efeito da corrosão no mesmo, investigações passaram a ser realizadas a fim de se minimizar os problemas dessa interação química, a partir da produção de aços mais resistentes e fluidos anticorrosivos mais eficazes. Assim, aços com a adição de elementos químicos, como o cromo, têm sido fabricados de modo a melhorar a vida da peça. Entretanto, o aço SAE 1020, utilizado neste trabalho, é um aço baixo carbono, sem adição de componentes, mas amplamente utilizado devido ao seu baixo custo, boa plasticidade e soldabilidade.

O efeito da corrosão neste e em outros materiais pode ser ampliado quando o componente, ao mesmo tempo em que está imerso em ambiente agressivo, se encontra submetido a carregamentos mecânicos trativos. Esse tipo de corrosão é conhecido como corrosão sob tensão (CST). Segundo Gentil (2005), a CST leva à fratura do material, quando este é tensionado em determinado ambiente, sob condições tais que nem a sollicitação mecânica nem a corrosão ambiente isoladas

conduziriam à fratura. Este cenário de degradação pode se agravar em razão dos defeitos gerados na superfície por processos de acabamento, como a usinagem. Estes defeitos podem ser, por exemplo, micro e macro trincas, que contribuem com a redução da vida da peça em serviço. Estes e outros defeitos podem ser determinados pela análise da integridade superficial. O principal parâmetro utilizado para a análise no presente trabalho é a rugosidade, sendo que as marcas deixadas na superfície podem atuar como concentradores de tensão, propiciando a nucleação e crescimento de trincas por corrosão, que levam o material à ruptura prematuramente.

Neste contexto, o presente trabalho investigará o efeito do processo de usinagem na superfície do aço SAE 1020 submetido a CST, tendo sido um dispositivo específico construído para a realização dos ensaios. Além dos experimentos de CST, outros testes foram executados nas mesmas condições, mas sem a aplicação da tensão, de maneira a se avaliar seu efeito. O material utilizado na pesquisa foi escolhido em razão das suas características, que lhe confere ampla aplicabilidade, muitas vezes em ambientes úmidos e aquecidos, submetidos a cargas mecânicas elevadas. Juntas soldadas desse aço também são suscetíveis a CST, em consequência das tensões térmicas geradas e do ambiente em que o componente é utilizado.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção, serão tratados os fundamentos teóricos utilizados na pesquisa, necessários para a compreensão do tema, como as características da usinagem e da superfície gerada por este processo, assim como sua influência na vida do componente fabricado. O tema corrosão sob tensão também será abordado com o objetivo de se adquirir maior compreensão do assunto.

2.1. Efeitos da usinagem sobre a integridade superficial

O processo de usinagem é aquele em que a peça, ao receber uma forma e/ou acabamento, produz cavaco (FERRARESI, 1970), que corresponde a uma porção de material retirada da peça pela ferramenta de corte e é caracterizado por possuir forma irregular. A usinagem é um dos processos de fabricação mais comuns e dentre os resultados alcançados estão o acabamento da superfície para obtenção de peças com melhor aspecto e geometria mais precisa, a fabricação em série e com custos menores, a geração de componentes de formas e tamanhos diversos (CHIAVERINI, 1986). Dentre os processos de usinagem, o mais comum corresponde ao torneamento, utilizado para a obtenção de peças de revolução através de uma ferramenta de ponta única.

Durante o processo de usinagem, variações de temperatura e força podem resultar em danos na superfície da peça, os quais podem comprometer seu desempenho em serviço (PEREIRA, HASSUI, MAGRI, 2014). Segundo Hioki (2006), a topografia da superfície usinada (rugosidade) tem sido aceita como critério que controla sua qualidade, tendo em vista sua relação direta com a resistência à fadiga, capacidade de suporte, coeficiente de transmissão de calor e resistência ao desgaste. De acordo com Bhatkar et al. (2017), a integridade superficial, definida pelos aspectos de rugosidade, microestrutura e tensão residual de uma peça, corresponde a uma de suas principais características. As tensões residuais, dependendo de sua natureza, podem afetar significativamente a vida em fadiga, em corrosão e em corrosão sob tensão, com possíveis consequências catastróficas (VARELA, RAKURTY, BALAJI, 2014). Segundo Paulo (2008), em processos de usinagem podem ainda surgir macro ou micro trincas, sendo estas as mais prejudiciais em relação à fadiga e à corrosão sob tensão.

De acordo com Farias (2009), o termo integridade superficial pode ser definido pela relação entre processos, aspectos da superfície e o desempenho do material, visando descrever o estado superficial em função do desempenho da peça em serviço. Na usinagem, o resultado do processo envolve deformação plástica, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, tensões residuais e, em alguns casos, reações químicas, que impactam na qualidade da superfície usinada. Esses fatores podem representar efeitos diferentes na nova superfície, logo, o termo integridade superficial é utilizado para descrever a qualidade dessa região, englobando a maioria das alterações sofridas por ela (MACHADO et al., 2009). Neste contexto, diversos autores têm investigado o efeito do processo de usinagem sobre as características da peça e seu desempenho.

O efeito dos parâmetros de corte sobre os materiais vem sendo estudado para compreender o seu comportamento em serviço, sobre a fadiga e as falhas. Para Lopes (2006), o parâmetro de corte de maior influência sobre a fadiga do aço AISI 4140 é o avanço, cujo aumento causa maior rugosidade e reduz a vida da peça. Acredita-se que uma redução da rugosidade é possível com maiores valores de velocidade de corte, provocando aumento na resistência à fadiga. Gravalos (2008) investigou o efeito da operação de torneamento na integridade superficial de um aço superaustenítico ASTM A744 GrCN3MN. Focando em operações de acabamento, variando o ângulo de saída da ferramenta, a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de usinagem. Além disso, testes de corrosão por pite em uma solução de cloreto de ferro após a usinagem também foram executados. Inicialmente, ele constatou que o avanço teve influência na rugosidade apenas para determinadas condições (ângulo de saída de 10° , velocidade de corte de 120 m/min e profundidade de usinagem de 0,4 mm), sendo irrelevante em outros casos. Com o aumento da velocidade de corte, as amostras apresentaram diminuição na tensão residual e na dureza superficial. Ao reduzir o valor de avanço a superfície apresentou um menor valor de rugosidade e dureza superficial. O aumento do ângulo de saída gerou uma redução na dureza da superfície. Após os testes de corrosão, notou-se que a redução da rugosidade contribuiu para a redução de formação de pites.

Javidi, Rieger e Eichlseder (2008) descreveram como, no torneamento, o avanço e o raio de ponta da ferramenta afetam a integridade da superfície do aço

34CrNiMo6 e sua vida em fadiga. Verificou-se aumento da rugosidade com a redução do raio de ponta e tensões residuais mais compressivas com a aplicação de maiores avanços e menores raios de ponta. Os resultados mostraram ainda que o efeito da tensão residual na vida em fadiga é mais pronunciado do que o efeito da rugosidade, sendo que tensões residuais mais compressivas causaram aumento da vida em fadiga. Rosario (2011) estudou a integridade superficial do aço AISI H13 após o processo de usinagem e seu efeito em testes de fadiga. Segundo o autor, avaliar a topografia é o primeiro método para conhecer a integridade superficial, porém, é um processo limitado quando mudanças na superfície da amostra são geradas. De modo geral, verificou-se que a redução da rugosidade das superfícies usinadas favorece o desempenho da peça.

Jesus (2013) também analisou os efeitos do processo de torneamento na temperatura e na integridade superficial, desta vez sobre o aço inoxidável superduplex UNS32760, variando o ângulo de posição, a profundidade de usinagem, o avanço e a velocidade de corte. Ele verificou um aumento da temperatura com a aplicação de menores valores de avanço e menor rugosidade quando utilizado um ângulo de posição de 75°.

Varela, Rakurty e Balaji (2014) realizaram um estudo experimental para entender o papel da geometria da ferramenta de corte e das condições de corte na integridade superficial (rugosidade e tensões residuais) de um aço 300M. Comparativamente às ferramentas preparadas com raio de aresta, baixa rugosidade e tensão residual de tração foram obtidas pela ferramenta apenas chanfrada. Já ferramentas com chanfro e raio de aresta geraram tensões residuais mais compressivas na subsuperfície. A influência das condições de usinagem sobre a integridade superficial também foi avaliada por Pereira, Hassui e Magri (2014), sobre o aço 15-5PH durante o processo de fresamento discordante, utilizando uma fresa de facear com pastilhas redondas, geometrias neutra e positiva, novas e em condições de final de vida. Após os testes, verificou-se que as pastilhas em final de vida geraram maior rugosidade. O mesmo aço foi investigado por Valiorgue et al. (2017), identificando a influência dos parâmetros de integridade superficial na vida em fadiga do aço 15-5PH preparado por torneamento, polimento e retificação. Constatou-se que a influência de uma camada subsuperficial compressiva profunda é mais importante do que a da rugosidade superficial ou da microestrutura. Tensões

residuais compressivas na superfície associadas a uma rugosidade superficial muito baixa aumentam a resistência à fadiga. No entanto, uma rugosidade mais alta tem um efeito não negligenciável na resistência à fadiga, mesmo com a ocorrência de grandes tensões residuais compressivas.

As tensões residuais estão sempre presentes na usinagem, compressiva ou tratativa, e, por isso, é encontrada em abundância na literatura. Bhatkar et al. (2017) analisaram as tensões residuais geradas durante a usinagem do aço AISI 1020, com variação do ângulo de inclinação, da profundidade de usinagem e da velocidade de corte, e verificaram que as tensões residuais eram tratativas na superfície e gradualmente deslocadas para o valor de compressão abaixo da superfície. Magalhães (2017) avaliou as tensões residuais geradas no processo de torneamento de um aço inoxidável duplex UNS 31803, com diferentes velocidades de corte e demonstrou a predominância do efeito térmico no processo, que levou à indução de tensões residuais de tração. Maiores valores desta tensão foram obtidos para a maior velocidade de corte utilizada. Nesta mesma situação, foram também observados menores valores de rugosidade e dureza.

Zurita-Hurtado, Graci-Tiralongo e Capece-Aguirre (2017) realizaram experimentos para estudar a influência da integridade superficial, avaliada por meio da microdureza Vickers e da rugosidade média, nas propriedades de torção de um aço recozido e torneado com ferramentas de metal duro. Maior resistência ao cisalhamento foi obtida com o aumento da dureza superficial, provocado pelo encruamento causado pelo processo de usinagem. O aumento da rugosidade, no entanto, devido à maior concentração de tensão na superfície, gerou efeito oposto.

Com isso, nota-se a importância de um correto planejamento do processo de usinagem para a obtenção de uma integridade superficial que leve a uma maior vida da peça em serviço. Demonstrou-se que, além da tensão residual e dureza superficial, a rugosidade corresponde também a um fator muito relevante na vida de um componente e pode ser usado como indicador para a previsão de seu desempenho. Assim, este item será tratado de forma mais detalhada a seguir.

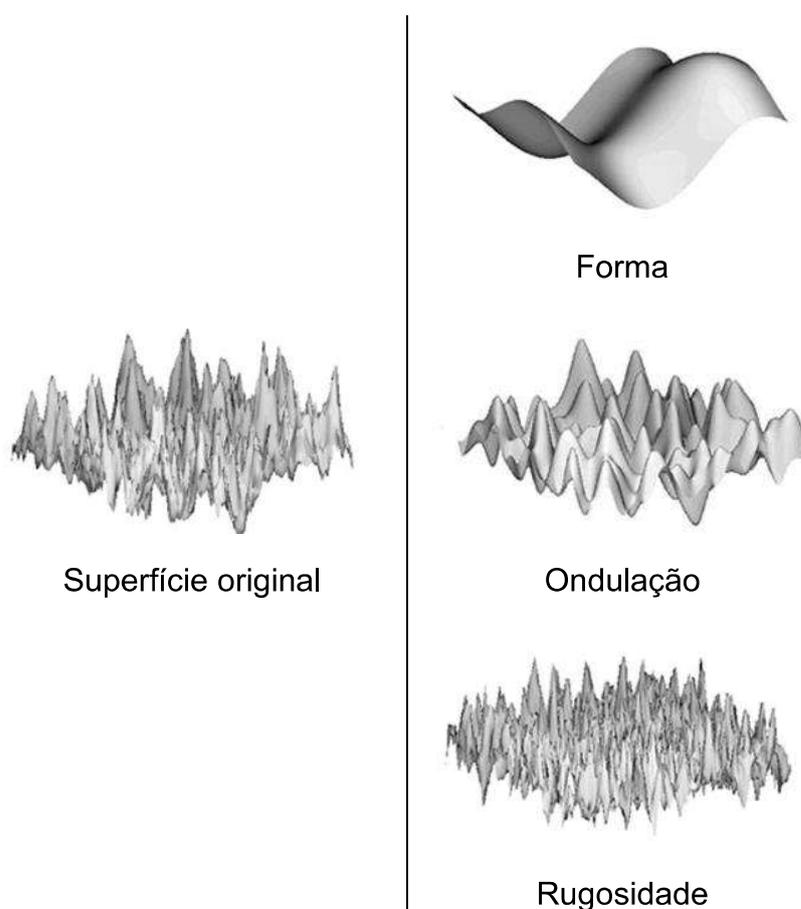
2.1.1. Rugosidade de peças usinadas

Todas as superfícies possuem algum grau de rugosidade visível ou em nível

atômico e, em peças acabadas, o processo de usinagem pode ser um dos responsáveis por seu surgimento. O correto funcionamento do componente fabricado depende criticamente de seu grau de rugosidade, o que torna sua medição vital para o controle de qualidade da peça usinada (FOROUZBAKHS, GATABI, GATABI, 2009).

Para Josso, Burton e Lalor (2001), as características que compõem uma superfície são mostradas na Figura 1. Os defeitos de forma são os erros macrogeométricos que comprometem a superfície usinada. As ondulações são irregularidades geométricas na superfície, sendo o espaçamento entre elas maior que o da rugosidade. A rugosidade pode ser interpretada pela presença de irregularidades finas em uma superfície, ou seja, a presença de picos e vales no acabamento de uma peça usinada (MACHADO et al., 2009).

Figura 1. Características de uma superfície



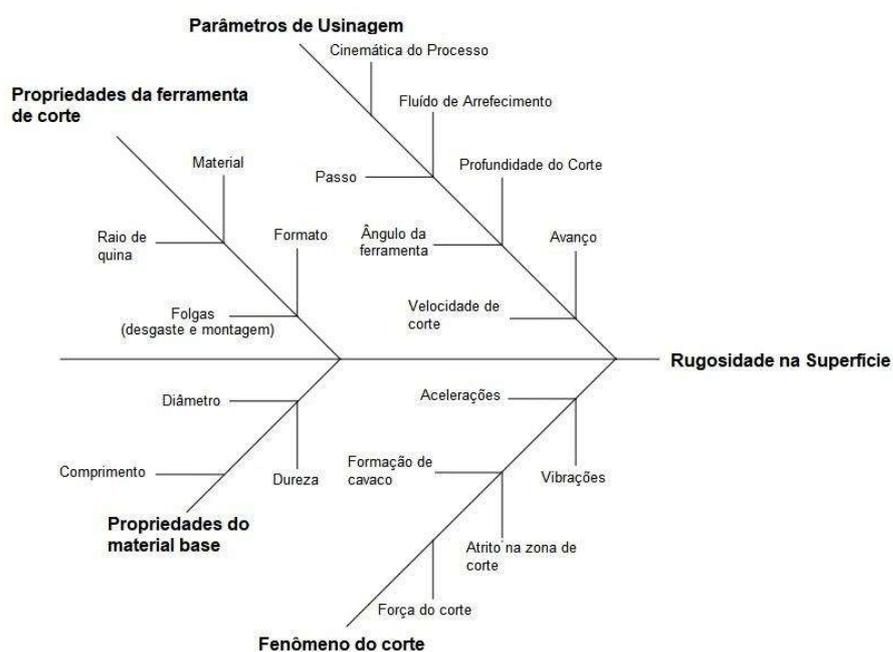
Fonte: Josso, Borton, Lalor (2001).

A rugosidade pode ser causada por diferentes fatores durante o corte, como a

forma da ferramenta e seu desgaste ou a vibração do equipamento. Tal característica superficial é um grande dilema nos processos de usinagem, devido à sua formação ser inevitável, pois sua principal causa é a remoção de cavaco, que ocorre pela movimentação da ferramenta (marcas de avanço) e pode ser influenciada pelo desgaste, aresta postiça de corte, entre outros (MACHADO et al., 2009). Outro fator causador de irregularidades superficiais na peça corresponde ao fluxo lateral de cavaco, que causa uma espécie de rebarba nos sulcos formados pela ferramenta (MACHADO e SILVA, 2004).

A Figura 2, retirada do trabalho de Benardos e Vosniakos (2003), apresenta os principais fatores de influência da usinagem sobre a rugosidade, os quais estão agrupados em quatro categorias: propriedades da ferramenta de corte, propriedades do material base, fenômenos de corte e parâmetros de usinagem.

Figura 2. Principais parâmetros que afetam a rugosidade superficial

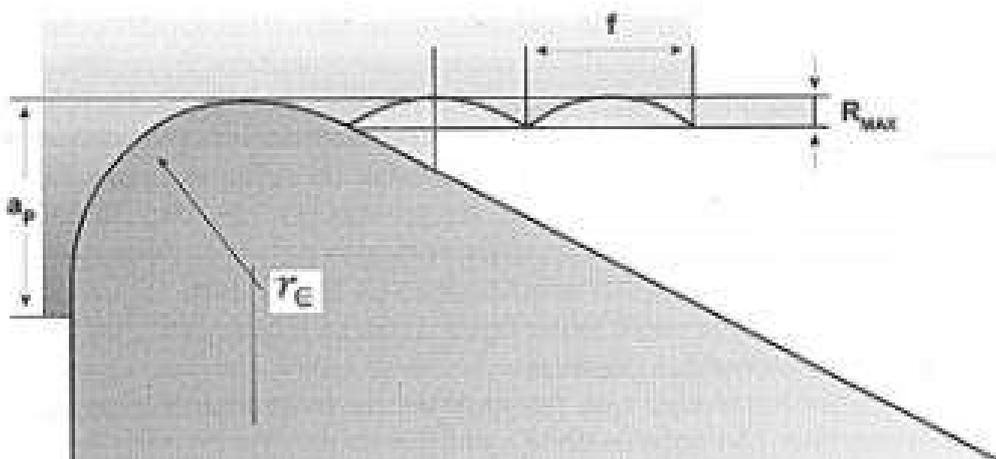


Fonte: adaptado de Benardos e Vosniakos (2003).

Para Diniz, Marcondes e Copini (2014), o raio de ponta da ferramenta é um dos fatores que mais influenciam a rugosidade da peça. Ao se aumentar este raio, torna-se a ponta da ferramenta mais resistente e se reduz a rugosidade geométrica, porém, devido ao atrito causado pela maior área de contato com a peça, a vibração também aumenta. No processo de torneamento, o acabamento da superfície

depende principalmente do raio de ponta e do avanço, sendo que tal relação contribui geometricamente para a rugosidade, conforme mostra a Figura 3, onde R_{max} corresponde à rugosidade máxima teórica, f ao avanço, a_p à profundidade de usinagem e r_ϵ ao raio de ponta da ferramenta.

Figura 3. Perfil teórico de rugosidade de uma peça torneada



Fonte: Diniz, Marcondes e Copini (2014).

Segundo Ratnam (2017), os fatores que afetam a rugosidade da superfície no processo de torneamento podem ser divididos nas seguintes categorias: (1) condições de usinagem, como torneamento a seco, torneamento com certo tipo de fluido de corte, método de aplicação do fluido de corte, vibração e rigidez da máquina-ferramenta; (2) parâmetros da ferramenta, como raio de ponta, ângulo de ponta, preparação de aresta, ângulos de saída e inclinação, material da ferramenta e revestimento; (3) parâmetros de usinagem, como avanço, velocidade de corte e profundidade de usinagem; (4) propriedades do material da peça, como dureza, microestrutura, tamanho de grão, composição e defeitos.

Dentre os diversos parâmetros de rugosidade utilizados para caracterização de superfícies usinadas, serão aplicados neste trabalho: a rugosidade máxima média R_z , que fornece um valor médio das distâncias entre pico e vale em determinado trecho do perfil; a altura máxima de pico R_p ; a profundidade máxima de vale R_v ; a assimetria e o achatamento do perfil R_{sk} e R_{ku} , que caracterizam a predominância e a forma de picos e vales.

Segundo Guedes (2014), as superfícies com maior rugosidade estão expostas a um desgaste mais intenso do que aquelas com melhor acabamento. Além disso, em superfícies com melhor acabamento há uma menor vulnerabilidade à corrosão, já que o fluido não fica retido nos defeitos microgeométricos da superfície. Hagen et al. (2019) avaliaram o efeito da rugosidade superficial na resistência à corrosão de um aço S355J2G3. A combinação de diferentes processos de usinagem (fresamento e torneamento) com diferentes avanços e profundidades de usinagem resultou em superfícies com picos de tamanho e morfologia variados – picos retangulares, triangulares e inclinados. Maiores valores de avanço causaram maior rugosidade, mas a forma do perfil se mostrou mais significativa do que o valor da rugosidade em si.

Diversas outras pesquisas foram conduzidas a fim de se compreender o comportamento do processo de usinagem e sua influência sobre a rugosidade. Davim, Gaitonde e Karnik (2008) investigaram o efeito dos parâmetros de corte na rugosidade superficial do aço 9SMnPb28K e demonstraram que a rugosidade é altamente sensível à velocidade de corte e à taxa de avanço. Por outro lado, a profundidade de usinagem tem o menor efeito. A rugosidade foi menor com o aumento da velocidade de corte e com a redução do avanço. Já Nunes (2011) analisou a rugosidade resultante do processo de torneamento do aço 38MnSiVS5 com variação da velocidade de corte, do avanço, do raio de ponta da ferramenta e da aplicação de fluido de corte (seco e mínima quantidade de fluido, MQF). Após os ensaios, constatou-se que o avanço foi o parâmetro que apresentou maior influência na rugosidade, seguido pelo raio de ponta e a velocidade de corte. A rugosidade média foi maior no torneamento a seco em comparação àquele com uso de MQF.

Marques et al. (2014) analisaram a rugosidade de superfície dos aços inoxidáveis ASTM F138 e AISI 316L sob diversas condições de usinagem sem aplicação de fluido de corte. O maior valor de profundidade de usinagem apresentou menores valores de rugosidade, o que foi explicado pela ausência de folga da máquina, que aumenta a rigidez do processo. Qehaja et al. (2015) desenvolveram um modelo matemático com base no método da superfície de resposta para investigar a influência do avanço, do raio da ponta e do tempo de corte sobre a rugosidade produzida em processo de torneamento a seco do aço C62D. Os resultados revelaram que o avanço parece influenciar a rugosidade da superfície mais significativamente do que o raio de ponta e o tempo de corte.

Awopetu, Farayibi e Olorunfemi (2017) investigaram o efeito dos parâmetros de corte na rugosidade superficial do aço AISI 1020 torneado a seco. Uma baixa rugosidade pôde ser obtida por elevadas velocidades de corte, baixas profundidades de usinagem e baixos valores de avanço. O melhor valor de Ra medido foi de $1,37 \pm 0,35 \mu\text{m}$, obtido com velocidade de corte de 150 m/min, avanço de 0,272 mm/rev e profundidade de corte de 0,6 mm.

Diante de pesquisas na literatura percebe-se que o parâmetro com maior influência sobre a rugosidade é o avanço, como mostra Fonseca et al. (2018) ao analisar o comportamento da rugosidade do aço SAE 1050 torneado com diferentes geometrias de inserto e ambientes (fluido abundante e MQF). Com os resultados, foi possível verificar um aumento significativo da rugosidade com o um aumento do avanço. Venkatesh e Sivaprakasam (2019) analisaram o efeito da velocidade de corte, profundidade de usinagem e avanço na rugosidade superficial após o torneamento de componentes cilíndricos da liga de aço AISI 3415 e também notaram que o avanço possui maior influência sobre a rugosidade média da superfície.

Com base no que foi exposto, verifica-se que a maioria dos trabalhos tem como foco investigar a influência dos parâmetros de usinagem, como velocidade de corte, avanço, profundidade de usinagem e ambiente (aplicação ou não de fluido por diferentes métodos), sobre a rugosidade média obtida e alguns tratam ainda do efeito da rugosidade sobre a vida em fadiga de componentes submetidos a carregamentos cíclicos. Em busca de novos resultados, o presente trabalho pretende analisar o efeito da topografia de peças torneadas sobre sua vida em corrosão sob tensão. Assim, este assunto será discutido em seguida.

2.2. Corrosão sob tensão (CST)

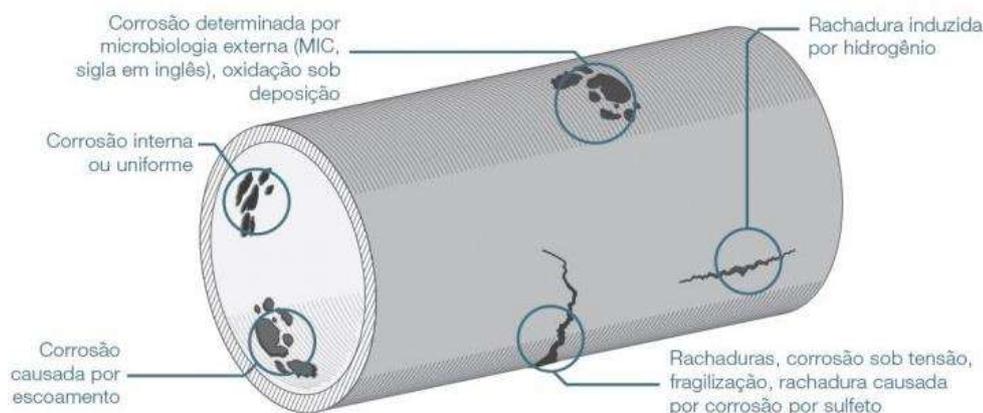
Corrosão é a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, podendo ou não ter influência de esforços mecânicos. Essa deterioração, causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional, representa alterações indesejadas que prejudicam o material, como desgaste, variação química ou modificações na estrutura do componente, tornando-o inadequado para o uso (GENTIL, 2005).

Segundo a Associação Brasileira de Corrosão (ABRACO), dependendo do tipo do meio corrosivo sobre o material, os processos podem ser classificados em dois grupos, que abrangem todos os casos de deterioração por corrosão: corrosão eletroquímica e corrosão química. O grupo de processos de corrosão eletroquímica é mais recorrente na natureza e se caracteriza por ocorrer na presença de água em estado líquido, com temperatura ambiente abaixo do ponto de orvalho da água e circulação de elétrons na superfície metálica. Os metais reagem com substâncias não metálicas presentes no meio, como oxigênio (O_2), enxofre (S), ácido sulfúrico (H_2S), dióxido de carbono (CO_2), entre outros. Já o grupo de processos de corrosão química também pode ser encontrado no dia-a-dia e em condições normais, porém são mais frequentes em ambientes industriais. Ele é também conhecido por corrosão ou oxidação em altas temperaturas, pois esta operação envolve temperaturas elevadas, caracterizando-se pela ausência de água na fase líquida e interação direta entre metal e o meio corrosivo (ABRACO, 2019).

Santos (2016) estudou a corrosão do aço carbono AISI 1020 submetido a uma solução de cloreto de sódio (NaCl) com 0,10 e 0,25 molL⁻¹ a temperaturas de 25°C e 45°C. A deterioração foi medida pelo potencial de circuito aberto (E_{ca}) e curvas de polarização. De acordo com os resultados obtidos, constatou-se que a concentração e a temperatura tiveram grande influência no processo corrosivo.

A corrosão pode se apresentar de diversas formas, algumas delas mostradas na Figura 4, como a corrosão microbiológica (a deposição de um biofilme na superfície do material provoca o surgimento de células de aeração diferencial, causando a degradação do metal), a corrosão que ocorre no interior do tubo (em contato com o fluido, de forma uniforme, ou onde ocorre o escoamento do fluido), a corrosão por fragilização por hidrogênio (rachaduras na superfície que entram em contato com o hidrogênio). A Figura 4 ilustra também um tipo de corrosão que leva o material à fratura com a presença de rachaduras e trincas, causadas por CST, fragilização ou corrosão por sulfeto.

Figura 4. Tipos de corrosão



Fonte: Olympus (2020).

Diante dos problemas causados pela corrosão, pesquisadores como Minatto e Ferreira (2015) caracterizaram a taxa de corrosão do aço API X65 por CO_2 em solução de NaCl a 1% submetido ao teste por 24h a uma temperatura de 34°C . Percebeu-se a influência da rugosidade superficial na formação de uma camada protetora de carbonato de ferro e constatou-se que a maior perda de massa ocorreu nas amostras com maior rugosidade. Chi, Yi e Li (2019) investigaram a corrosão eletroquímica e a corrosão por pites de amostras da liga Ti-6Al-4V com diferentes rugosidades em solução de HCl a 35°C . Tanto a taxa de corrosão quanto a sensibilidade a pites da amostra aumentaram com o aumento da rugosidade. Além disso, os autores observaram que o efeito da rugosidade na corrosão pode ser caracterizado pela relação de aspecto da morfologia do pico e do vale na superfície. No ano seguinte, Liu et al. (2020) avaliaram a relação entre a integridade superficial de peças fresadas e polidas e sua resistência à corrosão no caso do aço inoxidável 17-4PH. Comparadas às amostras polidas, as amostras fresadas podem apresentar melhor resistência à corrosão quando os parâmetros de corte são otimizados. Neste caso, tanto a velocidade de corte quanto o avanço podem afetar a resistência à corrosão da superfície usinada. A aparência áspera da superfície pode prejudicar a resistência à corrosão.

CST é um processo, segundo Mariano (1997), resultante da interação de um componente metálico com um meio corrosivo, que leva à fratura precoce do material devido a um determinado nível de tensão trativa aplicada ou existente. A fratura por CST é um dano dominante de um componente particular ou na estrutura do

material, devendo ser considerado em projetos de construção industrial (ELSARITI, HAFTIRMAN, 2012). A iniciação de fissuras às vezes não é necessária, uma vez que as estruturas e componentes podem conter defeitos semelhantes a fissuras preexistentes. Segundo Raja e Shoji (2011), as soldas são especialmente propensas a tais defeitos. A usinagem também pode produzir descontinuidades, tais como sulcos profundos, quebras de inclusões, alterações microestruturais, dentre outras.

Para Campos (2003), existem alguns fatores que influenciam a CST, sendo eles:

-Tensões residuais e aplicadas: a CST pode ocorrer quando o material é submetido a tensões trativas residuais ou aplicadas. As tensões residuais são geralmente decorrentes de operações de soldagem e deformações a frio, como estampagem e dobramento. Por outro lado, as tensões aplicadas são provenientes das condições operacionais como, por exemplo, pressurização de equipamentos;

-Estado da superfície: rugosidade, ondulação, macro irregularidades, estrutura da camada superficial, entre outros fatores que atuam no comportamento do material diante da CST;

-Composição da estrutura cristalina: suscetibilidade à CST de um material em um meio agressivo;

-Natureza do meio: materiais que sofrem corrosão generalizada em um determinado meio não sofrerão CST;

-Temperatura e concentração dos agentes: aceleram o processo de CST.

Campos (2003) observou que a CST só ocorre se três principais fatores estiverem presentes simultaneamente no processo: material suscetível à corrosão, tensão de tração e ambiente corrosivo, conforme apresentado na Figura 5. No entanto, há a necessidade de especificidade dos pares metal/meio, como, por exemplo, alumínio em meios de cloretos, fluoretos e alcalinos; liga de cobre em ambientes amoniacais; aço carbono em meios alcalinos; e aços inoxidáveis em meio de cloretos alcalinos e sulfeto de hidrogênio. Tais interações aceleram o processo corrosivo normal e fazem com que os materiais sofram maior perda de

massa devido aos processos eletroquímicos de corrosão, porém, por si só, não geram o desenvolvimento de CST.

Figura 5. Pilares responsáveis pela CST e seus efeitos



Fonte: Adaptação de Zhou (2016).

O fenômeno de CST geralmente não produz uma perda de massa substancial e/ou alterações significativas no aspecto superficial, como a ferrugem, e o material, muitas vezes, mantém sua aparência metálica brilhante. Já a formação de trincas devido a cargas mecânicas ocorre através de fendas estreitas, sem deformação plástica macroscópica no local. Estas podem se propagar ao longo dos contornos de grão (i.e., morfologia intergranular), pelo interior dos grãos do material (i.e., morfologia transgranular) ou de modo misto. Quando os materiais são trabalhados a frio, bem como quando têm alta resistência, a iniciação e propagação de trincas são mais rápidas (RAJA e SHOJI, 2011). Outras possibilidades para iniciação de trincas podem ser as descontinuidades na superfície do material, assim como corrosão por pite e intragranular, pois são agentes que influenciam a nucleação e o crescimento do problema (MARIANO, 1997). Devido à alta taxa de propagação, falhas repentinas causadas por trincas por CST geralmente acontecem sem aviso, ou seja, de modo catastrófico (ZHOU, 2016).

De acordo com Campos (2003), há três estágios para a ocorrência de CST: indução, nucleação da trinca e propagação da trinca até a fratura. O primeiro período representa o tempo ao qual o material é exposto ao meio agressivo antes

da nucleação da primeira trinca, a qual cresce de forma lenta. Em seguida, inicia-se o período de propagação, que é finalizado quando a intensidade da tensão leva o material à fratura.

Dentre as diversas pesquisas já realizadas para investigar o processo de CST, está a de Gomes e Müller (2000), que avaliam a suscetibilidade à CST de um aço X65 revestido em Zn e Al em meio de água do mar sintética, por 24 h, com baixa taxa de deformação ($1,57 \times 10^{-5}$ mm/s), sendo posteriormente tracionado até a ruptura. Ambos os revestimentos apresentaram fragilização pela ruptura prematura, favorecida pela CST. O revestimento de Al se apresentou levemente mais eficiente em comparação ao de Zn.

Rhouma et al. (2001) submeteram amostras de aço inoxidável austenítico 316L a uma série de tratamentos, como jateamento e escovação, e analisaram sua dureza, estado de tensão residual e resistência à CST, a qual foi avaliada em um meio de 40% de cloreto de magnésio ($MgCl_2$), a $140^\circ C$, durante 48h. O endurecimento por deformação plástica (encruamento) e as tensões residuais de compressão geradas por esses tratamentos de superfície são a origem da melhoria da integridade da superfície em relação à resistência à CST.

Em seu trabalho, Filho, Mansur e Rabello (2007) trataram do comportamento do aço SAE 8620 em corrosão-fadiga em uma solução contendo 3,5% de NaCl. Notou-se que, ao se diminuir a frequência de carregamento cíclico, aumentou a taxa de corrosão por pite e a nucleação de trincas por fadiga. Em menor frequência, o material teve mais tempo em contato com a solução, promovendo maiores danos na amostra. Uma vez formado o poço, ele pode atuar como um gerador de tensão e, assim, a nucleação da fissura fica localizada em sua raiz, onde o ambiente é notadamente mais agressivo.

Kentish (2007) investigou o efeito da rugosidade da superfície na resistência à ruptura por CST intergranular de gasodutos X70 usando testes com taxa de deformação lenta em solução de carbonato/bicarbonato a $75^\circ C$. Os testes revelaram que os intervalos de tempo até a falha diminuíram com o aumento da rugosidade da superfície, indicando uma resistência reduzida de formação de trincas CST, a qual pode estar associada ao efeito da concentração de tensão na superfície.

A avaliação do comportamento das propriedades mecânicas e a resistência à corrosão-fadiga de tubos de aço API 5L X65 revestidos internamente através de soldagem com aço inoxidável AISI 308L Si foi executada por Antunes (2008). Para os ensaios de corrosão-fadiga, o meio corrosivo utilizado foi a água do mar. Os testes foram conduzidos em um equipamento desenvolvido pelo autor, que consiste de um sistema de ensaio de dobramento, com uma matriz e um punção, utilizado submerso no meio agressivo. Constatou-se que a rugosidade foi um fator relevante para a diminuição da vida do componente quando em contato com o meio agressivo, devido às marcas na superfície atuarem como concentradores de tensão.

Gosh e Kain (2010) investigaram o efeito da deformação plástica induzida por laminação a frio ou por usinagem do aço inoxidável austenítico 304L sobre sua suscetibilidade à formação de trincas em CST, sendo os testes realizados em solução 1M de ácido clorídrico (HCl), à temperatura ambiente. A amostra usinada contém uma camada altamente suscetível ao início da trinca em comparação ao material trabalhado a frio, levando menos tempo para a ocorrência da falha.

Silva (2012a) avaliou a suscetibilidade à CST do aço inoxidável superduplex UNS S32750 em meios contendo cloretos (Cl^-), CO_2 e H_2S , a uma temperatura de 80°C , sendo ensaiado em tração com baixa taxa de deformação. O autor verificou a presença de dois mecanismos de CST por sulfetos: a corrosão localizada seguida de formação de trincas e a fragilização por hidrogênio.

Em seu estudo, Silva (2012b) buscou determinar a suscetibilidade à CST do aço AISI 1020 em meio de etanol e impurezas (água e cloretos). Os ensaios foram conduzidos em uma máquina de baixa taxa de deformação, tracionando o corpo de prova lentamente até o rompimento. Os corpos de prova foram tracionados até a ruptura, carregados sob tensões entre 563 e 640 MPa, durante 48h. Maior quantidade de trincas foi encontrada nas peças imersas em etanol, água e cloretos, em comparação aos corpos de prova ensaiados em água e etanol.

Coelho (2013) avaliou a suscetibilidade de estruturas de aço carbono à CST utilizando ensaios de baixa taxa de deformação, com duração de cerca de 30 dias, em diferentes ambientes: meio aquoso contendo NaCl e diferentes pressões de H_2S . Os resultados apresentaram aumento da suscetibilidade do material com o aumento da concentração de H_2S , que ocasionou queda do limite de resistência à

tração, do alongamento e do tempo até a ruptura, quando comparado aos ensaios realizados no ar.

Vatavuk e Faldini (2014) realizaram uma discussão a respeito da CST em aços inoxidáveis austeníticos, atentando-se à trajetória da trinca e seus aspectos topográficos. Os ensaios foram conduzidos em aço AISI 304L, em meio de cloreto e a temperaturas entre 100 e 110°C. Os autores observaram o surgimento de trincas entre 4 e 86h de ensaio, além de duas regiões distintas na fratura: uma com fluxo plástico (i.e., presença de alvéolos ou *dimples*) e outra mais lisa (i.e., presença de rios de clivagem), com ataque superficial devido à atuação do meio corrosivo.

Scatgno et al. (2016) investigaram o efeito do percentual de trabalho a frio na formação de trincas por CST induzida por MgCl₂ no aço inoxidável 304L. Os corpos de prova foram submetidos a uma tensão de 60 MPa, a 75°C, durante 500h. A CST foi mais agressiva na faixa de 0,5% a 5% de trabalho a frio, havendo uma forte diminuição na densidade de trincas medidas em 10%.

Zhang et al. (2016) avaliaram o efeito da tensão residual superficial do aço austenítico 316 fresado com ferramenta de metal duro e diferentes parâmetros de corte na formação de trincas durante CST em uma solução de MgCl₂ a 155°C. Verificou-se que maiores tensões residuais resultaram em uma maior taxa de propagação de trincas e maior densidade de microtrincas.

O efeito da usinagem no crescimento de trincas por CST em um aço duplex em solução de MgCl₂ foi estudado por Rajaguru e Arunachalan (2017). A tensão residual e os defeitos de superfície, como marcas de avanço e sulcos gerados após a usinagem, desempenharam um papel significativo na direção e orientação dessas trincas. O esforço de tração biaxial na superfície promoveu ramificações sucessivas das trincas, levando ao aumento de sua densidade.

Chang, Burke e Scenini (2018) também investigaram a iniciação de trincas por CST de um aço inoxidável austenítico 316L, usinado com diferentes parâmetros de corte, em ambiente simulando um reator de água. As amostras usinadas com parâmetros mais agressivos foram as mais suscetíveis ao início da CST, enquanto aquelas preparadas com parâmetros de acabamento apresentaram os melhores resultados. A iniciação da CST foi associada a marcas de usinagem em todos os

ensaios e a tensão residual induzida não pareceu desempenhar um papel importante na iniciação de trincas.

Ding et al. (2018) avaliaram a suscetibilidade à formação de trincas por CST em solução de NaCl a 3,5% de três microestruturas de uma liga de níquel-alumínio e bronze obtidas de formas diferentes (recozimento, normalização e envelhecimento), usando testes de tração com baixas taxas de deformação e variação da tensão entre 552 e 884 MPa, a uma temperatura de 30°C, durante 20 dias. Constatou-se que a suscetibilidade à CST de todas as ligas aumenta significativamente com a diminuição da taxa de deformação.

Panahi, Eslami e Golozar (2018) estudaram o início da corrosão e de trincas por CST em aços inoxidáveis austeníticos 304 e 316 em solução ativada de metil-dietanolamina (aMDEA) com diferentes concentrações e temperaturas por um período de 60 dias. O aumento da concentração da solução de aMDEA de 30 para 50% em peso teve um efeito menor na corrosão e no início das trincas de CST em relação ao aumento da temperatura de 25 para 70°C. O aço inoxidável 304 foi mais suscetível ao início da trinca em comparação ao 316, uma vez que trincas mais longas foram formadas.

No ano seguinte Kumar e Acharyya (2019) analisaram o efeito do processo de acabamento na resistência à formação de trincas por CST do aço inoxidável AISI 316. A suscetibilidade à corrosão sob tensão foi avaliada em uma solução de $MgCl_2$ a 155°C, durante 3h. Diante das operações de fresamento, torneamento e retificação, as amostras se mostraram suscetíveis à CST, enquanto após o polimento, não houve presença de trincas, resultado relacionado à redução da rugosidade e da deformação plástica na superfície. Já Chu et al. (2019) analisaram o crescimento de trincas por CST em aços soldados NiCrMoV utilizados em turbinas nucleares a vapor, em meio a água pura com 8 ppm de oxigênio, a 180°C, e tensões entre 34,5 e 37,5 MPa. Notou-se que a taxa de crescimento de trincas foi superior na zona afetada pelo calor.

Zeng e Li (2019) analisaram a influência de dióxido de enxofre (SO_2) na corrosão e na suscetibilidade à CST em linhas de transporte de CO_2 fabricadas com os aços API X65, X70 e X80 a uma temperatura de 45° e tensão de 10 MPa, durante 120h. Todos os resultados indicaram que a presença de SO_2 nos fluxos

transportados pode induzir graves danos relacionados à corrosão em tubulações convencionais.

Wang et al. (2019) investigaram a causa do rompimento de tubos de água quente feitos de aço inoxidável austenítico 304 e 2205 DSS em ambiente agressivo contendo íons cúpricos (Cu^{2+}), dentro do qual as amostras foram submetidas a uma carga de flexão a 80% da tensão de escoamento em temperaturas entre 450 e 850°C, por 30 dias. Em altas temperaturas, o aço inoxidável 304 sofreu corrosão por pites e não pôde manter a resistência, enquanto no 2205 DSS a corrosão por pites pôde ser contida e a trinca, evitada.

Xu et al. (2019) avaliaram o comportamento de trincas por CST de aços inoxidáveis austeníticos CF8A em um ambiente simulando um reator de água pressurizada durante ensaio de tração de deformação lenta a temperaturas de 25°C e 290°C, sob uma carga controlada de 200 N. Numerosas trincas por CST transgranular foram identificadas na superfície do material. As amostras testadas com menores taxas de deformação apresentaram maiores frações de CST transgranular e maior número de trincas.

Outra pesquisa de CST em ambiente aquoso foi a de Shen et al. (2019), que estudaram seu efeito no o aço 310-ODS. O teste foi feito a uma temperatura de 600°C, sob uma tensão de 25 MPa, sendo as amostras controladas em diferentes intervalos de tempo. Após os ensaios, verificou-se que o material apresentou excelente resistência à corrosão, principalmente após 100h de trabalho. Após 1500h, devido ao filme de óxido presente no material, nenhuma trinca foi encontrada, demonstrando a alta resistência à corrosão também após longo tempo de exposição.

Peron et al. (2020) avaliaram a suscetibilidade à formação de trincas por CST da liga AZ31 Mg após usinagem com resfriamento criogênico e a seco. O comportamento da CST foi avaliado por testes de tração lenta em fluido corporal simulado a 37°C. As tensões residuais compressivas obtidas nas peças usinadas com refrigeração criogênica reduziram a suscetibilidade à CST em comparação às amostras usinadas a seco.

Wu et al. (2019) investigaram o mecanismo de fratura por CST de parafusos

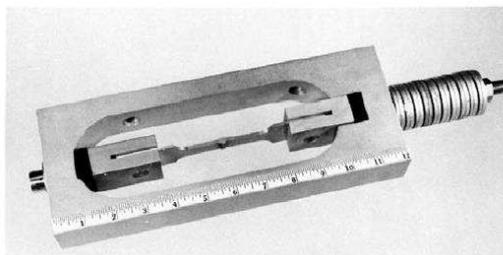
feitos de aço alto carbono, os quais foram tracionados com diferentes cargas em ambiente acidificados contendo 1,5 g de sulfetos sólido e o pH variou entre 2,4 e 5. A intensidade da tensão, o pH e a concentração de sulfeto influenciaram a ocorrência da CST, a qual foi verificada apenas nas condições ambiente que promoveram a difusão de hidrogênio, que determinou as taxas de crescimento das trincas. Além disso, notou-se que as microestruturas de lamelas (de perlita) onduladas têm efeito significativo na direção e no caminho de propagação das trincas.

A partir das informações reunidas, pôde-se verificar os principais materiais, meios e cargas investigados em testes de CST, além dos principais fatores de influência. Nota-se que tanto a rugosidade quanto a tensão residual, produzidas por processos de acabamento do material, têm efeito significativo sobre a vida da peça e que um processamento adequado pode prolongá-la.

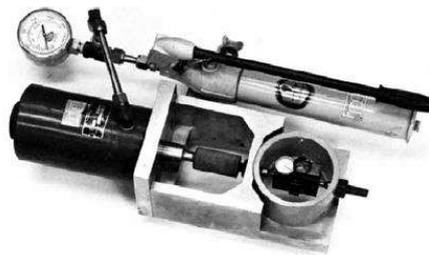
3. DISPOSITIVO PARA ENSAIOS DE CORROSÃO SOB TENSÃO

Ensaio de CST são úteis para fornecer informações mais rápidas do que podem ser obtidas através de experiências em serviço e visam prever o comportamento de certo componente em tal condição (CASTRO et al., 2007). Os ensaios para prever o desempenho de uma liga submetida a CST devem ser conduzidos em um sistema com a tensão similar à sofrida pelo material em serviço. No procedimento, é importante que as condições sejam controladas, de tal forma que não haja alteração no mecanismo de falha. Estes ensaios devem manter certo equilíbrio, ou seja, não devem ser muito severos nem muito brandos, já que podem causar a rejeição do material ou sua falha em serviço se a tensão do teste for menor que a de atuação (CASTRO et al., 2007). A norma ASTM G49-85 (2011) apresenta modelos de dispositivos para testes de CST (Figura 6), nos quais a carga de tração pode ser aplicada por meio de uma porca ou por um mecanismo hidráulico.

Figura 6. Dispositivo para teste de CST utilizando (a) um sistema porca-fuso e (b) um mecanismo hidráulico



(a)



(b)

Fonte: ASTM G49-85 (2011).

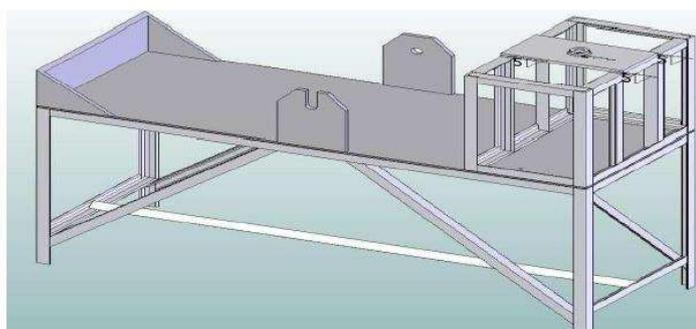
Os principais ensaios utilizados são: ensaio de deformação constante, ensaio de carga constante e ensaio de tração lenta. O ensaio de deformação constante consiste em dobrar uma fina chapa para geração de tensões mecânicas residuais. O corpo de prova (CP) é dobrado e imerso em eletrólito, com o objetivo de se obter corrosão eletroquímica. No ensaio de carga constante, aplica-se uma tensão trativa constante em um CP imerso em eletrólito. O critério de falha é definido pela ocorrência de trincas superficiais ou ruptura. Durante o ensaio de tração lenta, o CP

é tracionado a uma taxa de deformação inferior à utilizada em ensaios mecânicos de tração.

Um fator importante levado em consideração nos ensaios corresponde à suscetibilidade do material à CST, ou seja, se ele sofrerá CST em um determinado meio ou se apenas vai corroer por estar em um meio agressivo. A suscetibilidade é avaliada diante da redução dos parâmetros de ductilidade do material em estudo (CAMPOS, 2003).

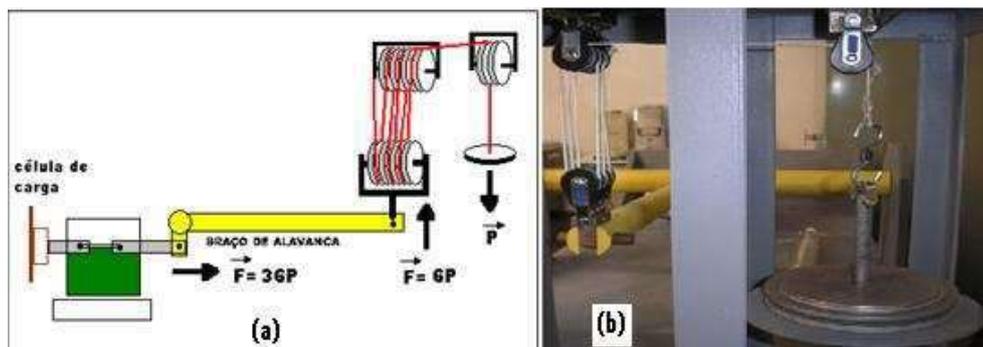
Fernandes (2010) desenvolveu um dispositivo para ensaios de corrosão sob tensão com carga constante. Tal dispositivo permite a realização de testes de CST com diferentes cargas e ambientes agressivos, além de oferecer controle de temperatura. O dispositivo consiste em uma mesa (Figura 7) de aço SAE 1020, com mancais e cantoneiras nas laterais e, para a aplicação de força, são utilizadas polias (Figura 8). A funcionalidade do dispositivo foi comprovada por meio de ensaios em diferentes tipos de aço inoxidável. Este trabalho demonstra que os ensaios de CST não precisam ser feitos necessariamente em um equipamento de alto custo e de avançada tecnologia de aplicação de força trativa.

Figura 7. Dispositivo para teste de CST utilizando base e polias



Fonte: Fernandes (2010).

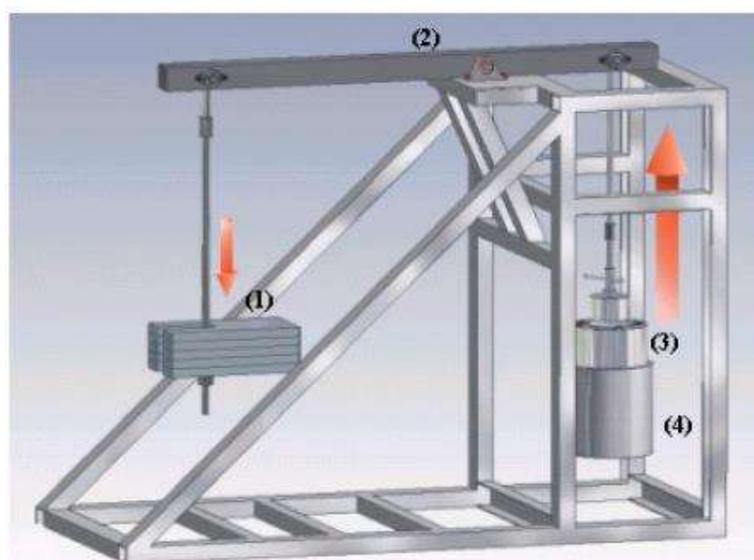
Figura 8: (a) Esquema aplicador de força e (b) detalhe do sistema de roldanas



Fonte: Fernandes (2010).

Castro et al. (2007) apresentaram resultados de ensaios de CST obtidos por um dispositivo que permite aplicação constante de carga em condições usadas em reatores de água pressurizada (PWR) e fervente (BWR) em uma usina nuclear (Figura 9). O sistema aplica carga constante nos corpos de prova durante todo o ensaio, enquanto o material é exposto a um meio corrosivo, simulando condições químicas, temperatura e pressão de reatores do tipo PWR ou BWR. Sua viabilidade de uso reforça a simplicidade de realização de testes de CST em diferentes condições.

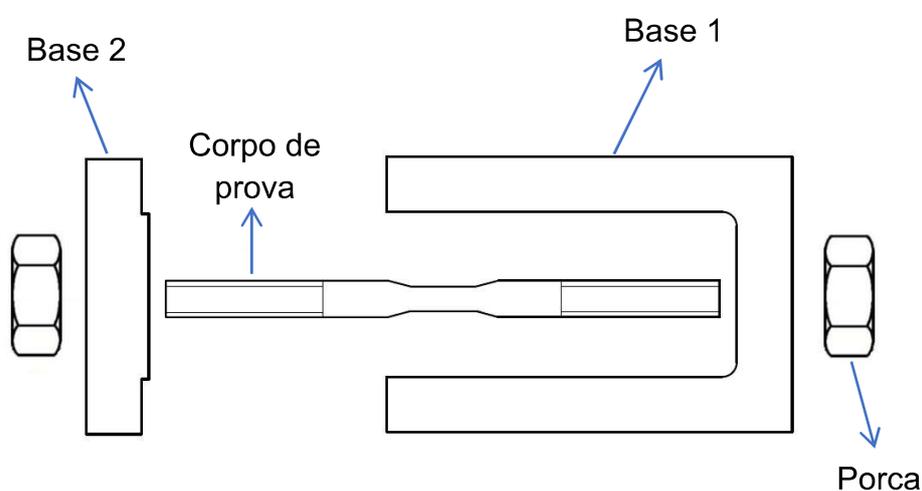
Figura 9. Dispositivo para teste de CST com aplicação de carga constante: (1) pesos; (2) braço de alavanca; (3) autoclave; (4) forno para aquecimento



Fonte: Castro et al. (2007).

Neste contexto, como um dos focos do presente trabalho, é proposto o desenvolvimento de um dispositivo simplificado para realização de testes de corrosão sob tensão com aplicação de carga constante. O dispositivo desenvolvido foi baseado na norma ASTM G49-85 e é composto por duas partes (Figura 10): uma inferior, com formato “U”, em cuja base há um furo para que uma das extremidades do CP seja posicionada; e outra superior, responsável pelo fechamento do dispositivo, possui forma retangular e um furo no centro para posicionar a outra extremidade do CP. Os desenhos de fabricação das peças são apresentados no Apêndice I.

Figura 10. Esquema do dispositivo para ensaio de CST



Fonte: A autora.

O CP, produzido com base na norma NACE TM0177-2005, é posicionado através do dispositivo e suas extremidades (roscadas) são fixadas por porcas, as quais devem ser apertadas por um torquímetro, de modo a se atingir uma carga de tração correspondente a 50-70% da tensão escoamento do material. O torque a ser aplicado pode ser obtido pela Equação 1.

$$T = K \cdot F \cdot d_r \quad (1)$$

Na equação, F é a força aplicada, d_r é o diâmetro do fundo da rosca e K corresponde a uma constante, que engloba os efeitos relacionados ao ângulo do filete, o atrito e as forças de contato. De acordo com Shigley et al. (2005), um valor $K = 0,3$ pode ser assumido no caso de roscas sem revestimentos ou antiaderentes.

A força deve ser obtida a partir do percentual da tensão de escoamento (σ_{ef}) e

da área (A_{sr}), correspondente ao diâmetro da seção reduzida do CP (d_{sr}), conforme a Equação 2.

$$F = \sigma_{ef} \cdot A_{sr} = (50 - 70\%) \cdot \sigma_{esc} \cdot \frac{\pi \cdot d_{sr}^2}{4} \quad (2)$$

Shigley et al. (2005) afirmam que a carga aplicada na rosca relaxa de 5 a 10% com o tempo. Assim, sugere-se que seja utilizado um torque inicial de 5 a 10% maior.

Para exposição do CP ao ambiente corrosivo, foi montada em sua seção reduzida um compartimento feito de mangueira cristal de policloreto de vinila (PVC) (Figura 11a). Comumente aplicada para o transporte de água, ar e fluidos inorgânicos, como ácidos e bases, esta mangueira suporta temperaturas entre -10°C e $+55^{\circ}\text{C}$. Nas extremidades, foram colocados anéis de vedação (Figura 11b) para manter o líquido corrosivo dentro do compartimento, sempre em contato com o material.

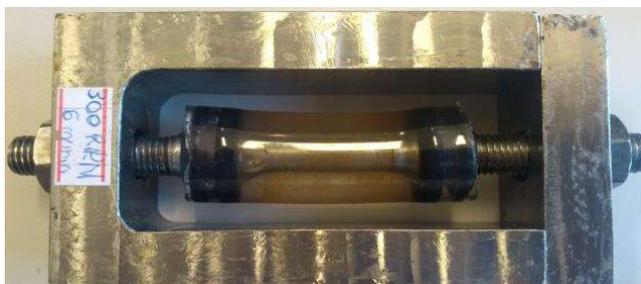
Figura 11. (a) Mangueira cristal de PVC e (b) anéis de vedação



Fonte: A autora.

Após montagem do compartimento e aplicação do líquido corrosivo por meio de uma seringa, o CP é montado no dispositivo (Figura 12), tracionado e colocado em uma estufa, de maneira a mantê-lo em uma temperatura de 55°C . O tempo de ensaio foi de 60 dias.

Figura 12. Montagem do corpo de prova com compartimento para armazenagem do líquido corrosivo no dispositivo



Fonte: A autora.

A fim de se evitar o uso dos laboratórios, com acesso restrito durante o período da pandemia de COVID-19, uma estufa (Figura 13) foi construída para a realização dos ensaios de CST. Ela consiste de uma caixa de material compensado com volume aproximado de $0,027 \text{ m}^3$ e uma lâmpada incandescente de 60 W em seu interior, a qual mantém a temperatura em torno de 55°C . Para o controle desta temperatura, foi incluído um termostato para que a lâmpada fosse acesa quando a temperatura ficasse abaixo de $54,9^\circ\text{C}$ e apagada quando ficasse acima de $55,3^\circ\text{C}$. O interior da estufa foi revestido com folha de alumínio para um melhor isolamento térmico.

Figura 13. Estufa para ensaio de corrosão sob tensão



Fonte: A autora.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar a influência da usinagem sobre a vida de peças submetidas a CST e, mais especificamente, o efeito da tensão no processo de degradação, corpos de prova foram torneados com diferentes parâmetros de corte e submetidos a ambiente corrosivo com e sem carga de tração. Os procedimentos e equipamentos para realização dos experimentos são mostrados nos itens a seguir.

4.1. Material

O material utilizado para confecção dos corpos de prova corresponde ao aço SAE 1020, amplamente aplicado devido ao seu baixo custo, boa plasticidade e soldabilidade. A porcentagem de cada elemento constituinte deste aço pode ser vista na Tabela 1. Tais elementos são comumente adicionados a fim de se melhorar as propriedades do material, de maneira a se aumentar sua tenacidade e reduzir sua dureza (SOUZA, 2017).

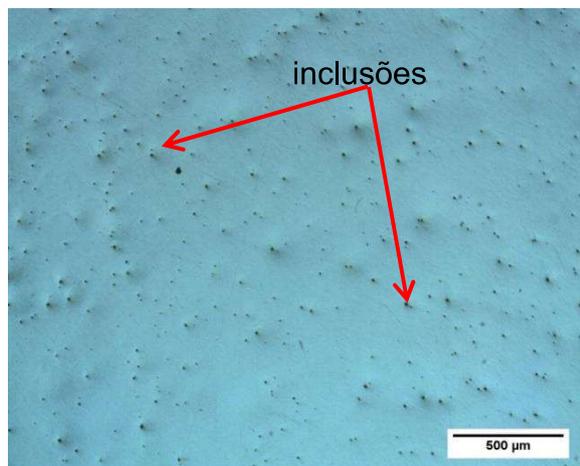
Tabela 1. Composição química em peso atômico do aço SAE 1020

| Carbono (C) | Manganês (Mn) | Fósforo (P) | Enxofre (S) | Ferro (Fe) |
|--------------|---------------|-------------|-------------|------------|
| 0,18 a 0,23% | 0,30 a 0,60% | 0,04% | 0,05% | Balanço |

Fonte: Adaptado de ABNT NBR NM 87 (2000).

Para a caracterização metalográfica, amostras do material foram embutidas, lixadas, polidas e examinadas em microscópio. As imagens coletadas antes do ataque químico (Figura 14) apresentaram inclusões, as quais podem vir a influenciar o ensaio de corrosão sob tensão. Segundo Filho, Mansur e Rabello (2007), inclusões podem atuar como pite onde o fluido utilizado no teste de CST se acumula, além de serem concentradoras de tensão, propiciando a nucleação e crescimento de trincas.

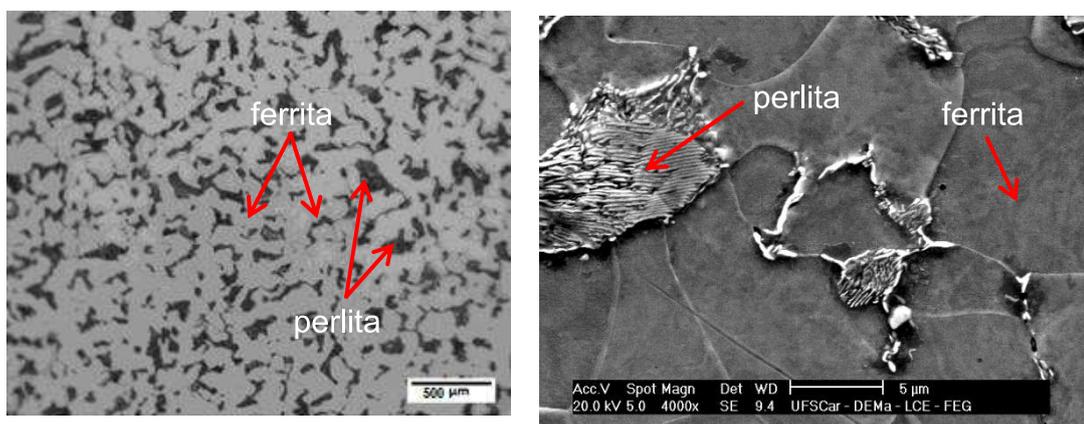
Figura 14. Amostra de aço SAE 1020 em corte transversal com presença de inclusões



Fonte: A autora.

Após ataque químico como solução nital 2%, verifica-se a microestrutura do aço (Figura 15), onde se percebem a formação de perlita, microconstituente mais claro com característica lamelar, e a presença da ferrita, fase contínua com grãos mais escuros na imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 15. (a) Microscopia óptica e (b) eletrônica de varredura após ataque químico na amostra de aço SAE 1020



(a)

(b)

Fonte: A autora.

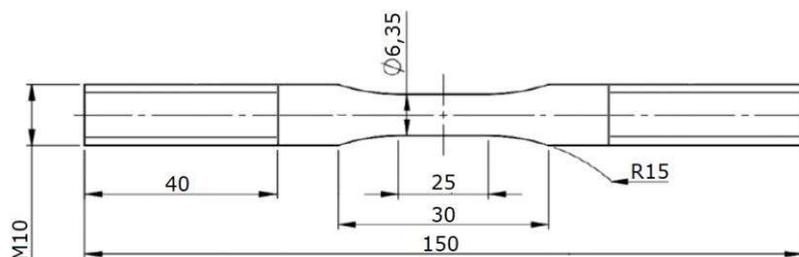
A perlita se forma durante o resfriamento lento e sua composição é de ferrita (α) + cementita (Fe_3C), sendo a ferrita a forma estável do ferro puro em temperatura ambiente. À medida que a composição de carbono aumenta, o material se torna mais concentrado, mudando para a fase cementita (CALLISTER, 2008). No caso do

aço SAE 1020, a concentração de cementita é baixa.

4.2. Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova, com dimensões segundo a norma NACE TM0177-2005 (Figura 16), foram torneados a seco com diferentes condições de corte em um torno CNC Romi Centur 30D (potência máxima de 9 kW e rotação máxima de 3000 rpm). Como ferramenta, foi utilizado um inserto de metal duro classe ISO P25, com geometria DNMG110408-MF, revestido com cobertura multicamada TICN+Al₂O₃+TiN, montado em um porta-ferramenta DDNNN2020K11, o qual propicia um ângulo de posição de 62,5°, um ângulo de saída de -5° e um ângulo de folga de +5°. A fim de se evitar a influência do desgaste, todos os corpos de prova foram torneados com arestas novas.

Figura 16. Dimensões do corpo de prova para ensaio de CST, com base na norma NACE TM0177-2005



Fonte: A autora.

Para a verificação do efeito da usinagem e, conseqüentemente, da rugosidade sobre a resposta do material submetido à corrosão com e sem aplicação de tensão, os corpos de prova foram usinados com velocidade de corte $v_c = 45$ m/min e profundidade de usinagem $a_p = 0,5$ mm constantes, mas diferentes valores de avanço $f = 0,1, 0,4$ e $0,7$ mm/rot. De maneira a se obter uma confiança adequada dos resultados, três corpos de prova foram preparados com cada condição de avanço.

4.3. Caracterização dos corpos de prova

Após o processo de usinagem, os corpos de prova tiveram sua superfície avaliada no microscópio para análise de imagens tridimensionais Alicona Infinite

Focus SL, que permitiu a medição dos parâmetros de rugosidade Rz, Rp, Rv, Rsk e Rku, os quais foram correlacionados aos resultados obtidos nos ensaios de corrosão com e sem aplicação de tensão. Para o cálculo dos parâmetros, foram medidos, com *cut-off* ajustado de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4288, 200 perfis na superfície de cada CP, sendo utilizados os valores médios e respectivos desvios-padrão para análise dos resultados.

4.4. Ensaios de corrosão com e sem aplicação de tensão

Para os ensaios de CST, por meio de um torquímetro com capacidade entre 20 e 200 Nm, foi aplicada aos corpos de prova (três para condição de usinagem) uma carga de tração de 53% da tensão de escoamento do material, tendo esta o valor de 536 MPa, segundo testes previamente realizados. Com o diâmetro da seção reduzida do CP $d_{sr} = 6,35$ mm e as extremidades preparadas com uma rosca métrica M10 ($d_r = 8,7$ mm), chegou-se, a partir das Equações 1 e 2 a um torque $T \cong 22$ Nm, gerando uma tensão de 284 MPa.

Como líquido corrosivo, foi utilizado o hidróxido de sódio (NaOH), conhecido popularmente como soda cáustica, líquido branco inorgânico, com massa específica de 2,12 g/ml, ponto de fusão de 318,4°C e ponto de ebulição de 1390°C. Quando dissolvido em água, libera íons de hidroxila (OH). O NaOH, amplamente utilizado na fabricação de papel, alumina, sabões, refino de petróleo, metalurgia, produção de biodiesel, tratamento de água, fabricação de vidros, entre outros, possui alto poder corrosivo, que pode causar graves queimaduras (SILVA, 2012c). Para os ensaios foi utilizada uma solução com concentração de 30% de NaOH (concentração em massa). As soluções foram elaboradas utilizando NaOH (para análise – PA) e água destilada.

Após a montagem dos corpos de prova no dispositivo e aplicação do fluido corrosivo em sua região central, conforme descrito no Capítulo 3, estes foram mantidos em uma estufa (Figura 17) a uma temperatura de 55°C por 60 dias.

Nos ensaios de imersão sem aplicação de tensão, os corpos de prova (três para cada condição de usinagem) foram submetidos ao mesmo fluido e à mesma temperatura pelo mesmo período.

Figura 17. Corpos de prova submetidos a corrosão com e sem aplicação de tensão, no interior da estufa



Fonte: A autora

Após os ensaios, todas as amostras foram analisadas no microscópio metalográfico Olympus CX31, equipado com lente de 100x.

4.5. Ensaios de tração

De modo a se avaliar o efeito da corrosão com e sem aplicação de tensão na resistência das peças, após os ensaios e análise em microscópio, as amostras foram submetidas a testes de tração (Figura 18) para a obtenção do limite de resistência à tração e da tensão de ruptura na máquina de ensaios TIME Groups WDW E-100, a uma temperatura ambiente de 25°C e velocidade de 0,01 mm/min. Esta velocidade foi estabelecida para que as condições da superfície afetada influenciassem o processo de ruptura.

Figura18. Peça fixada para realização de ensaio de tração



Fonte: A autora

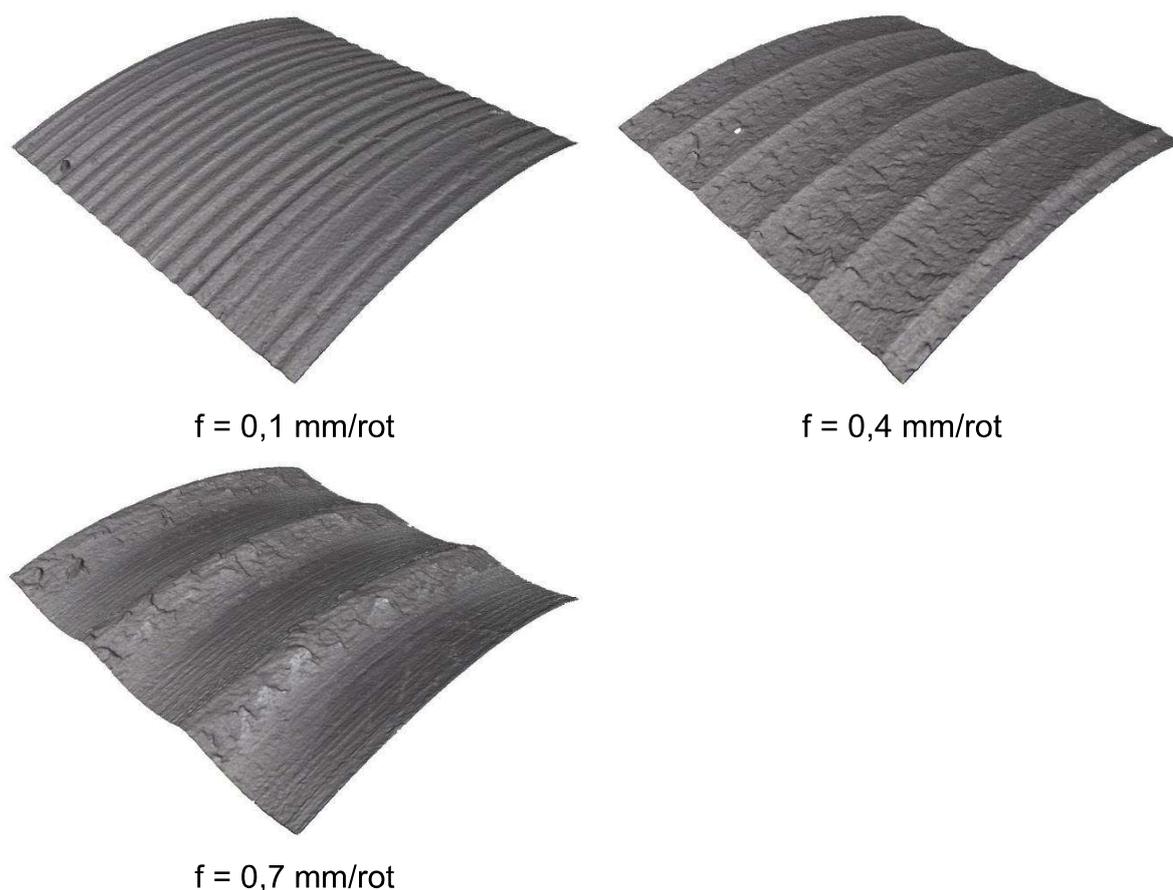
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões relacionados aos dados obtidos nesta pesquisa.

5.1. Análise da rugosidade dos corpos de prova após a usinagem

A Figura 19 traz imagens tridimensionais representativas das superfícies geradas após o processo de torneamento dos corpos de prova com diferentes valores de avanço por volta. Em todos os casos, notam-se superfícies com características uniformes e textura formada pela cinemática do processo.

Figura 19. Imagens das superfícies do aço SAE 1020 geradas no processo de torneamento com diferentes valores de avanço

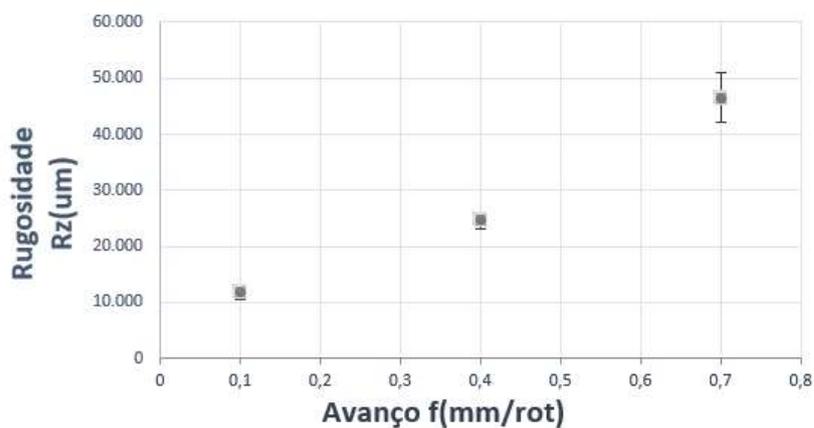


Fonte: A autora.

O crescimento das irregularidades é observado de maneira clara com o aumento do avanço da ferramenta, que afeta diretamente a rugosidade geométrica (conforme Figura 3) e a deformação do material durante a formação do cavaco, que

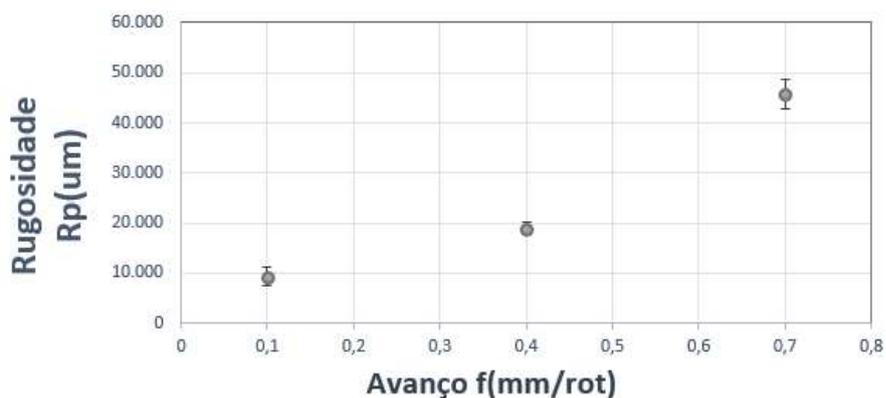
produz um aspecto de arrancamento, verificado principalmente após o torneamento com $f = 0,7$ mm/rot. Com maiores valores de avanço, nota-se material deformado e acumulado na região dos picos, o que gera aumento da rugosidade, comprovado pelos resultados mostrados nas Figuras 20 a 22.

Figura 20. Rugosidade R_z após usinagem com diferentes valores de avanço



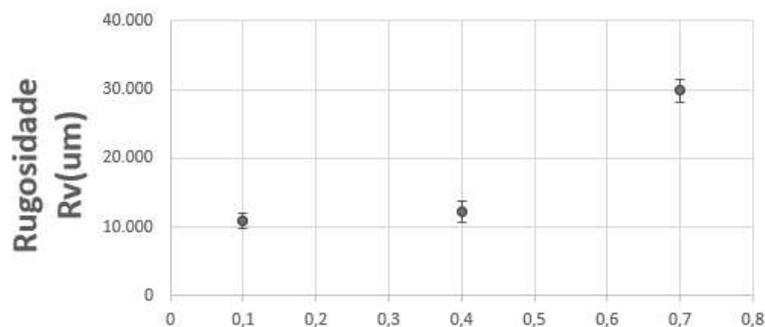
Fonte: A autora.

Figura 21. Rugosidade R_p após usinagem com diferentes valores de avanço



Fonte: A autora.

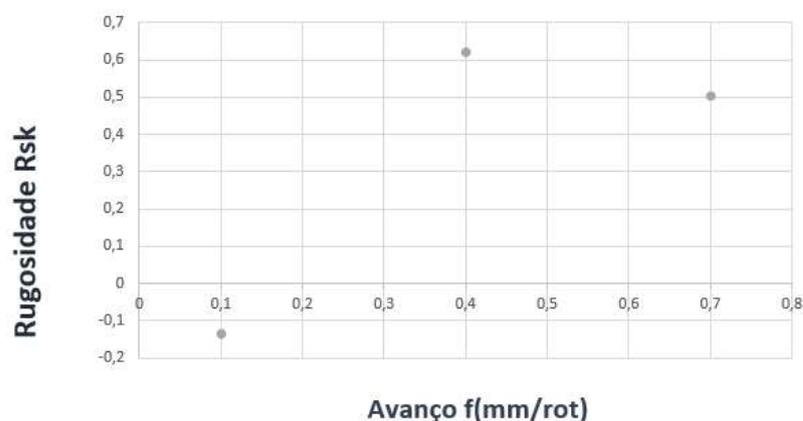
Figura 22. Rugosidade Rv após usinagem com diferentes valores de avanço



Fonte: A autora.

Em relação ao parâmetro Rz, nota-se que cada incremento no valor de avanço leva a aproximadamente o dobro do valor de rugosidade, ou seja, a distância entre pico é multiplicada por dois. Verifica-se que tal comportamento é similar ao obtido para Rp, enquanto a taxa de crescimento de Rv é menor. Isso indica que o dano à superfície foi provocado principalmente pelo aumento dos picos, causados pela maior deformação de material, e menos pelo crescimento dos vales. No entanto, de maneira a se acomodar a linha média na nova distribuição do perfil, os vales devem apresentar maiores larguras, o que é comprovado pelo comportamento da assimetria do perfil, na Figura 23, representada pelo parâmetro Rsk, cujo aumento indica uma superfície com vales mais largos e picos mais estreitos.

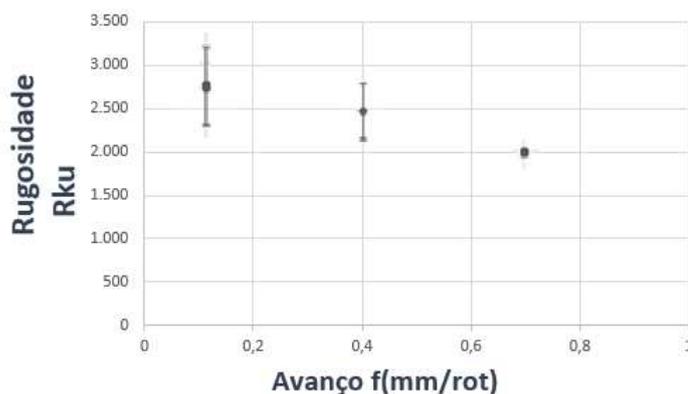
Figura 23. Parâmetro Rsk após usinagem com diferentes valores de avanço



Fonte: A autora.

Já o achatamento do perfil, medido pelo parâmetro Rku , embora tenha apresentado pouca variação, demonstrou tendência de queda com o aumento do avanço (Figura 24). Isso indica que o perfil possui uma distribuição aproximadamente normal após a usinagem com o menor avanço ($Rku \cong 3$).

Figura 24. Parâmetro Rku após usinagem com diferentes valores de avanço



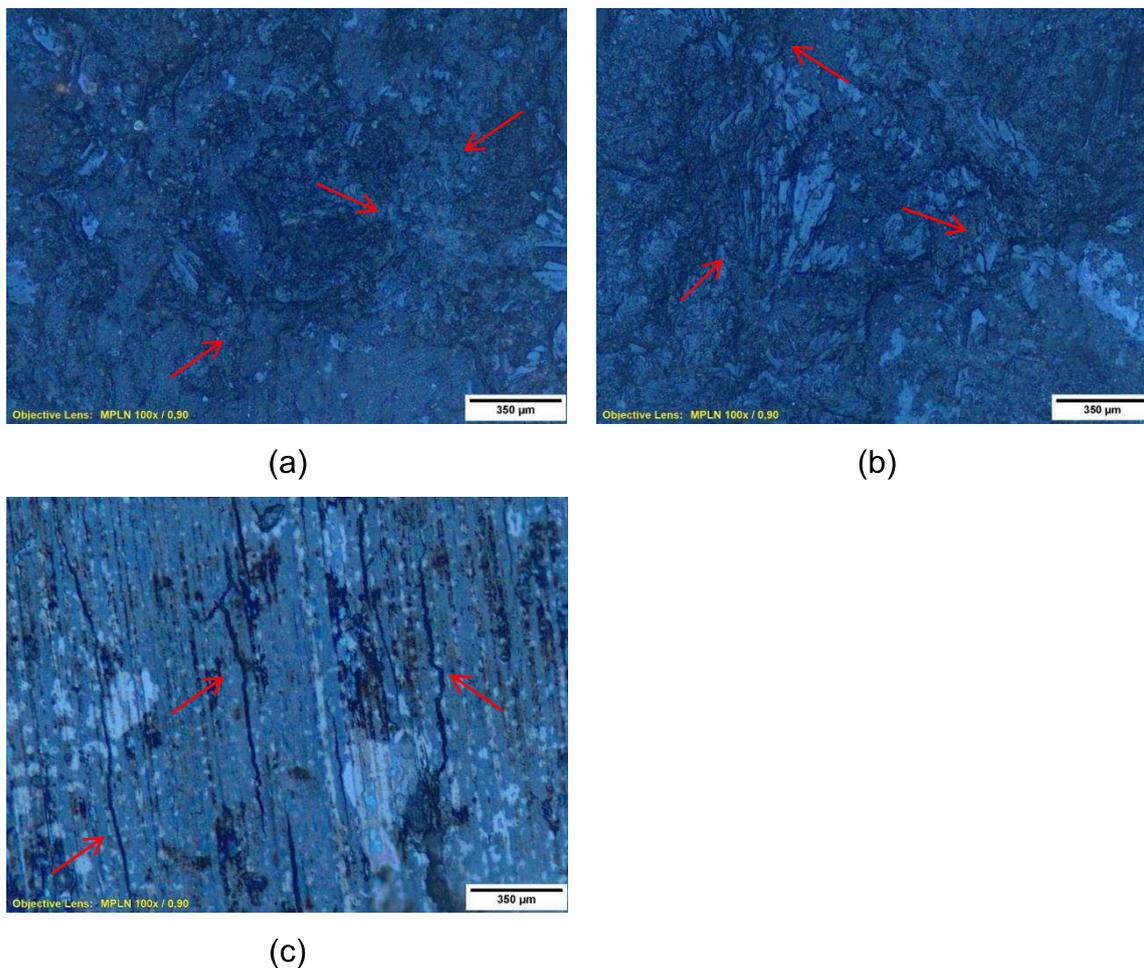
Fonte: A autora.

Assim, nota-se que o aumento do avanço levou principalmente a maiores picos e vales mais largos de rugosidade, o que pode favorecer o contato do fluido corrosivo com a peça.

5.2. Análise dos corpos de prova após os ensaios de corrosão sob tensão

Resultados representativos de microscopia obtidos após os corpos de prova tracionados terem sido submetidos à solução de NaOH 30 %, a uma temperatura de 55°C, durante 60 dias, são apresentados na Figura 25.

Figura 25. Imagens da superfície dos corpos de prova submetidos a CST após usinagem com (a) $f = 0,1$ mm/rot, (b) $f = 0,4$ mm/rot e (c) $f = 0,7$ mm/rot



Fonte: A autora.

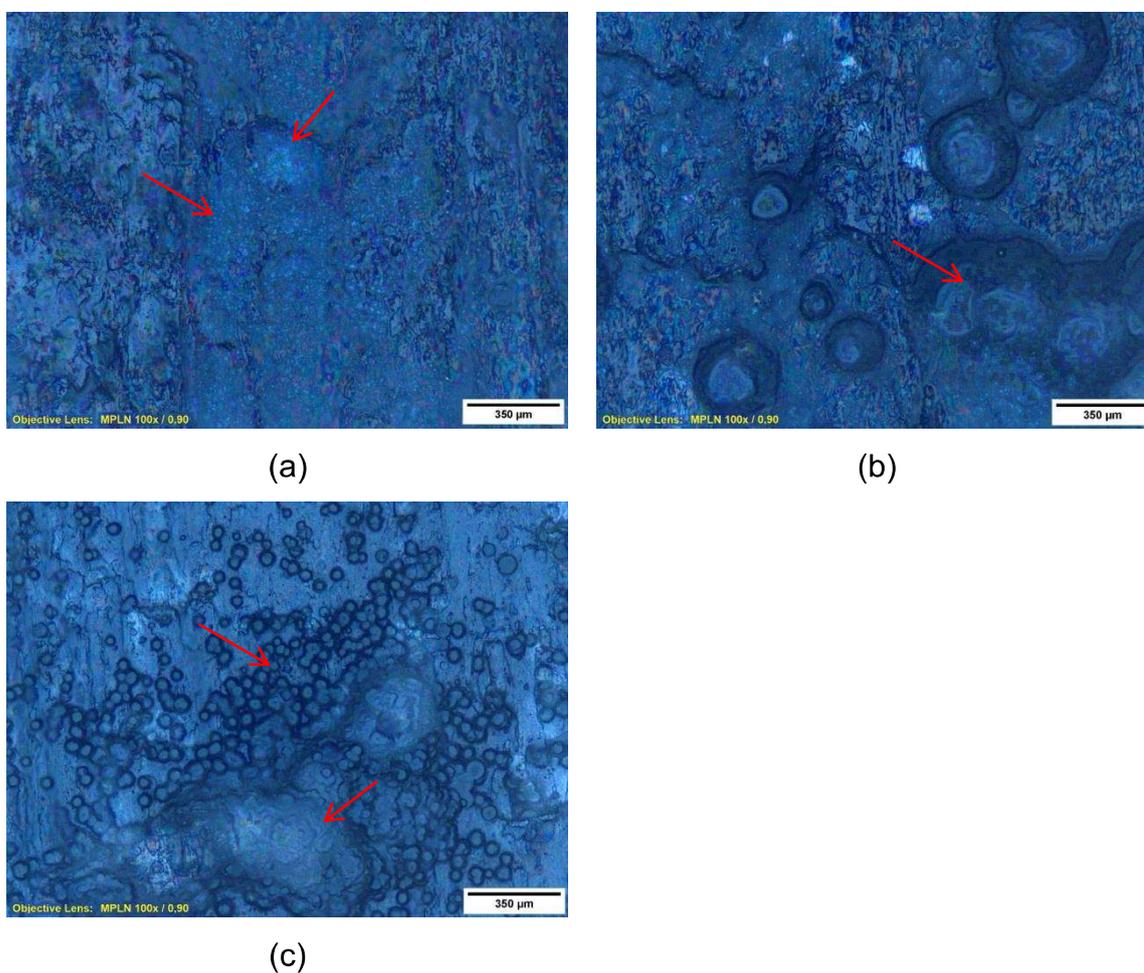
No corpo de prova usinado com $f = 0,1$ mm/rot, a superfície apresenta trincas finas, pequenas e irregulares (apontadas pelas setas vermelhas), desenvolvidas devido à junção tensão, temperatura e fluido corrosivo. Os menores valores de rugosidade, assim como a menor largura dos vales, podem ter reduzido o contato com o fluido e permitido apenas uma pequena degradação da superfície. Nos corpos de prova usinados com $f = 0,4$ mm/rot, comparativamente, a superfície exibe trincas mais profundas e é possível verificar também marcas mais intensas de degradação, o que pode ser justificado pela maior deformação do material durante a usinagem. Já a superfície usinada com $f = 0,7$ mm/rot apresenta trincas mais profundas, intensas e contínuas do que as observadas nas situações anteriores. Além disso, estas trincas ocorrem principalmente no sentido das marcas de avanço. Neste caso, não apenas a maior deformação do material pode ter contribuído, mas também a ocorrência de pontos de concentração de tensão devido à maior

rugosidade.

5.3. Análise dos corpos de prova após os ensaios de corrosão sem aplicação de carga

A Figura 26 apresenta superfícies representativas dos corpos de prova usinados com diferentes avanços por volta e submetidos à corrosão em solução de NaOH 30%, a uma temperatura de 55°C, durante 60 dias, sem aplicação de carga.

Figura 26. Imagens da superfície dos corpos de prova submetidos a corrosão sem aplicação de carga após usinagem com (a) $f = 0,1$ mm/rot, (b) $f = 0,4$ mm/rot e (c) $f = 0,7$ mm/rot



Fonte: A autora.

A peça usinada com avanço $f = 0,1$ mm/rot apresentou pequenas áreas degradadas (indicadas pela seta vermelha), mas sem a presença de produtos de corrosão concentrados, o que pode ter ocorrido devido à baixa rugosidade gerada

pelo processo de torneamento. Quando o avanço foi de 0,4 mm/rot, a superfície apresentou produtos de corrosão em áreas maiores, mas em menor quantidade, enquanto na peça usinada com avanço de 0,7 mm/rot, a superfície apresentou produtos de corrosão menores, em maior quantidade, ao redor de alguns alvéolos de maior área. Isso pode ser explicado pela alta rugosidade e maior largura dos vales, o que favoreceu o contato entre fluido corrosivo e peça e gerou mais regiões de degradação.

A Figura 27 mostra os corpos de prova após os ensaios de corrosão sem (dois CPs superiores) e com (dois CPs inferiores) aplicação de carga. Visualmente, percebe-se a diferença entre elas. Como já discutido, em CST, o metal não sofre degradação visual e em boa parte das vezes mantém a aparência metálica, enquanto na corrosão por imersão a superfície do material sofre maior degradação aparente. Nos CPs sem tensões trativas, ocorreu a formação de Magnetita, que tem coloração escura; por outro lado, quando os CPs foram submetidos as tensões trativas, a magnetita não se forma ou se forma em quantidade menor.

Figura 27. Comparação das superfícies de corpos de prova após serem submetidos a ensaios de corrosão (a) sem e (b) com aplicação de carga



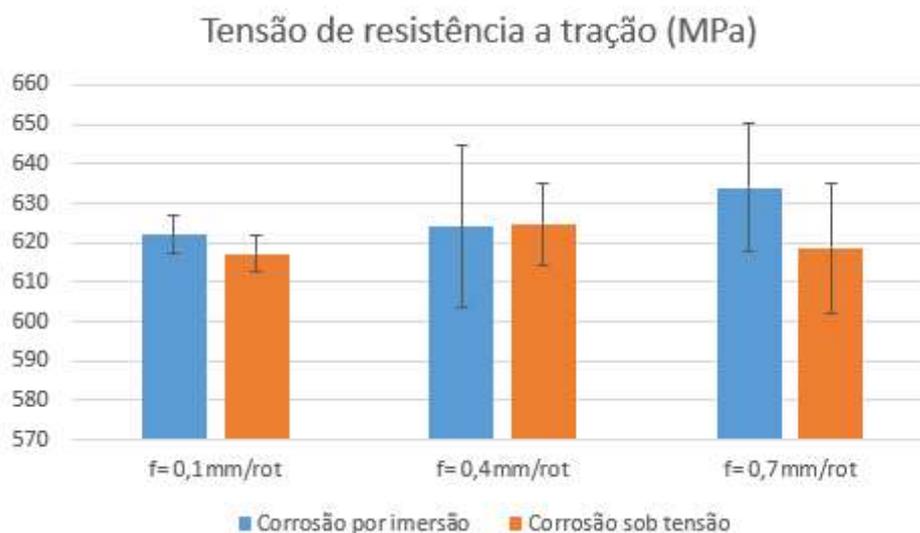
Fonte: A autora.

5.4. Testes de tração dos corpos de prova após ensaios de corrosão sem e com aplicação de carga

A fim de se avaliar o efeito da corrosão sem e com aplicação de carga

simultânea na resistência mecânica dos corpos de prova usinados com diferentes avanços, estes foram submetidos a testes de tração. A Figura 28 mostra os resultados obtidos para o limite de resistência à tração, os quais, embora demonstrem pequena variação, apresentam tendência de crescimento com o aumento do avanço no caso em que os corpos de prova foram submetidos a corrosão pura, o que pode estar associado à indução de tensões residuais compressivas devido ao aumento da carga mecânica durante o processo de usinagem com maiores avanços. Quando os corpos de prova foram ensaiados em CST, não há tendência clara e o possível aumento da resistência pode ter sido compensado pela formação de trincas, que concentram tensão e fragilizam o material.

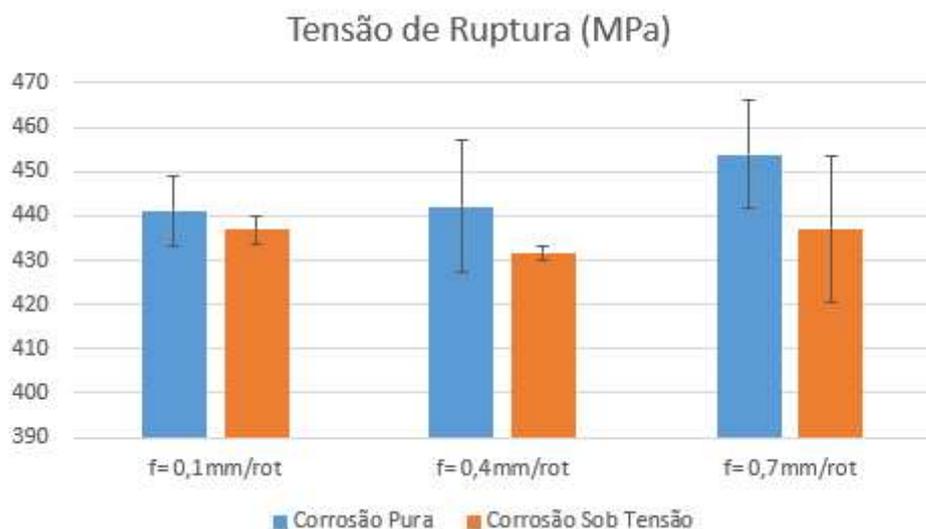
Figura 28. Limite de resistência à tração de corpos de prova produzidos com diferentes valores de avanço e submetidos a ensaios de corrosão sem e com aplicação de carga



Fonte: A autora.

Os resultados de tensão de ruptura, apresentados na Figura 29, possuem exatamente o mesmo comportamento.

Figura 29. Tensão de ruptura de corpos de prova produzidos com diferentes valores de avanço e submetidos a ensaios de corrosão sem e com aplicação de carga



Fonte: A autora.

Possivelmente, os maiores alvéolos gerados nos ensaios de corrosão sem aplicação de carga, mesmo que em menor quantidade e em regiões limitadas, contribuíram para a redução da resistência do corpo de prova, da mesma maneira que a formação de trincas aparentemente maiores e mais disseminadas na superfície no caso dos corpos de prova submetidos a CST.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, puderam-se tirar as seguintes conclusões:

- O aumento do valor de avanço causou maior valor do parâmetro de rugosidade Rz, o qual está relacionado ao aumento da rugosidade teórica e à deformação do material.
- Analisando-se a altura máxima de pico Rp e a profundidade mínima de vale Rv, verificou-se que o aumento geral da rugosidade está relacionado ao aumento dos picos.
- Em relação à assimetria do perfil, vales mais largos foram encontrados para maiores valores de avanço.
- O dispositivo desenvolvido para os testes de corrosão sob tensão teve desempenho adequado, tendo sido verificadas características na superfície dos corpos de prova associadas a este tipo de ensaio, como ausência de degradação aparente, oxidação ou ferrugem, além da presença de trincas.
- O corpo de prova produzido com maior valor de avanço ($f = 0,7$ mm/rot) teve um aspecto de maior degradação superficial nos ensaios de corrosão sem e com aplicação de carga de tração, devido à elevada rugosidade e deformação do material durante a usinagem.
- Nos ensaios de corrosão sem aplicação de carga, foram observados produtos de corrosão, enquanto nos ensaios de CST notou-se a ocorrência de trincas superficiais.
- O limite de resistência à tração e a tensão de ruptura obtidos nos ensaios de tração dos corpos de prova após corrosão por imersão tiveram tendência de aumento com maiores valores de avanço, enquanto uma tendência de queda foi observada após a corrosão sob tensão, indicando que a redução de alvéolos no primeiro caso e a formação de trincas no segundo são os responsáveis pela resistência do material.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING. **ASTM G49 - 85**. Standard practice for preparation and use of tension stress corrosion test specimens. American Society for Testing Materials: ABNT, 2011.

ANTUNES, M. R. **Avaliação da resistência à corrosão-fadiga do aço API 5L X65 revestido com AISI 308L SI**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CORROÇÃO. **ABRACO**. Uma abordagem geral de corrosão. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/israel/teoria/Teoria%20-%20Corrosao.pdf/at_download/file. Acesso em: 11 de julho de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 87**: Aço carbono e ligados para construção mecânica – Designação e composição química. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4288**: Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade - Máquinas e Equipamentos Mecânicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

AWOPETU, O. O. FARAYIBI, P. K., OLORUNFEMI, G. E. Investigating the surface roughness of AISI 1020 steel machined using TiN coated cemented carbide tool. **International Journal of Advanced Engineering and Technology**, v. 1, p. 8-13, 2017.

BENARDOS, P. G., VOSNIAKOS, G.C. Predicting surface roughness in machining: a review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43(8), p. 833–844, 2003.

BHATKAR, O. SAKHARKAR, S., MOHAN, V., PAWADE, R. Residual Stress Analysis in Orthogonal Cutting of AISI 1020 Steel. **Athantis Press**, v.137, p. 100-106, 2017.

CALLISTER, Jr. W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**.

7ª ed. Rio de Janeiro, Editora LTC, 2008.

CAMPOS, C. V. F. **Suscetibilidade à corrosão sob tensão dos aços AISI 321 e 347 em meio a H₂SO₄ + CuSO₄**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

CASTRO, A. C. J., SCHVARTZMAN, M. A. M., QUINAN, M. A. D., SOARES, A. E. G. Sistema para ensaios de corrosão sob tensão em condições de reatores PWR. **Internacional Nuclear Atlantic Conference – INAC 2007**, set.-out. 2007, [Santos, SP].

CHANG, L., BURKE, M. G., SCENINI, F. Stress corrosion crack initiation in machined type 316L austenitic stainless steel in simulated pressurized water reactor primary water. **Corrosion Science**, v. 138, p. 54-65, 2018.

CHI, G., YI, D., LIU, H. Effect of roughness on electrochemical and pitting corrosion of Ti-6Al-4V alloy in 12 wt.% HCl solution at 35 °C. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 2, p. 1162-1174, 2019.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica**, 2ª ed. Editora McGraw-Hill LTDA. São Paulo, 1986.

CHU, T., CUI, H., TANG, X., LU, F. Stress corrosion crack growth rate of welded joint used for low-pressure rotor of nuclear turbine in oxygenated pure water at 180 °C. **Journal of Nuclear Materials**, v. 523, p. 276-290, 2019.

COELHO, P. P. S. **Estudo da susceptibilidade à corrosão sob tensão em atmosfera de H₂S das armaduras de tração de dutos flexíveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais). Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2013.

DAVIM, J. P., GAITONDE, V. N., KARNIK, S. R. Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 205(1-3), p. 16–23. 2008.

DING, Y. L., CHEN, K., ZHAO, B., HAN, Y., WANG, L., LU, W. Effects of

microstructure on the stress corrosion cracking behavior of nickel aluminum bronze alloy in 3.5% NaCl solution. **Materials Science & Engineering A**, v. 733, p. 361-373, 2018.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. Editora Artliber, 9a ed. São Paulo, 2014.

ELSARITI, S. M., HAFTIRMAN. Behaviour of stress corrosion cracking of austenitic stainless steels in sodium chloride solutions. **Procedia Engineering**, v. 53, p. 650-654, 2013.

FARIAS, A. **Análise da tensão residual e integridade superficial no processo de torneamento em material endurecido do aço ABNT 8620 cementado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FERNANDES, J. C. **Desenvolvimento de um dispositivo tipo carga constante para avaliação da susceptibilidade à corrosão sob tensão de aço inoxidável austenítico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Editora Edgard Bluncher LTDA. São Paulo, 1970.

FILHO, N. N. A., MANSUR, T. R., RABELLO, E. G. Corrosion fatigue behaviour of SAE 8620 steel in NaCl 3.5% solution. **Transactions, SMiRT 19**. Toronto, ago. 2007.

FONSECA, M. C., TAVARES, E. L., MARTINS, M. C., SILVA, R. S., CHUVAS, T. C. Comportamento das tensões residuais e da rugosidade no torneamento do aço SAE 1050 com ferramenta de corte convencional e wiper. **23º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 04 a 08 de Novembro de 2018, Foz do Iguaçu, 2018.

FOROUZBAKHSH, F., GATABI, J. R., GATABI, I. R. A new measurement method for ultrasonic surface roughness measurements. **Measurement**, v. 42, p. 702–705, 2009.

GENTIL, V. **Corrosão**. 4^a ed. Editora S.A. Rio de Janeiro, 2005.

GHOSH, S., KAIN, V. Effect of surface machining and cold working on the ambient temperature chloride stress corrosion cracking susceptibility of AISI 304L stainless steel. **Materials Science and Engineering A**, v. 527, p. 679-683, 2010.

GOMES, L. M. F., MÜLLER, I. L. Corrosão sob tensão em aços de alta resistência aspergidos termicamente. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, São Pedro, 2000.

GRAVALOS, M. T. **Efeitos da Usinagem na Integridade Superficial de um Aço Inoxidável Superaustenítico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

GUEDES, E. D. **Análise metrológica de acabamento de superfícies aplicadas a componentes mecânicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova Lisboa, Portugal, 2014.

HAGEN, C. M. H, HOGNESTAD, A., KNUDSEN, O. Ø., SØRBY, K. The effect of surface roughness on corrosion resistance of machined and epoxy coated steel. **Progress in Organic Coatings**, v. 130, p. 17-23, 2019.

HIOKI, D. **Influência dos parâmetros de Corte do Fresamento HSM Sobre o Desempenho Tribológico do Aço AISI H13 Endurecido**. Tese (Doutorado em Engenharia de Mecânica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

INTITUTO AÇO BRASIL – IABr. **Anuário estatístico**. Rio de Janeiro, out. 2019.

JAVIDI, A., RIEGER, U. EICHSELDER, W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. **International Journal of Fatigue**, v. 30, p. 2050-2055, 2008

JESUS, R. E. C. **Avaliação dos esforços, temperatura e integridade superficial em torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32760 quando alterado o ângulo de posição da ferramenta e os parâmetros de corte**.

Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica), Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei, 2013.

JOSSO, B., BURTON, D. B., LALOR, M. J., Frequency normalized wavelet transform for surface roughness analysis and characterization. **Wear**, v. 252, p. 491-500, 2001.

KENTISH, P. Stress corrosion cracking of gas pipelines – Effect of surface roughness, orientations and flattening. **Corrosion Science**, v. 49, n. 6, p. 2521-2533, 2007.

KUMAR, P. S., ACHARYYA, S. G. Controlling chloride induced stress corrosion cracking of AISI 316L stainless steel by application of buffing. **Materials Today: Proceedings**, v. 15, p. 138-144, 2019.

LIU, G., HUANG, C., ZOU, B., LIU, H., LIU, Z., LIU, Y., LI, C. The modification of corrosion resistance of 17-4PH stainless steel by cutting process. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 49, p. 447-455, 2020.

LOPES, K. S. S. **Influência dos parâmetros de usinagem na resistência à fadiga de aços AISI 4140**. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MACHADO, A.R. COELHO, R.T., ABRÃO, A. M., SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Editora Edgard Blücher LTDA. São Paulo, 2009.

MACHADO, A. R., SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais**, 8ª versão. Uberlândia, abr. 2004.

MAGALHÃES, H. P. **Influência dos parâmetros de corte nas tensões residuais geradas na usinagem de aço inoxidável duplex 2205**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

MARIANO, N. A. **Corrosão sob tensão de um aço inoxidável austenítico em soluções aquosas contendo cloretos**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica), Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

MARQUES, F. M., ROCHA, A. S., COSTA, R. C., BERNARDINO, F. W.,

HOFFMANN, P. R., BONFANTE, M. M. Influência do processo de usinagem na integridade superficial e propriedades da liga de aço inox austenítico F138 e AISI 316L. **COLAOB**, 24-27 ago. 2014, Foz do Iguaçu.

MINATTO, P. R., FERREIRA, L. R. M. Efeito da rugosidade na corrosão por CO₂ do aço API 5L X65 em regime de fluxo turbulento. **70° Congresso Anual, Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas**, 17 a 21 de agosto de 2015, Rio de Janeiro.

NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS. **NACE TM0177-2005**. Standard Test Methods. Laboratory testing of metals for resistance to sulfide stress cracking and stress corrosion cracking in H₂S environments. NACE 2005.

NUNES, L. T. **Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

OLYMPUS. **Surface Roughness Measurement—Parameters**. Disponível em: <https://www.olympus-ims.com/pt/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/>. Acesso em: 04 de mar. 2020.

PANAHI, H., ESLAMI, A., GOLOZAR, M. A. Corrosion and stress corrosion cracking initiation of grade 304 and 316 stainless steels in activated Methyl Diethanol Amine (aMDEA) solution. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 55, p. 106-112, 2018.

PAULO, R. G. R. **Avaliação da Integridade Superficial e Usinabilidade de Engrenagens Forjadas Utilizando Fresamento com Alta Velocidade de Corte**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

PEREIRA, L. A., HASSUI, A., MAGRI, A. Influências das Condições de Usinagem na Integridade Superficial do Aço Inoxidável Aeronáutico 15-5PH. **21° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 09-13 nov. 2014. Cuiabá.

PERON, M., BERTOLINI, R., GHIOTTI, A., TORGERSEN, J., BRUSCHI, S.,

BERTO, F. Enhancement of stress corrosion cracking of AZ31 magnesium alloy in simulated body fluid thanks to cryogenic machining. **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, v. 101, p. 1-11, 2020.

QEHAJA, N., JAKUPI, K., BUNJAKU, A., BRUÇI, M., OSMANI, H. Effect of Machining Parameters and Machining Time on Surface Roughness in Dry Turning Process. **Procedia Engineering**, v. 100, p. 135-140, 2015.

RAJA, V. S., SHOJI, T. **Stress corrosion cracking, theory and practice**. Editora Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2011.

RAJAGURU, J., ARUNACHALAM, N. Investigation on machining induced surface and subsurface modifications on the stress corrosion crack growth behaviour of super duplex stainless steel. **Corrosion Science**, v. 141, p. 230-242, 2018.

RATNAM, M. M. Factors Affecting Surface Roughness in Finish Turning. **Comprehensive Materials Finishing**, v. 1, p. 1-25, 2017.

RHOUMA, A. B., BRAHAM, C., FITZPATRICK, M. E., LÉDION, J., SIDHOM, H. Effects of surface preparation on pitting resistance, residual stress, and stress corrosion cracking in austenitic stainless steels. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 10 (5), p. 507-514, 2001.

ROSÁRIO, J. F. A. **Estudo da integridade superficial e seu efeito na fadiga de contato de um aço ferramenta**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SANTOS, R. D. M. **Investigação da corrosão do aço carbono AISI 1020 em soluções de NaCl utilizando microscopia óptica *in situ***. Dissertação (Mestrado em Química), Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

SCATIGNO, G. G., DONG, P., RYAN, M. P., WENMAN, M. R. The effect of salt loading on chloride-induced stress corrosion cracking of 304L austenitic stainless steel under atmospheric conditions. **Materialia**, v. 8, p. 1-24, 2019.

SHEN, L., CHEN, H., CHE, X., WANG, Y. Stress corrosion cracking behavior of laser-MIG hybrid welded 7B05-T5 aluminum alloy. **Corrosion Science**, v. 165, p. 1-

23, 2019.

SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R., BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7 ed. Editora Bookman. Porto Alegre, 2005.

SILVA, F. F. **Corrosão sob tensão de aços carbono em meio etanólico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012b.

SILVA, V. G. **Avaliação da susceptibilidade à corrosão sob tensão do aço inoxidável superduplex UNS S32750 soldado pelo processo TIG orbital em meios contendo Cl⁻, CO₂ E H₂S**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012a.

SILVA, I.M.C.B. Hidróxido de sódio. **Revista Virtual de Química**, v. 4, n. 1, 2012c.

SOUZA, T. L. F. **Análise comparativa a resistência à fratura dos aços SAE 1020 e SAE 4140**. Projeto de Graduação (Engenharia mecânica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2017.

VALIORGUE, F., ZMELTY, V., DUMAS, M., CHOMIENNE, V., VERDU, C., LEFEBVRE, F., RECH, J. Influence of residual stress profile and surface microstructure on fatigue life of a 15-5PH. **Procedia Engineering**, v. 213, p. 623-629, 2018.

VARELA, P. I. RAKURTY, C. S., BALAJI, A. K. Surface Integrity in Hard Machining of 300M Steel: Effect of Cutting-Edge Geometry on Machining Induced Residual Stresses. **Procedia CIRP**, v. 13, 288-293, 2014.

VATAVUK, J. FALDINI, S. Análise topográfica de trinca de corrosão sob tensão em aço AISI 304L: estudo de caso. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, ano 4, n. 4, p. 151-163, 2014.

VENKATESH, P., SIVAPRAKASAM, R. The effect of machining factors on surface roughness and flank wear while turning steel alloy AISI 3415 using TiAlN coated carbide insert. **International Journal of Recent Technology and Engineering**, v. 7, 2019.

WANG, X., YANG, Z., WANG, Z., SHI, Q., XU, B., ZHOU, C., ZHANG, L. The influence of copper on the stress corrosion cracking of 304 stainless steel. **Applied Surface Science**, v. 478, p. 492-498, 2019.

WU, S., LI, J., GUO, J., SHI, G., GU, Q., LU, C. Stress corrosion cracking fracture mechanism of cold-drawn high-carbon cable bolts. **Materials Science and Engineering A**, v. 769, p. 1-10, 2019.

XU, Y., JING, H., XU, L., HAN, Y., ZHAO, L. Stress corrosion cracking characteristics of CF8A austenitic stainless steels and interactions between multiple cracks in a simulated PWR environment. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 642-654, 2019.

ZENG, Y., LI, K. Influence of SO₂ on the corrosion and stress corrosion cracking susceptibility of supercritical CO₂ transportation pipelines. **Corrosion Science**, v. 165, 2019.

ZHANG, W., FANG, K., HU, Y., WANG, S., WANG, X. Effect of machining-induced surface residual stress on initiation of stress corrosion cracking in 316 austenitic stainless steel. **Corrosion Science**, v. 108, p. 173-184, 2016.

ZHOU, N. **Influence of grinding operations on surface integrity and chloride induced stress corrosion cracking of stainless steels**. Tese (Licenciatura em Química), Instituto Real de Tecnologia de Engenharia e Ciência Química, Stockholm, 2016.

ZURITA-HURTADO, O. J., GRACI-TIRALONGO, V. C., CAPECE-AGUIRRE, M. C. Effect of surface hardness and roughness produced by turning on the torsion mechanical properties of annealed AISI 1020 steel. **Revista Facultad de Ingeniería**, n. 84, p. 55-59, 2017.

APÊNDICE I – DESENHOS TÉCNICOS DAS BASES 1 E 2 DO DISPOSITIVO DE ENSAIO DE CST

