

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA – CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO COMPARATIVO DA VIDA DA BROCA NA FURAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL  
SUPERAUSTENÍTICO 904L COM A APLICAÇÃO DE NANOFLUIDO À BASE DE  
GRAFENO MULTICAMADAS E COM FLUIDO EM ABUNDÂNCIA

por

Guilherme Soares Vaz

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, maio de 2022

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

### CIP - Catalogação na Publicação

Vaz, Guilherme Soares  
ESTUDO COMPARATIVO DA VIDA DA BROCA NA FURAÇÃO DO  
AÇO INOXIDÁVEL SUPERAUSTENÍTICO 904L COM A APLICAÇÃO  
DE NANOFLUIDO À BASE DE GRAFENO MULTICAMADAS E COM  
FLUIDO EM ABUNDÂNCIA / Guilherme Soares Vaz. -- 2022.  
21 f.

Orientador: André João de Souza.

Coorientador: Abdiel Moguidante Vilanova.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Furação. 2. Aço inoxidável superaustenítico . 3.  
Nanofluido em quantidade reduzida. 4. Fluido de corte  
em abundância. I. João de Souza, André, orient. II.  
Moguidante Vilanova, Abdiel, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Guilherme Soares Vaz

ESTUDO COMPARATIVO DA VIDA DA BROCA NA FURAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL  
SUPERAUSTENÍTICO 904L COM A APLICAÇÃO DE NANOFLUIDO À BASE DE  
GRAFENO MULTICAMADAS E COM FLUIDO EM ABUNDÂNCIA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. André João de Souza

Coorientador: Eng. Abdiel Moguidante Vilanova

Comissão de Avaliação:

Prof. André João de Souza

Prof<sup>a</sup>. Cintia Cristiane Petry Mazzafero

Prof. Heraldo José de Amorim

Porto Alegre, maio de 2022

*Aos meus pais, **Cleusa Maria Maciel Soares e Mauro Viana Vaz**, que ao longo da vida estiveram ao meu lado me incentivando a procurar uma vida melhor a partir da educação, fruto de muito esforço, dedicação e companheirismo dessas duas pessoas que batalharam durante toda sua vida para que chegássemos juntos até aqui. Em especial, ao meu pai, que hoje não está presente em vida para acompanhar essa trajetória, mas estaremos todos felizes em ter alcançado o objetivo mais importante das nossas vidas...*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus irmãos, Felipe Soares Vaz, Leonardo Soares Vaz e Fernanda Aparecida Soares Vaz, por estarem presentes e incentivando em meus estudos.

Ao meu orientador, Prof. André João Souza, que me ofereceu a oportunidade de aprendizado com este trabalho. Fruto da sua confiança e orientação, conseguimos alcançar os objetivos propostos e concluir o trabalho.

Ao meu coorientador, Eng. Abdiel Moguidante Vilanova, pela colaboração neste trabalho, amizade e respeito durante todo o desenvolvimento.

Ao Laboratório de Automação e Usinagem (LAUS), pela infraestrutura para execução dos testes, e ao técnico Guilherme Vargas Schirmer, pelo auxílio técnico com os ensaios e as boas conversas.

À Casa do Estudante das Faculdades de Agronomia e Veterinária (CEFAV), por ter me concedido um espaço de moradia durante todos esses anos de graduação, fator essencial para manter meus estudos nesta faculdade. Agradeço a todos colegas, servidores e funcionários terceirizados que tivemos o prazer de conviver e conversar durante meu período de moradia.

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) e à empresa TMSA – Tecnologia em Movimentação, dois lugares fundamentais no meu processo de aprendizagem, e desenvolvimento pessoal e profissional. Agradeço a todos colegas e colaboradores com quem tive o prazer de trabalhar.

Agradeço a todos amigos e familiares que foram importantes em minha trajetória acadêmica, sempre prezando pelo respeito, amizade e companheirismo durante esses momentos. Em especial, à Ester Arruda Lemes, que durante a graduação, esteve ao meu lado me apoiando nos estudos e nas boas conversas.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2022

**ESTUDO COMPARATIVO DA VIDA DA BROCA NA FURAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL SUPERAUSTENÍTICO 904L COM A APLICAÇÃO DE NANOFLUIDO À BASE DE GRAFENO MULTICAMADAS E COM FLUIDO EM ABUNDÂNCIA**

**Vaz, Guilherme Soares**

guilhermesoares.vaz@gmail.com

**Resumo.** O AISI 904L é um aço inoxidável superaustenítico com excelente resistência à corrosão e boa resistência mecânica a elevadas temperaturas, podendo ser aplicado em ambientes extremos. A dificuldade de usinar (alta ductilidade, alto grau de encruamento e baixa condutividade térmica) e o alto custo do AISI 904L são boas razões para o estudo envolvendo a usinabilidade deste material. Além disso, não foram encontradas na literatura pesquisas em furação de aços superausteníticos. Com este enfoque, avaliou-se a vida da ferramenta na furação em cheio passante do AISI 904L aplicando nanofluidos (flocos de grafeno multicamadas dispersas em fluido sintético) em quantidade reduzida. A título de comparação, também foi utilizado fluido de corte em abundância em duas velocidades de corte, totalizando três ensaios de vida. Com os ensaios concluídos, foram analisados os desgastes e avarias apresentados em cada condição. Comparando os estudos, foi possível relacionar a vida útil da ferramenta entre os diferentes tipos de aplicação de lubrificante e aumento da velocidade de corte, constatando a baixa usinabilidade desse material aplicando quantidade reduzida de fluido de corte.

**Palavras-chave:** Furação, Aço inoxidável superaustenítico, Nanofluido em quantidade reduzida, Fluido de corte em abundância.

**Comparative study of drill life in 904L super austenitic stainless-steel drilling using multilayer graphene-based nanofluid machining and flood machining**

**Abstract.** AISI 904L is a super austenitic stainless steel with excellent corrosion resistance and good mechanical resistance at high temperatures and can be applied in extreme environments. The difficulty of machining (high ductility, high degree of hardening, and low thermal conductivity) and the high cost of AISI 904L are good reasons for the study involving the machinability of this material. In addition, researches on drilling super austenitic steels were not found in the literature. With this approach, tool life was evaluated in full through hole drilling of AISI 904L by applying nanofluids (multilayer graphene flakes dispersed in synthetic fluid) in reduced quantity. Comparatively, cutting fluid was also used in abundance at two cutting speeds, totaling three life tests. With the tests concluded, the wear and damage presented in each condition were analyzed. By comparing the studies, it was possible to relate the tool life with the different types of coolant applications and the increase in cutting speed, confirming the low machinability of this material when applying a reduced quantity of cutting fluid.

**Keywords:** Drilling, Super austenitic stainless steel, Nanofluid in reduced quantity, Cutting fluid in abundance.

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis superausteníticos (SASS), conhecidos como aços inoxidáveis austeníticos de alta performance, começaram a ter maior relevância no mercado global pela alta demanda de materiais resistentes a ambientes extremos, em especial os de grande resistência a corrosão e elevadas temperaturas. Os SASS se diferenciam dos aços austeníticos (ASS) por apresentarem elevados teores de elementos de liga, dentre eles, o níquel, molibdênio, cromo e nitrogênio, os quais proporcionam aos SASS melhores propriedades de resistência à corrosão em ambientes agressivos se comparado aos ASS [HAN et al., 2013]. Quanto à composição química, os SASS podem apresentar concentração de cromo na faixa de 17 a 25%, de níquel entre 14 a 25% e molibdênio de 3 a 7%. Além do mais, para aumentar a resistência mecânica e a resistência a corrosão, é adicionado nitrogênio e cobre para melhorar a resistência corrosiva para alguns tipos de ácidos [OUTOKUMPU, 2013].

De modo geral, os aços inoxidáveis são difíceis de usinar quando comparado aos aços carbonos, pois exige maiores potências e menores velocidades de corte, além de um maior cuidado no processo lubrificrefrigeração na zona de corte. Aspectos importantes que fazem os aços austeníticos terem baixa usinabilidade são elevada ductilidade, maior tendência ao encruamento e a larga diferença entre o limite de escoamento e o limite de resistência à tração quando aplicado em condições de usinagem de maior complexidade [SANTOS e SALES, 2007]. A dificuldade em usinar aços inoxidáveis austeníticos também se deve à sua baixa condutividade térmica, o que diminui a dissipação do calor na zona de corte. Isso faz com que uma parcela maior do calor gerado seja transmitida para a ferramenta, acelerando os desgastes e diminuindo sua vida. Além disso, o alto coeficiente de dilatação térmica do material torna o controle dimensional das peças usinadas mais complexo [KLOCKE, 2011; NOMANI et al., 2013].

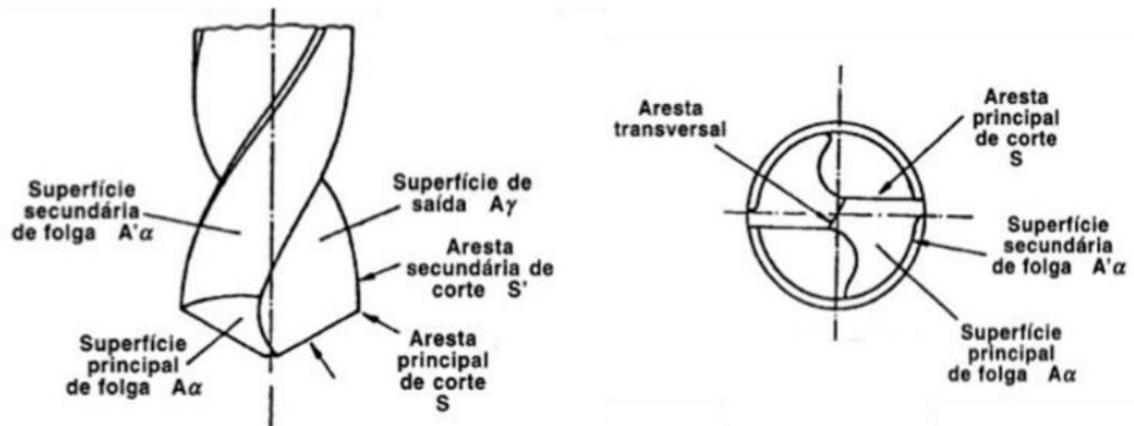
Dentre os processos de usinagem, o processo de furação se destaca por ser o mais utilizado na indústria de manufatura. De modo geral, uma boa porcentagem das peças é fabricada com pelo menos um furo, enquanto uma pequena parcela já vem com o furo advindo de outros processos na peça bruta, como fundição e forjamento [DINIZ et al., 2013]. Devido ao processo de furação ser enclausurado, onde o cisalhamento ocorre no interior da peça, há uma enorme dificuldade na refrigeração na zona de corte e na evacuação do cavaco, o que prejudica a usinabilidade, e consequentemente pode gerar na broca um desgaste prematuro ou sua quebra [CAMARGO, 2008]. Assim, uma maior compreensão dos parâmetros aplicados ao processo de furação em aços inoxidáveis superausteníticos poderia possibilitar o aumento da vida da broca ao reduzir as falhas na ferramenta resultantes do uso de condições de usinagem inadequadas, melhorando assim a usinabilidade do material [DUARTE, 2021].

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Processo de Furação

Dentre os processos de usinagem, a furação é o processo mais recorrente na indústria pela variabilidade de peças na linha de fabricação, sendo essa uma das operações com o maior tempo de *setup* (tempo necessário para ajuste da máquina) e tempo de execução, quando a mesma é comparada aos processos de torneamento e fresamento [DINIZ et al., 2013]. A furação é descrita como um processo de usinagem mecânico, da qual utilizando, geralmente uma broca helicoidal, ou outra ferramenta cortante, com o uso de um equipamento/ferramenta adequado ao processo, se obtém furos, normalmente cilíndricos, na peça desejada, sendo necessário ajustes dos parâmetros (movimentos de corte e avanço) no equipamento ou ponto que está fixada a peça [FERRARESI, 1970]. A Figura 1 mostra a geometria de uma broca helicoidal com dois canais.

Figura 1 – Arestas de corte e superfícies da parte de corte de uma broca helicoidal.



Fonte: Diniz et al. (2013).

A furação é um dos processos com maiores dificuldades na sua execução, fazendo dele um processo intrínseco, onde todos parâmetros de corte, matéria prima a ser furada e material da ferramenta de corte devem ser levados em consideração nos estudos e experimentos [DINIZ et al., 2013; KLOCKE, 2011]. Uma dessas peculiaridades é a dificuldade na geração e na remoção adequadas de cavacos, podendo atrapalhar a qualidade do furo. A dificuldade da penetração do fluido na zona de corte é um dos problemas mais frequentes observados no processo de furação, principalmente para máquinas e ferramentas que não possuem acesso à lubrificação interna, o que faz aumentar a temperatura consideravelmente na aresta de corte da ferramenta, ocasionando furos com acabamento inadequado e desgaste prematuro da ferramenta [CAMARGO, 2008].

Alguns parâmetros de corte com maiores influências no processo de furação são o avanço ( $f$ ) e a velocidade de corte ( $v_c$ ). Um aumento do avanço tende a aumentar a rugosidade do furo, pois a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar em proporção quadrática ao avanço. Além disso, tem-se o aumento das flexões geradas por esforços de usinagem (força de avanço e momento torçor) ou vibrações, aumentando o risco de falha na ferramenta [MACHADO et al., 2015]. Ao aumentar o diâmetro da broca, tem-se também um aumento destes esforços [DINIZ et al., 2013]. Em baixas velocidades de corte pode ocorrer a formação de aresta postiça de corte (APC), deixando a furação com um acabamento superficial ruim. Um aumento de  $f$  sob baixas  $v_c$  resulta em uma superfície ainda pior, atribuído ao tamanho da APC [MACHADO et al., 2015]. No processo de furação, a tendência é que ocorra a diminuição da velocidade da periferia para o centro da broca, o que está totalmente relacionado a velocidade de corte ser dependente do seu diâmetro. Com isso, a formação da APC próximo ao centro da broca nas furações em cheio (sem pré-furo) com refrigeração externa é quase que inevitável. É possível contornar a situação aumentando  $v_c$ ; porém, é preciso observar a ocorrência de desgastes acentuados em outras regiões da ferramenta [SOUZA, 2016].

## 2.2 Desgastes, Avarias e Fim de Vida da Ferramenta

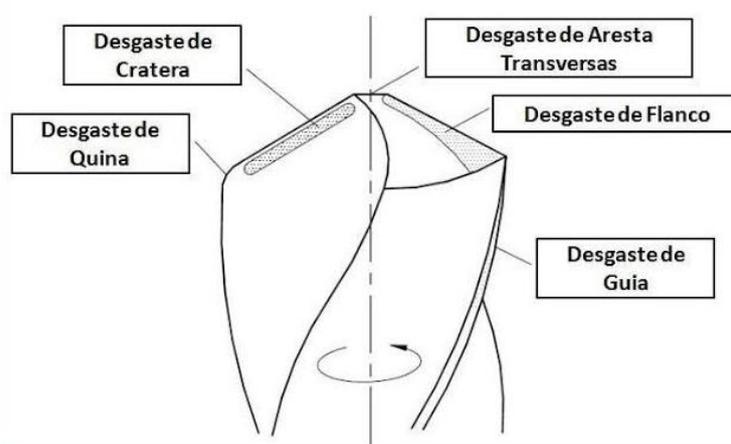
Quando as condições das arestas de corte de uma broca helicoidal mostram-se inviáveis para o processo de furação, tem-se a presença do desgaste (condição que ocorre quando a ferramenta perde material de forma constante na execução da furação), ou avarias, que também tornam a aresta inutilizável (essa condição ocorre quando a ferramenta perde material bruscamente de maneira repentina e inesperada, causado por trincas, lascamentos e quebra da aresta de corte) [MACHADO et al., 2015]. Em furações usando brocas pequenas, nas quais o diâmetro da broca é menor que 3 mm, e para furações profundas, onde o comprimento usinado é 2,5 vezes maior que o diâmetro da broca, pode haver a quebra da mesma. Isto frequentemente acontece devido à falta

de centralização da broca pelo fato de a broca ser pequena ou pelo travamento da broca na geração de cavacos nos furos profundos, gerando o cisalhamento da broca por torção e, conseqüentemente, o fim de vida prematuro da ferramenta [DINIZ et al., 2013].

Os critérios de fim de vida da ferramenta de corte são condições que impedem a continuidade da operação conforme condições preestabelecidas para os furos. Além dos desgastes e avarias, a rugosidade e a variação dimensional do furo também podem decretar o fim de vida da ferramenta de corte. O fim de vida está totalmente ligado à velocidade de corte ( $v_c$ ); o aumento dessa velocidade pode reduzir bruscamente a vida útil da ferramenta, aumentando a temperatura na zona de corte, e por consequência um aumento dos desgastes e avarias, até a quebra da broca ou sua inutilização [DINIZ et al., 2013; KLOCKE, 2011; MACHADO et al., 2015].

Um dos principais desgastes encontrados na ferramenta de corte é o desgaste de flanco. Este ocorre na superfície de folga da ferramenta, região que ocorre o contato entre a peça e a broca. O desgaste de flanco pode ser visualizado nas arestas principal e transversal de corte. Se monitorada de forma adequada, principalmente em condições em que se deseja um critério de fim de vida ou posterior reafiação da broca, a largura da marca de desgaste de flanco (VB) pode considerar valores menores que 0,3 mm. Outros desgastes com impacto direto no fim de vida e na qualidade dimensional dos furos são os desgastes na quina e nas guias das brocas que, se não monitorados adequadamente, podem apresentar dificuldade na extração do cavaco e impactos na qualidade do furo. Desgaste de cratera é devido ao atrito gerado na extração do cavaco logo na superfície de saída da broca em altas temperaturas (fonte de energia para a difusão) quando há afinidade química entre os materiais da ferramenta e da peça. E o desgaste na aresta transversal ocorre devido às baixas velocidades de corte naquela região, pois a velocidade corte diminuiu quanto mais próximo ao centro da broca; esse desgaste tem um efeito de auto afiação da aresta de corte, que logo é compensado pela formação de aresta postiça de corte (APC) devido a esta baixa  $v_c$  [AGAPIOU e STEPHENSON, 2013; DINIZ et al., 2013]. A Figura 2 mostra os diferentes tipos de desgaste que podem estar presentes em uma broca helicoidal.

Figura 2 – Tipos de desgastes na broca helicoidal.



Fonte: Adaptado de Agapiou e Stephenson (2013).

Avarias da aresta de corte (lascamentos; fissuras transversais e longitudinais; deformação plástica) são decorrentes de solicitações térmicas e mecânicas excessivas. Elevadas forças de corte podem levar a microlascamentos e lascamentos da aresta ou da quina, principalmente quando o ângulo de ponta (ou cunha) é pequeno ou o material da peça é frágil. Nestes lascamentos a linha de fissura é definida pela direção da força de corte. Interrupções de corte também podem provocar lascamentos, sobretudo na usinagem de materiais tenazes que apresentam cavacos que facilmente caldeiam ou soldam na face da broca. Microlascamentos ocorrem na usinagem de materiais duros e com inclusões duras. O material de broca mais susceptível a estes tipos de solicitações

localizadas é o metal-duro, principalmente nos processos com seções de usinagem muito pequenas (p. ex.: alargamento e brochamento) [SOUZA, 2016].

Lascamento é um tipo de avaria que pode ocorrer com frequência se os parâmetros e condições no processo de furação não forem controlados de forma adequada, ou seja, batimento radial elevado na broca, pouca lubrificação na região de corte, ou até mesmo desgastes já presentes e acentuados. Outras causas podem ser devido a classe da ferramenta ser frágil, a geometria da ferramenta inadequada e choques severos entre ferramenta-peça [DINIZ et al., 2013].

Durante a usinagem, a broca helicoidal encontra-se sujeita aos esforços axiais, de flexão e de torção. O torque necessário para a quebra da broca helicoidal é bem superior aos momentos que atuam durante a usinagem; porém, o desgaste da broca leva às oscilações do torque que ultrapassam o limite de resistência à fadiga da broca. Portanto, o lascamento ou a quebra da uma broca, normalmente ocorre devido ao esforço alternante ocasionado pelo desgaste da quina e da guia. Esta falha na broca também ocorre pela presença de APC, pois o material aderido à aresta de corte se deforma e encrua, aumentando sua resistência mecânica e fazendo as vezes de aresta de corte. Ela cresce gradualmente até romper-se bruscamente, promovendo o lascamento na região. Lascamento e quebra da aresta de corte também podem estar associados às fadigas térmica e mecânica. No primeiro caso, considerando a refrigeração externa, há um aumento de temperatura quando a aresta está na ação de corte. Como a refrigeração no fundo do furo é deficiente, quando a broca sai da peça, o fluido executa sua função, gerando um grande gradiente de temperatura. Se a ferramenta não tem tenacidade suficiente para resistir ao choque térmico, essa variação térmica pode causar a falha por fadiga. No segundo caso, quando a broca inicia o processo de furação, há um impacto na aresta de corte na entrada da ferramenta, fazendo as forças de corte subirem rapidamente, e após iniciar a furação, as forças variam conforme a direção e a geometria do cavaco. Estas oscilações podem causar a falha por fadiga mecânica [SOUZA, 2016; TSCHÄTSCH, 2009].

### **2.3 Aços Inoxidáveis Austeníticos**

Em geral, os aços inoxidáveis austeníticos são materiais considerados difíceis de usar devido à sua alta tendência ao encruamento, baixa condutividade térmica, alta ductilidade e alta tenacidade. A tendência ao encruamento para temperaturas acima de 700°C é devido à grande presença de níquel e cromo, ocasionando desgaste de cratera por difusão. Além disso, o encruamento superficial significa um aumento considerável de dureza superficial na região usinada, sendo fator prejudicial para processos com pequenos avanços. A baixa condutividade térmica levará a uma maior concentração de calor na região de corte, e conseqüente o desgaste da ferramenta. A alta ductilidade reflete na formação de cavacos longos, dificultando a sua extração de dentro do furo. Este cavaco pode enrolar, prejudicando o acabamento superficial do local usinado, ou trancar a ferramenta, promovendo o cisalhamento por torção e a quebra da ferramenta. Outro ponto a se destacar decorre de sua alta tenacidade à fratura, que aumenta a temperatura de contato cavaco/ferramenta, levando a um acabamento superficial inadequado e quebra de cavacos péssimo. Além disso, a formação de aresta postiça (APC) é presente mesmo em velocidades de corte elevadas. Isso agrava o acabamento da superfície usinada e aumenta as forças de corte [DINIZ et al., 2013; KLOCKE, 2011; NOMANI et al., 2013; SANTOS e SALES; 2007].

Dolinsek (2003) abordou a furação de aços inoxidáveis austeníticos AISI 321 (UNS-32100) e constatou que o encruamento no fundo do furo tem uma maior dependência do avanço em comparação à velocidade de corte devido ao maior grau de deformação plástica que cisalhamento. O autor cita ainda que se deve optar por um avanço (profundidade de corte para a aresta principal) maior que a profundidade da camada que foi endurecida abaixo da aresta, com objetivo de reduzir a resistência ao corte do material a ser furado, e diminuir o desgaste de flanco na broca. Outro ponto observado é que arestas de cortes afiadas reduzem o nível de endurecimento, o que significa que a furação eficiente exige a reafiação das brocas em intervalos mais curtos.

A Tabela 1 mostra a composição química do aço inoxidável superaustenítico Ultra® 904L em comparação aos aços 316L (austenítico) e DX 2205 (duplex).

Tabela 1 – Composição química do 904L em comparação ao 316L e ao 2205 (% massa).

Material	C	Cr	Ni	Mo	Cu	N	PRE
Ultra® 904L	0,01	19,8	24,2	4,3	1,4	-	34
Supra® 316L	0,02	17,2	10,1	2,1	-	-	24
Forta® DX 2205	0,02	22,4	5,7	3,1	-	0,17	35

Fonte: Outokumpu (2013)

O PRE é uma estimativa para a resistência à corrosão por pite. Entende-se que quanto maior o valor de PRE, melhores resultados para a resistência a esta corrosão. Valores superiores a 27% são satisfatórios para se utilizar em ambientes extremamente corrosivos. Para os aços inoxidáveis austeníticos, pode-se estimar PRE a partir da Equação (1) [ROBERGE, 2000]:

$$\text{PRE} = \% \text{Cr} + 3,3\% \text{Mo} + 16\% \text{N} \quad (1)$$

Segundo Roberge (2000), cerca de 25% das falhas em materiais expostos a ambientes corrosivos estão associadas à corrosão por pite. Dentre os fatores que influenciam neste tipo de corrosão, o acabamento da superfície da peça é o que depende de forma significativa do processo de usinagem. Na ação de corte, há o frequente contato entre a ferramenta e a peça, gerando ranhuras na superfície. Se essa interação for mal planejada (parâmetros de corte e/ou ferramenta), gerará um acabamento inadequado quando exposta aos ambientes corrosivos, pois irá causar uma redução de vida em fadiga da peça devido a um maior número de concentradores de tensão. Para evitar a formação de pite após a usinagem, o ideal é que se obtenha uma superfície lisa, sem depressões localizadas (difícil de se obter no processo de furação).

No processo de furação de aços inoxidáveis austeníticos, uma das alternativas para melhorar a usinabilidade deste material é através da aplicação de meios lubrificantes.

## 2.4 Meios Lubrificantes

Com o avanço da tecnologia na indústria, a busca pelo aumento da produtividade, redução de custo, impactos ambientais e saúde dos colaboradores têm fomentado a discussão nos processos de usinagem sobre os métodos lubrificantes, buscando melhores acabamentos superficiais, menores custos com a substituição de ferramental, e fluidos que não agredem o meio ambiente e a saúde. Os objetivos dos meios lubrificantes na usinagem são a redução do calor gerado no processo pela refrigeração da zona de corte, a lubrificação da região de contato entre a ferramenta e cavaco, reduzindo o coeficiente de atrito entre eles; conseqüentemente haverá redução da temperatura de corte, o que irá possibilitar um incremento dos parâmetros de corte. Além dessas duas funções primárias, a quebra e a expulsão adequadas dos cavacos da região de corte também deve ser considerada [DINIZ et al., 2013; TSCHÄTSCH, 2009].

Nos processos de furação, é necessário que o fluido de corte tenha boa propriedade lubrificante, além de baixa viscosidade, para facilitar a remoção dos cavacos pelos canais de saída da ferramenta [KLOCKE, 2011]. Em furos profundos e na furação de materiais com baixa usinabilidade, recomenda-se sempre que possível a aplicação do fluido pelos canais de lubrificação interna da broca (o fluido sai pela superfície de folga), pois há uma dificuldade na penetração desse fluido na região de cisalhamento visto que a ferramenta e a peça estão sempre em contato durante o corte [MACHADO et al., 2015]. A lubrificação interna também é aconselhável para evitar o trancamento do cavaco na região de corte, escoando-o para fora do furo,

e evitando a aderência do material na broca [SANDVIK, 2022]. No entanto, a aplicação interna requer máquina e ferramental adequado para a operação.

Alguns métodos de aplicação de meios lubrificantes são: em abundância ou jorro (FLOOD), com valores de vazão acima de 600 l/h; em quantidade reduzida (RQL), com vazões entre 1,0 a 10 l/h; em quantidade mínima (MQL), para valores entre 0,05 e 1,0 l/h; e pelo método de usinagem quase a seco (NDM) para vazões abaixo de 0,05 l/h. Os três últimos métodos (RQL, MQL e NDM) são aplicados através da pulverização da mistura do fluido de corte com gás (ar comprimido por exemplo) sob pressão na região de corte [TSCHÄTSCH, 2009].

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais e Equipamentos

Três ensaios comparativos de vida das brocas na furação do aço inoxidável superaustenítico foram realizados no centro de usinagem ROMI Discovery 308 localizado no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS/UFRGS). Esta máquina possui rotação máxima de 4000 rpm e potência máxima de 5,5 kW.

O corpo de prova utilizado é uma placa de aço inoxidável superaustenítico Ultra<sup>®</sup> 904L (AISI 904L, EN 1.4539, ASTM UNS NO8904), que possui teor de carbono muito baixo com elevados teores de liga. A placa adquirida através da empresa Megaligas – Inoxital possui dimensões de 445 x 253 x 13,4 mm com composição química certificada pelo fabricante do material [OUTOKUMPU, 2013] apresentada na Tabela 1. A placa supracitada foi subdividida em quatro chapas de 105 x 140 mm para os testes de desgaste e outros quatro pedaços de 100 x 100 mm para testes com medição de força e torque (sendo estes dados utilizados para trabalhos futuros). O corte foi realizado a laser com o objetivo de atender as limitações e dimensões de fixação na mesa do centro de usinagem, e também do dinamômetro.

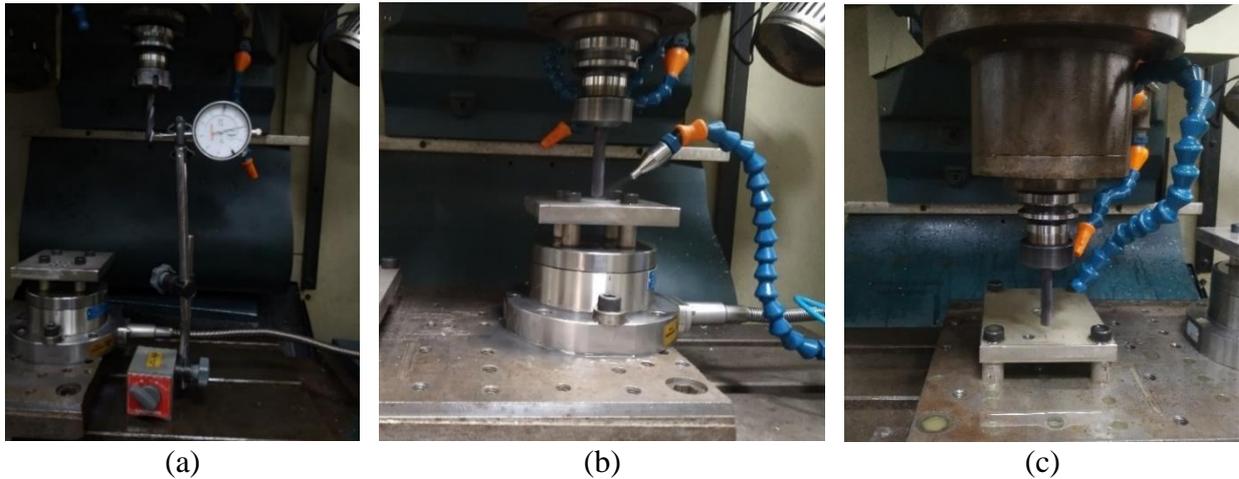
Três brocas helicoidais de metal-duro Kennametal, modelo KC7315, foram utilizadas nos ensaios. A broca possui 9 mm de diâmetro (D1), revestimento multicamadas de TiAlN (nitreto de titânio e alumínio) e aplicação interna de refrigeração. Outras dimensões geométricas conferidas no catálogo são o comprimento total de 89 mm, comprimento máximo de perfuração de 35 mm, diâmetro da haste de 10 mm, comprimento de ponta de 1,531 mm e ângulo de ponta igual a 140°.

Na aplicação de fluido em abundância (FLOOD) utilizou-se o biolubrificante isento de óleos Bondmann BD-Fluid B90 com diluição 1:20 a uma vazão máxima de 960 l/h. O nanofluido aplicado (NF-RQL) é constituído por flocos de multicamadas de grafeno (MLG) dispersos a uma concentração mássica de 0,025% (250 mg por litro) no fluido sintético integral à base de água Quimatic Jet [CARVALHO, 2018]. O NF-MLG foi aplicado externamente com o auxílio do Nebulizador IV (Quimatic-Tapmatic) a uma vazão de 2,0 l/h e pressão de 3 bar.

#### 3.2 Procedimento Experimental

O critério para o fim de vida foi definido pelo comprimento usinado devido às limitações do material de alto custo. Os corpos de prova cortados a partir da matéria prima foram fixados na mesa do centro de usinagem e no dinamômetro. A verificação do batimento radial das brocas foi realizado com um relógio comparador de base magnética apresentado na Figura 3a com resolução de 10 µm e exatidão de ±15 µm. Os valores verificados em todos experimentos ficaram abaixo de 10 µm. Após a fixação dos corpos de prova e a verificação do batimento radial da broca a distância e o ângulo foram ajustados conforme a aplicação de cada lubrificante. Para a aplicação do NF-RQL, o bico foi colocado a cerca de 20 mm de distância do corpo de prova e a 45° em relação a broca conforme Figura 3b, entretanto, pelo método FLOOD o bico foi colocado a cerca de 30 mm e 30° em relação a broca de acordo com a Figura 3c.

Figura 3 – Ajuste experimental: (a) batimento radial da broca; (b) ajuste do bico para condição RQL; (c) ajuste do bico para condição FLOOD.



Fonte: Autor (2022)

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de corte e os números totais de furos passante realizados para cada teste. Por fim, os resultados de vida foram avaliados e comparados entre si com o objetivo de investigar o desempenho e comparar o processo de furação do AISI 904L utilizando nanofluidos em quantidade reduzida (NF-RQL) com o fluido em abundância (FLOOD).

Tabela 2 – Parâmetros de corte e números de furos dos testes.

Ensaio	Condição	Rotação ( $n$ ) [rpm]	Velocidade de Corte ( $v_c$ ) [m/min]	Avanço ( $f$ ) [mm/volta]	Velocidade de Avanço ( $v_f$ ) [mm/min]
1	NF-RQL	840	23,75	0,12	100
2	FLOOD	840	23,75	0,12	100
3	FLOOD	1260	35,60	0,08	100

Fonte: Autor (2022)

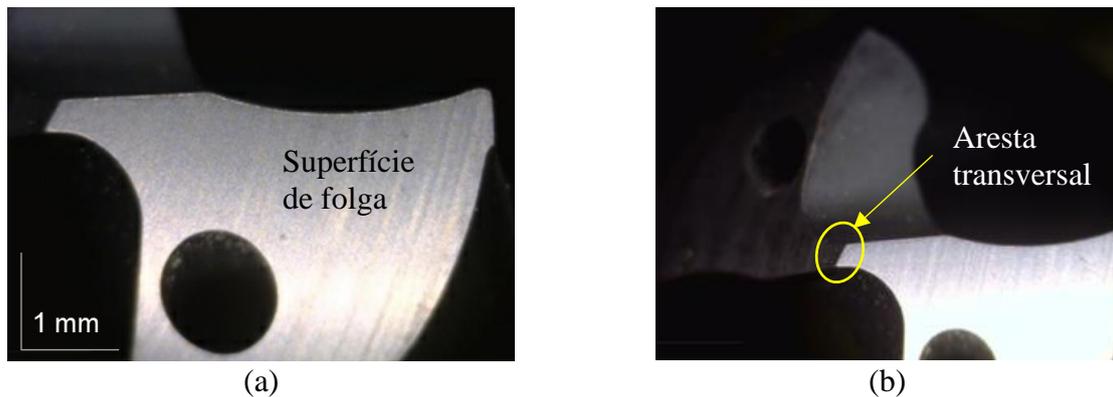
Os desgastes e avarias da broca foram registrados conforme Tabela 3 através do microscópio portátil digital USB Dino-Lite Pro modelo AM 413ZT com ampliação de 60x. Para registro e avaliação das imagens foi utilizado o software Dino-Lite. E para medição do VB, foi utilizado o software AutoCAD, onde as imagens processadas no software anterior foram inseridas e colocadas em escala dentro do programa. Após isso, iniciou-se a medição da largura do desgaste presente na aresta de corte e quina. A Figura 4 mostra as imagens da broca nova captada pelo Dino-Lite Pro modelo AM 413ZT.

Tabela 3 – Parâmetros de corte e números de furos dos testes.

Ensaio	Condição	Furos Registrados	Totais
1	NF-RQL	1, 2, 4 e 5	4
2	FLOOD	1, 5, 9, 14, 19, 24, 29, 34, 39, 44, 49, 54, 59 e 60	14
3	FLOOD	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, e 10	10

Fonte: Autor (2022)

Figura 4 – Perfil genérico da broca com aumento de 60x: (a) superfície de folga; (b) aresta transversal.



Fonte: Autor (2022)

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado a análise para os três ensaios de vida realizados com a ferramenta de corte (broca) e abordado os desgastes e avarias detectados durante o processo de furação. Ao longo de cada tópico será discutido os motivos que levaram aos parâmetros estabelecidos e os números totais de furos para ser finalizado cada teste.

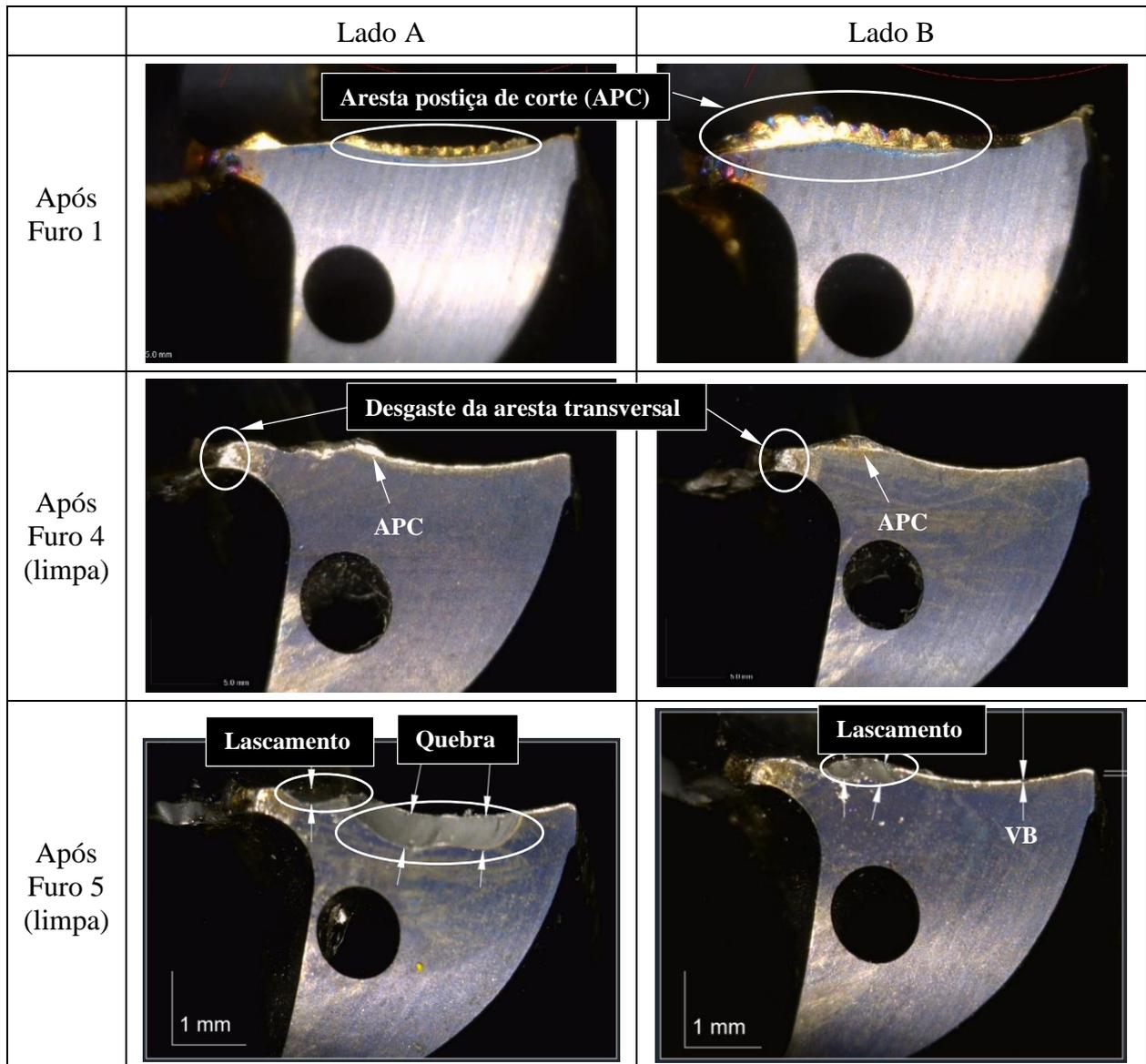
### 4.1 Ensaio 1 com Condição NF-RQL

No Ensaio de Vida 1 foram realizados somente 5 furos, totalizando um comprimento usinado de apenas 67 mm. Os parâmetros velocidade de corte ( $v_c$ ) e avanço ( $f$ ) estabelecidos neste teste foram de acordo com a recomendação do fabricante da ferramenta de corte. Após a execução do primeiro furo (Fig. 5) com NF-RQL, detectou-se a presença de APC na aresta principal de corte da broca, principalmente na região mais próxima da aresta transversal. Isso ocorreu devido  $v_c$  ir diminuindo a partir da periferia da broca até o centro da mesma, fator dependente do diâmetro e rotação da ferramenta de corte. Vale salientar que a broca apresentou APC após todos os furos executados, e o material aderido era removido manualmente para o registro das imagens e realização do próximo furo. Seguindo com as furações, é possível notar mais visivelmente o desgaste de flanco na broca, entretanto, com um valor de VB inferior a 0,1 mm. Além disso, tem-se o desgaste da aresta transversal de corte e/ou esmagamento da ponta da broca pela ausência de corte ( $v_c \cong 0$ ), outro fator implicante pode ser o avanço ( $f$ ) elevado para esse material. Após o furo 5, nota-se a presença de quebra e lascamento da aresta em ambos os lados, provavelmente devido ao arrancamento da APC e à falta de refrigeração na zona de corte.

Considerando a grande quantidade de calor sendo gerada na zona de corte, a pouca (ou nenhuma) refrigeração ao longo da profundidade de furação (por se tratar de vazão pequena), a dificuldade de dissipação do calor, e a baixa condutividade térmica, a maior parte do calor gerado na furação foi para o cavaco (Fig. 6) e uma parcela significativa deste calor foi para a ferramenta, fazendo com que a dureza a quente diminuísse, tornando-a mais susceptível a falhas. Essa grande quantidade de calor concentrada durante a furação pode ser comprovada pelo cavaco gerado na execução do furo 2 (Fig. 6a). A geração de cavacos descontínuos na execução do furo 5 (Fig. 6b), situação em que a ferramenta já se apresentava desgastada, provavelmente se deu pelas grandes tensões que arrancavam os cavacos do material ao invés de cisalhar os mesmos. Outro ponto a ser observado é a presença de grandes esforços aplicados a cada entrada da ferramenta na peça; pela fragilidade que a broca já apresentava pela condição térmica, os esforços contribuíram no aumento

das trincas e lascamentos, ocasionado a quebra da aresta de corte. Neste momento, considerou-se este o fim de vida da broca, pois a mesma com grandes lascamentos se torna inutilizável.

Figura 5 – Estado da broca durante o Ensaio de Vida 1 (NF-RQL).



Fonte: Autor (2022)

Figura 6 – Cavaco gerado durante o Ensaio de Vida 1: (a) após furo 2; (b) após furo 5.



Fonte: Autor (2022)

Na usinagem de materiais dúcteis aplicando  $v_c$  menores, o efeito lubrificante do fluido é fundamental para reduzir o atrito entre a peça e a ferramenta e entre a ferramenta e o cavaco. Isto reduz a ação da abrasão mecânica (minimiza os desgastes) e da adesão (evitar a formação da APC) [SOUZA, 2016].

#### 4.2 Ensaio 2 com Condição FLOOD

No Ensaio de Vida 2 foram realizados 60 furos, totalizando um comprimento usinado de 804 mm. Neste segundo teste foram mantidos os mesmos parâmetros de corte do teste anterior, apenas alterando a condição de lubrificação para fins comparativos. Analisando todos os furos, mesmo utilizando BD-Fluid B90 em abundância, notou-se a presença considerável de APC, mesmo estando o processo com uma maior lubrificação da broca comparado ao NF-RQL.

A grande espessura da chapa e a má formação do cavaco pode ser um fator limitador da presença desse fluido na zona de corte. Apesar disso, após limpeza manual da APC, é possível notar que não há avarias ou grandes marcas de desgastes (Fig. 7). Outro ponto interessante a se observar é uma deformação plástica, ou seja, esmagamento na ponta da broca.

Entre as execuções dos furos 49 e 54, nota-se que a broca apresentou avarias na aresta principal de corte. Em ambos os lados é possível ver lascamentos. Além disso, outro ponto interessante é a coloração mais escura na superfície de folga, inclusive cobrindo grande parte das marcas de atrito da superfície de folga com a peça. Isso pode ser caracterizado como adesão do material do corpo de prova na ferramenta de corte, visto que a velocidade de corte é baixa e o material usinado é muito dúctil.

Na execução do furo 60, os valores de VB mantiveram-se abaixo de 0,1 mm. Com receio de um maior lascamento ou quebra, o ensaio foi finalizado. Após este último furo, a broca foi colocada em um recipiente com uma solução de ácido clorídrico (10%) durante 12 h para realizar o ataque químico a fim de confirmar a adesão do material na broca. Após o ataque, a broca é limpa com álcool isopropílico. Com a peça limpa\*, foi possível visualizar nitidamente as marcas de atrito e as avarias na aresta de corte.

#### 4.3 Ensaio 3 com Condição FLOOD e Alta Rotação

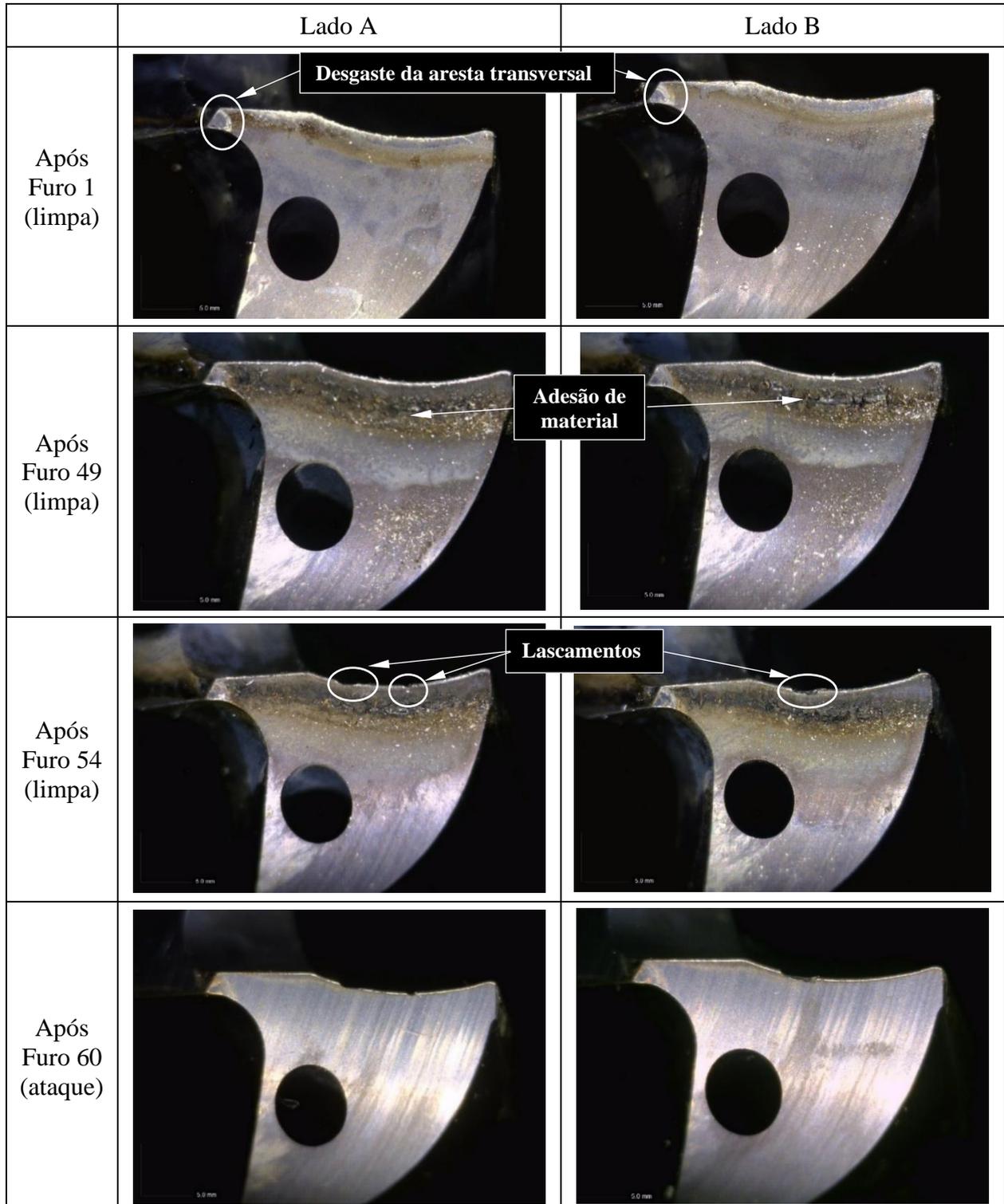
No Ensaio de Vida 3 foram realizados apenas 10 furos, totalizando um comprimento usinado de 134 mm. Neste último teste comparativo foi aplicado um aumento na rotação em 50% do valor inicial dos testes anteriores e mantida a velocidade de avanço fixa em 100 mm/min, realizando o experimento com lubrificação em abundância, a fim de comparar os resultados com os do Ensaio 2. Com esse aumento da rotação e consequente aumento da velocidade de corte e diminuição do avanço por volta, ocorreu uma redução de 83,3% na vida da ferramenta. Isto se deve pelo consequente aumento da temperatura na zona de corte combinado com a baixa condutividade térmica do material. Isso irá reduzir o limite de escoamento e a dureza da broca, fazendo com que haja um aumento nas taxas de desgastes e/ou avarias na ferramenta de corte.

Assim como nos ensaios de vida anteriores, notou-se a presença de APC na execução de todos os furos, mesmo neste caso com uma velocidade de corte mais alta. Assim, acredita-se que a minimização da APC só seria possível com a aplicação do lubrificante através dos canais internos da broca, o que não foi possível de executar por limitações do centro de usinagem ROMI Discovery 308. Além disso, verifica-se o material aderido de coloração escura na Figura 8, similar às imagens do Ensaio 2. Seguindo com a furação, após o furo 4, é visto a presença de uma avaria em forma de um pequeno lascamento em uma das duas arestas principais de corte. Isso já é um indício que a vida da broca será menor que o Ensaio 2 com rotação menor.

Dando continuidade nas furações, notou-se que a presença de APC agrava as avarias já presentes como o lascamento iniciado na broca. Após o furo 10, nota-se o aumento da área da avaria (lascamento na aresta de corte) e assim decidiu-se encerrar o ensaio. O ataque químico e

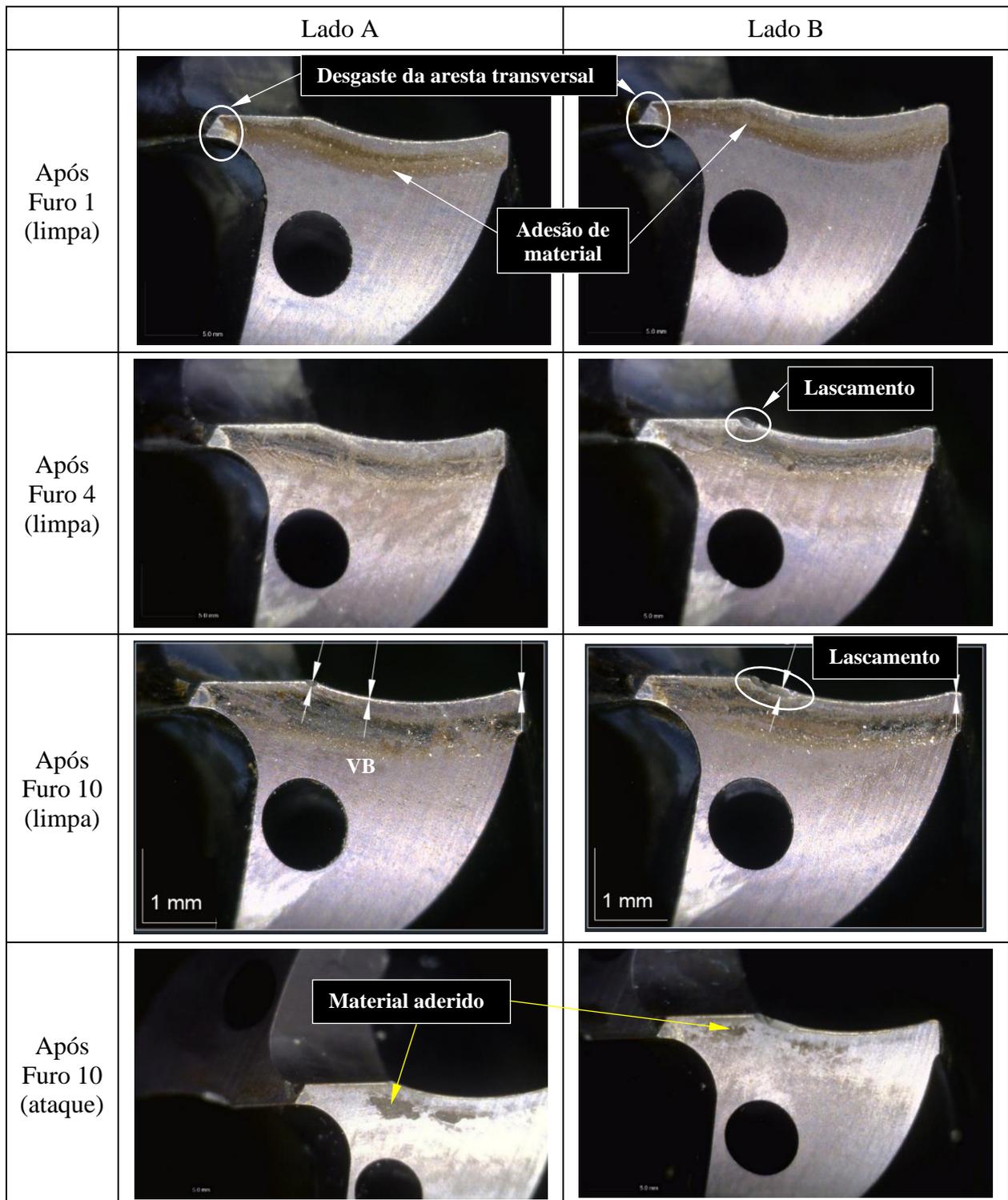
limpeza da broca 3 ocorreu da mesma forma que o da broca 2. Entretanto, analisada as imagens da figura 8, conclui-se que o tempo de ataque (12 h) não foi suficiente para remover todo o material aderido ou o revestimento de TiAlN da broca foi parcialmente removido. No caso, somente a análise via MEV/EDS poderia confirmar isso. Análise da Vida da Ferramenta.

Figura 7 – Estado da broca durante o Ensaio de Vida 2 (FLOOD).



Fonte: Autor (2022)

Figura 8 – Estado da broca durante o Ensaio de Vida 3 (FLOOD).

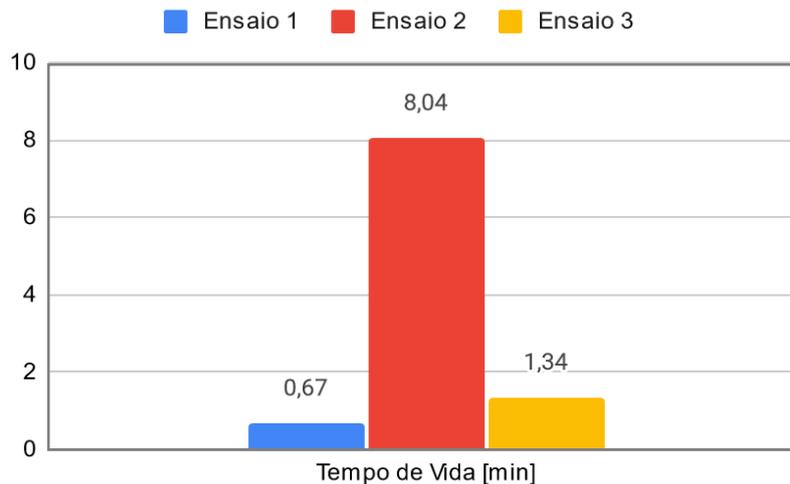


Fonte: Autor (2022)

A Figura 9 apresenta o gráfico comparativo do tempo de vida da broca de metal duro com revestimento de TiAlN na furação do aço inoxidável superaustenítico Ultra® 904L com aplicação externa de lubrificador refrigerantes. Nota-se que o maior tempo de vida (8,04 min) ocorreu no Ensaio 2 na condição com BD-Fluid B90 em abundância utilizando  $v_c = 23,75$  m/min e  $f = 0,12$  mm/volta. No Ensaio 3, ao incrementar  $v_c$  (35,6 m/min) e reduzir  $f$  (0,08 mm/volta) também com FLOOD, a vida da broca foi 1,34 min, ou seja, uma redução de 83,3% devido a ferramenta estar na presença

de temperaturas maiores, o que provavelmente causou perdas de propriedades mecânicas e químicas na broca. Durante o ensaio de vida, houve o arrancamento da APC, ocorrendo lascamento na aresta de corte da broca nos furos iniciais do Ensaio 3, como pôde ser visto a avaria após o furo 4 (Fig. 8). Nota-se que no Ensaio 2 também houve presença de APC mesmo com velocidades maiores (mas não o suficiente para minimizá-la); no entanto, só foi identificado lascamento após o furo 54. A aplicação de NF-RQL no Ensaio 1 não foi bem sucedida (apenas 0,67 min de vida) por causa da falta de refrigeração na zona de corte que impediu a retirada do alto calor gerado.

Figura 9 – Gráfico de colunas da vida da broca nos ensaios realizados.



Fonte: Autor (2022)

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados, é possível identificar o fim de vida prematuro da broca para condição NF-RQL (Ensaio 1), ocorrendo avarias severas, e no ensaio de vida com a condição FLOOD (Ensaio 2) mantendo os mesmos parâmetros de corte foi possível obter 12 vezes mais furos antes do aparecimento de lascamentos na aresta de corte, o que comprova a eficiência da lubrificação com fluido em abundância e a inviabilidade do uso em quantidade reduzida para os aços inoxidáveis superausteníticos (SASS).

Em outro estudo, dois ensaios de vida foram comparados entre si com a mesma condição de lubrificação (FLOOD), mas com um aumento de 50% na velocidade de corte (Ensaio 3). Em relação ao Ensaio 2, observou-se uma redução da vida da ferramenta de aproximadamente 83,3%. Essa redução do tempo de vida da ferramenta ocorre pelo aumento de temperatura na região de corte, permitindo de forma acelerada a presença de desgastes e avarias.

A formação de aresta postiça de corte nos três ensaios de vida e adesão do material do corpo de prova nas superfícies de folga das brocas 2 e 3 estão relacionados à velocidade de corte e à lubrificação na região de corte. Em velocidades de corte baixas, como os utilizados nesses ensaios, a influência do lubrificante do fluido é essencial para reduzir o atrito presente na interface da peça-flanco da ferramenta e na interface do cavaco-face da ferramenta, o que não ocorreu nesses ensaios, pois a aplicação externa desse fluido fica concentrado apenas na parte inicial da furação, com pouco acesso da parte lubrificante zona de corte a medida que avança a furação, o que facilitará a adesão do material na ferramenta. Além disso, o decréscimo de velocidade mais próximo ao centro da broca e as altas temperaturas no momento da furação ao longo da profundidade, devido a mínima penetração do fluido para refrigeração, propicia a formação de APC em diferentes regiões das arestas. Para reduzir a presença de APC e adesão em  $v_c$  baixas, é aconselhável aumentar a lubrificação na zona de corte ao longo da furação, isto é possível

através da aplicação interna a broca, pois o fluido estaria diretamente na zona de corte, refrigerando-a, haverá uma redução de temperatura nas arestas e nos cavacos. E devido as propriedades lubrificantes do fluido de corte, haverá a lubrificação nas interfaces de contato da ferramenta com o material e o cavaco, diminuindo o atrito e conseqüentemente a aderência do material usinado na broca (formação de APC), o que conseqüentemente aumenta a vida útil da ferramenta. A lubrificação interna também evita o trancamento do cavaco na região de corte e a aderência do material na broca.

Nos três ensaios houve a presença de desgaste da aresta transversal de corte devido a baixas velocidades de corte e avanço elevado. Esta aresta fica próxima ao centro da broca; com  $v_c$  quase nula, ao iniciar a furação, o material da peça é esmagado pela ferramenta ao invés de cisalhado (ocorre deformação plástica da aresta), contribuindo para a perda da centralização do furo e aumento da vibração. Para evitar o desgaste da aresta transversal, é recomendado a realização de furo de centro, evitando furação em cheio. O aumento de velocidades de corte e a redução do avanço também são recomendados. Porém, a vida diminui como constatado nos Ensaios 2 e 3.

## 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como continuidade para este trabalho, sugere-se:

- Avaliar os esforços de corte (força de avanço e momento torsor) medidos durante a experimentação e relacionar com os desgastes e avarias dos ensaios.
- Avaliar os demais cavacos gerados durante o ensaio.
- Avaliar a rugosidade dos furos.
- Replicar o estudo aplicando lubrificação interna a broca, e compará-los com esses resultados.

## REFERÊNCIAS

- AGAPIOU, J., STEPHENSON, D.A. “Cutting Tool Wear and Failure Mechanisms”. *Encyclopedia of Tribology*, 661–77. Boston, MA: Springer US, 2013. [http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5\\_605](http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_605).
- CAMARGO, R. “Verificação da Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis Austeníticos através do Processo de Furação”. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- CARVALHO, A.C.S. “Análise da Furação do Aço Inoxidável AISI 304 com a Aplicação Externa de Nanofluidos em Quantidade Reduzida”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.
- DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. “Tecnologia da usinagem dos materiais”. Artliber Editora, São Paulo, 8a ed., 2013.
- DOLINSEK, S. “Work-hardening in the drilling of austenitic stainless steels”. *Journal of Materials Processing Technology* 133 (2003) 63–70.
- DUARTE, J.D.C. “Estudo sobre o Torneamento de Aços Inoxidáveis”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.
- FERRARESI, D. “Fundamentos da usinagem dos metais”. Blucher, São Paulo, 1970.
- KLOCKE, F.; “Manufacturing Processes 1, Cutting”, Berlin, Springer-Verlag, 2011

- MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; SILVA, M.B. **“Teoria da Usinagem dos Materiais”**. Editora Blucher, São Paulo, 3a ed., 2015.
- NOMANI, J.; PRAMANIK, A.; HILDITCH, T.; LITTLEFAIR, G. **“Machinability study of first generation duplex (2205), second generation duplex (2507) and austenite stainless steel during drilling process”**. *Wear* 304 (2013) 20–28.
- HAN, Y., Liu, G., Zou, D., Liu, R., Qiao, G., (2013) **“Deformation behavior and microstructural evolution of as-cast 904L austenitic stainless steel during hot compression”**. *Materials Science & Engineering: A*, Vol.565.
- OUTOKUMPU. **“Handbook of stainless steel”**. [S.I.: s.n.], 2013.
- ROBERGE, P. R. **“Handbook of Corrosion Engineering”**. Editora McGraw-Hill Handbooks, New York, USA, p.1-54, 2000.
- SANDVIK **“Problemas e soluções para desgaste em furação”**. Sandvik Coromant. <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/drilling/pages/drilling-wear-and-troubleshooting.aspx>,.2022, Acesso em: 25-04-2022.
- SANTOS, S. C., SALES, W. F. **“Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais”**. Artliber, São Paulo, 2007.
- SOUZA, A. J.; **“Processos de Fabricação por Usinagem”**, DEMEC-UFRGS, Apostila, 2016.
- TSCHÄTSCH, H. **“Applied Machining Technology”**. Springer, 8a ed., 2009.