

MARCÍLIA BATISTA DE AMORIM FINZI

**Estudo do desempenho lubri-refrigerante de fluidos de
corte submetidos a biodegradação microbológica**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2017

MARCÍLIA BATISTA DE AMORIM FINZI

Estudo do Desempenho Lubri-refrigerante de Fluidos de Corte Submetidos a Biodegradação Microbiológica

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTORA EM ENGENHARIA MECÂNICA**. Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Rosineide Marques Ribas

Uberlândia - MG

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

F516e Finzi, Marcília Batista de Amorim, 1978-
2017 Estudo do desempenho lubri-refrigerante de fluidos de corte
 submetidos a biodegradação microbológica [recurso eletrônico] /
 Marcília Batista de Amorim Finzi. - 2017.

 Orientador: Álisson Rocha Machado.
 Coorientadora: Rosineide Marques Ribas.
 Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
 Modo de acesso: Internet.
 Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.3010>
 Inclui bibliografia.
 Inclui ilustrações.

 1. Engenharia mecânica. I. Machado, Álisson Rocha, 1956-
(Orient.). II. Ribas, Rosineide Marques, 1974- (Coorient.). III.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
 MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
 UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



ATA DE DEFESA DE TESE
NÚMERO DE ORDEM: 214
DATA: 17/02/2017

Às oito horas do dia dezessete de fevereiro de dois mil e dezessete, na Sala 313 - Bloco 1M, Campus Santa Mônica, reuniu-se a Banca Examinadora composta pelos Professores Dr. Álisson Rocha Machado (orientador), Dr. Paulo Pinto Gontijo Filho e Dr. Wisley Falco Sales, da Universidade Federal de Uberlândia, Dr. Carlos Augusto Henning Laurindo, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, e Dr. Eduardo Carlos Bianchi, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”/Campus Bauru, para, sob a presidência do primeiro, desenvolver o processo de avaliação da tese intitulada “*Estudo do Desempenho Lubri-refrigerante de Fluidos de Corte Submetidos a Biodegradação Microbiológica*”, apresentada pela aluna **MARCÍLIA BATISTA DE AMORIM FINZI**, matrícula número **11213EMC009**, em complementação aos requisitos determinados pelo Regimento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para obtenção do título de Doutora. Após discorrer sobre seu trabalho, a candidata foi arguida pelos membros da Banca, diante das comunidades universitária e externa. Em seguida, a tese foi avaliada em seção privada pelos membros da Banca que, ao encerrar o processo, consideraram-na:

- () Aprovada
 () Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação do orientador
 () Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação da banca
 () Reprovada

conferindo à aluna, em caso de aprovação, o título de Doutora em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação; Linha de Pesquisa: Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem). As demandas complementares observadas pelos examinadores deverão ser satisfeitas no prazo máximo de 60 dias, para dar validade a esta aprovação. Para constar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelo presidente e demais membros da Banca.

Assinaturas:

Prof. Dr. Álisson Rocha Machado (orientador)

UFU

Prof. Dr. Paulo P. Gontijo Filho

UFU

Prof. Dr. Wisley Falco Sales

UFU

Prof. Dr. Carlos Augusto Henning Laurindo

PUCPR

Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

UNESP/Bauru

Uberlândia, 17 de fevereiro de 2017

*Este trabalho é dedicado ao melhor
“pedaço” de mim... Lucca.*

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”

Oliver Wendell Holmes

“Algo só é impossível até que alguém duvide e acabe provando o contrário”

Albert Einstein

“Seja a mudança que você quer ver no mundo”

Mahatma Gandhi

AGRADECIMENTOS

Não é por acaso que as pessoas se desencontram e reencontram-se de si mesmas, em relação a outros e em relação as experiências de vida. Para esta vida, agradeço incansavelmente a Deus por todos os desencontros e reencontros, todas as frustrações e êxitos, e demais circunstâncias nas quais fui colocada a prova, pois elas me levaram ao meu grande reencontro, nas questões: espiritual, pessoal e principalmente profissional/vocacional. Felizmente, nada é perdido, tudo é somado, e neste ciclo de constantes reaproveitamentos e renovações de nós mesmos, consolidamos quem somos, sempre mais maduros e fortes. Entendo e aceito toda a preparação que recebi para chegar neste momento de exorbitante felicidade.

Ao meu querido orientador, presto essa singela homenagem... Gostaria muito de agradecer aos “céus” por tropeçar em seu caminho... ufa! Foi mesmo providencial que eu tivesse acesso a esse ser humano, com tantas qualidades somadas, algo inédito para mim. Mas posso dizer que aliar competência, inovação, gosto pelo desafio, sem medir esforços para ultrapassar as dificuldades (que são muitas...) buscando atingir os mais elevados objetivos (seus e dos outros) com o coração imenso que possui é um “feito” (se é que posso chamar assim) para poucos. Nem me atrevo a definir essa pessoa que chamo de orientador oficialmente, mas que no meu coração se tornou um grande amigo. Parabenizo-o por tudo que és e que fazes e concordo com Deus: mereceste cada conquista que obtivera na vida pois distribuistes excelência por toda parte onde caminhastes. Ter sido sua orientada de doutorado foi um grande presente que a vida e Deus me deu. Muito obrigada!

Aos meus amados pais Joana e Valdemar meu MUITO OBRIGADA! Não existem palavras em meu restrito vocabulário para definir vossas grandezas. O meu coração é repleto de amor e agradecimentos por ambos. Eu vos entrego essa conquista como um presente meu. Por favor tomem posse de seu mais novo diploma: somos bi-doutores!!!

Ao meu filho,

Não encontrarei alguém nesta existência terrena que tenha motivado mais as conquistas da mamãe do que você. A sua vida é uma saudação amorosa a minha e me faz florir, sorrir e amar gratuitamente a todos e a tudo. O seu amor me constrói e o meu amor por você me faz mover a maior de todas as montanhas. Por você e para você.

Minha inesgotável fonte da vida...
És inspiração infinita para os meus dias!

Meu esposo,

O que posso dizer a você sobre mais essa conquista? Você estava lá quando eu dei os primeiros passos nesse caminho... há tantos anos... em tantos agora... (risos). Fostes a fagulha que iniciou toda a chama que hoje queima em minha mente e em meu coração. Homenagear você aqui é para lhe agradecer por me mostrar esse mundo maravilhoso de grandes possibilidades. A ti envio o meu respeito, minha gratidão e o meu amor.

Agradeço às minhas amadas irmãs e sobrinhas: Débora, Geórgia, Bárbara e Laura! Pessoa de sorte sou eu por tê-las em vínculo de família, luz e muito amor.

Aos meus demais familiares, em todos os planos da existência divina, divido com vocês e dedico a vocês também essa conquista. Também por vocês me arrisco em ações, para colher os frutos da alma que nossos ancestrais um dia plantaram no mundo, em nós e para nós.

A minha co-orientadora Prof^a. Dr^a. Rosineide Marques Ribas (fada madrinha!) pelo apoio incondicional na realização do trabalho. Uma grande e querida amiga que ganhei ao longo de toda essa jornada.

Gostaria de prestar minhas homenagens aos Professores: Dr. Márcio Bacci, Dr. Rosemar Batista da Silva, Dr. Carlos Alberto Gallo, Dr. Washington Silva Martins, Dr^a. Henara Lilian Costa, Dr. José Daniel Biasoli de Mello, Dr^a Rosenda Valdes Arencibia, Dr. Alberto Arnaldo Raslan, Dr. Gilmar Guimarães, Dr. Sinésio Domingues Franco pelos preciosos ensinamentos. Tive vivências ímpares e muito especiais com cada um de vocês. Agradeço por cada minuto de suas vidas/precioso tempo que foram dedicados à minha orientação e formação neste caminho. Não apenas pelo fato de aprender suas valiosas lições, mas também pelo apoio, motivação e amizade, cada um a sua majestosa maneira. Cada um a compartilhar com magnificência o amor pelo que fazem.

Aos Professores, Dr. Enio Pedone Bandarra Filho e Dr. Paulo César Soares Jr. assim como suas respectivas doutorandas Letícia e Luciane, sem vocês não seria possível realizar alguns

dos principais ensaios desse estudo. Também agradeço ao Laboratório de Parasitologia em especial ao Prof. Júlio Mendes e ao Técnico Marcelo pelos mesmos motivos.

Minhas homenagens e especialíssimo agradecimento a Luciene Valente Gomes Perini pelo grande acolhimento e enorme torcida. Nossos corações batem na mesma sintonia.

Minhas homenagens aos técnicos: Ângela Andrade, Cláudio Nascimento, Cristiane Brito, Lázaro Vieira, Reginaldo, Passarinho, Diandro Bailoni, Eurípides Alves, Thiago Pereira, Thiago Menezes por todos os esforços dispensados na realização deste trabalho, pela paciência, pela dedicação ao que fazem, como também pelo acolhimento e amizade.

Foi muito importante tudo que viveram comigo e tudo que vivi com vocês. Obrigada a todos vocês pela “misturinha boa” de grandes emoções... do fracasso ao sucesso nas bancadas dos laboratórios, nas disciplinas e nas salas de estudantes, pois tendo vocês ao meu lado, minhas dores com certeza foram minimizadas e minhas alegrias multiplicadas. Obrigada: Juliana Martins, Nayara Akegawa, Bruno Cândido, Lisandra, Deborah Oliveira Almeida, Janaina Pereira, Flávia, Mauro Paipa, Marcelo Nascimento (in memoriam), Antônio Vitor, Cleudes Guimarães, Armando, Jairo de A. Montalvão, Déborah de Oliveira, Victor Rubin, Arthur, Patrícia, Danúbia, Lindolfo, Carla, João, Matheus, Álisson, Luciano Fernandes, André Grub, André Resende, Janaina Geisler, Daniel Cunha, Roberto Reis, Alcione dos Reis, Waléria, Saimon Vendrame, Ivanilson Costa, Ricardo, José Aécio, Hélio dos Santos, Antônio, Ricardo, Danilo, Matheus Raphael, Alejandro, Igor Cesar, Aline Elias, Mariana Landim, Maksym Ziberov.

Aos integrantes da banca pela honrosa presença e aceite: Prof. Dr. Paulo P Gontijo Filho, Prof. Dr. Wisley Falco Sales, Prof. Dr. José Carlos Nunes Barreto, Eduardo Carlos Bianchi, Carlos Augusto Henning Laurindo.

À empresa Villares Metals S. A. pelo inestimável suporte a essa pesquisa, assim como pelo excelente relacionamento com a equipe de pesquisadores, muito obrigada!

Aos órgãos de fomento CNPq, CAPES, FAPEMIG e a coordenação do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica por viabilizarem o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço ainda a todas as pessoas envolvidas direta ou indiretamente neste trabalho, pois honoríficas foram suas contribuições.

Amorim-Finzi, M. B. **Estudo do desempenho lubri-refrigerante de fluidos de corte submetidos a biodegradação microbiológica**, 2017, 255 f., Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.

RESUMO

Quase todas as etapas de transformação dos metais envolvem Fluidos de corte (FCs), tornando-os onipresentes em todos os tipos de indústrias dedicadas ao corte de metais. Eles influenciam a geração de calor nos processos de usinagem, reduzindo o coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco/peça e proporcionam refrigeração pela dissipação do calor gerado tanto por condução quanto por convecção. Suas propriedades lubri-refrigerantes, contribuem para a prevenção de dano térmico ao material da peça de trabalho e reduzem o desgaste da ferramenta de corte, melhorando o desempenho do processo. Além disso, oferecem proteção ao sistema no qual circula, à peça e à ferramenta contra oxidação/corrosão. Porém, apesar de tantos benefícios, quando contaminados por microrganismos, causam danos ao homem, ao meio ambiente e à própria indústria, que passa a lidar com prejuízos causados pela perda de sua eficiência técnica na produção, aumento de custos com descarte precoce, tratamento de resíduos tóxicos e afastamento de operadores de máquinas. Neste estudo, o desempenho de dois fluidos de corte (um de base vegetal emulsionável e um de base mineral semissintético), preparados em quatro concentrações (3, 5, 8 e 10%), foram testados para determinar o comprometimento das propriedades: físico-químicas, lubrificantes, refrigerantes e anticorrosivas, após contaminação microbiológica por sete e setenta dias, totalizando 24 amostras de fluidos. Foram realizados ensaios físico-químicos (pH, viscosidades dinâmica e cinemática, massa específica, condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico e ângulo de contato com uma superfície metálica – ensaio de molhabilidade), para caracterização das propriedades intrínsecas ao fluido. As propriedades de desempenho lubrificante e refrigerante foram determinadas nos ensaios tribológicos (esclerometria pendular e desgaste por deslizamento (*reciprocating*)) assim como nos ensaios de usinagem (processo de furação e de torneamento) e de obtenção da curva de resfriamento. Também foram realizados ensaios específicos para determinação das propriedades anticorrosivas. Os resultados mostraram três possibilidades para esses dois fluidos de corte, quando contaminados por microrganismos por sete e setenta dias: em algumas concentrações a contaminação microbiológica piorou as propriedades físico-químicas, de lubrificação e de refrigeração dos fluidos, melhorando ou mantendo-se estável em outras. Em todos os casos esses efeitos foram quantificados e analisados. Entretanto, a redução da propriedade anticorrosiva foi comprovada para os dois fluidos, sendo mais intensa após contaminação microbiológica por setenta dias, com maior agravamento para o de base mineral. Este estudo conseguiu determinar o efeito nocivo da contaminação microbiológica para o processo de usinagem e mesmo que alguns parâmetros tenham sido determinados em favor da presença dos microrganismos, são necessários maiores estudos para dosar, baseado em sua presença inevitável no fluido de corte, a carga microbiana/espécie/nutrientes/competição e simbiose/ inovação tecnológica/biocompatibilidade/desempenho (fluido e do microrganismo) /tipo de resíduo gerado quando do descarte/ tratamento desse resíduo, dentre outros parâmetros, que em conjunto e perfeitamente alinhados possam favorecer tanto o processo de usinagem e produção como um todo, quanto as desejadas propriedades do fluido, garantindo assim a segurança ao tripé que o suporta (indústria/operador/meio ambiente), na aplicação, manipulação, monitoramento e descarte do mesmo.

Palavras chave: fluidos de corte contaminados, alterações das propriedades físico-químicas, desempenho lubri-refrigerante, desempenho anticorrosivo, biodegradação microbiológica.

Amorim Finzi, M. B. **Evaluation of performance lubricant, coolant and anti-corrosive of cutting fluids subjected to microbial biodegradation**, 2017, 255 f., Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.

ABSTRACT

Almost all stages of metal transformation involve the use of a cutting fluids (CFs), making them ubiquitous in all types of industries dedicated to cutting of metals. They influence heat generation in the machining processes by reducing friction between the tool and the chip / workpiece and provide cooling by dissipating the heat generated by both conduction and convection. Their lubri-cooling properties contribute to the prevention of thermal damage to the workpiece material and reduce the wear of the cutting tool, improving the process performance. In addition, they provide protection to the system in which they circulate, to the workpiece and to the tool against oxidation / corrosion. However, in spite of the many benefits, when contaminated by microorganisms, they cause harm to human, the environment and the industry itself, which loses money caused by the reduction of its technical efficiency in production, early disposal, treatment of toxic waste and days off due to illness of machine operators. In this study, the performance of two cutting fluids (an emulsion of vegetal base and a semi-synthetic of mineral base), in four concentrations (3, 5, 8 and 10%) were tested to determine the compromise of physical-chemical, lubricant, coolant and anticorrosive properties after seven and seventy days of microbiological contamination, totaling 24 fluid samples. Physical-chemical tests (pH, dynamic and kinematic viscosities, specific mass, thermal conductivity, thermal diffusivity, specific heat and contact angle with a metal surface - wettability test) were carried out to characterize the intrinsic properties of the fluids. The lubricant and coolant performances were determined in tribological tests (pendular sclerometry and reciprocating) as well as in machining tests (drilling and turning processes). Specific tests were also carried out to determine the cooling ability and the corrosion properties. The results showed three possibilities for these two cutting fluids when contaminated by microorganisms for seven and seventy days: in some concentrations the microbiological contamination worsened the physico-chemical, lubrication and cooling properties of the CFs, improving them or remaining stable in other concentrations. In all the cases these effects were quantified and analyzed. However, a reduction of the anticorrosive property was verified for the two CFs, being more intense after microbiological contamination by seventy days, with greater aggravation for the mineral base. This study was able to determine the harmful effect of the microbiological contamination for the machining process, even though in some parameters this contamination improved the results. Thus, considering its unavoidable presence in the cutting fluids, further studies are necessary to better determine the microbial load / species / nutrients / competition and symbiosis / technological innovation / biocompatibility / performance (fluid and microorganism) / type of waste generated when discarding / treating this waste, among other parameters. All of them isolated and together must be harmonically aligned, so that they can favor both the machining process and production as a whole, as well as the desired properties of the fluid, thus ensuring the necessary safety to the sustainability tripod that supports it (industry / operator / Environment), in their manufacture, application, manipulation, monitoring and disposal.

Keywords: cutting fluid, microbiological contamination, lubrication and cooling performance,

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
BHI	Brain Heart Infusion
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DIN	<i>Deutsches Institut für Normun</i>
EP	Extrema Pressão
f	Avanço
F_c	Força de corte
F_f	Força de avanço
FC	Fluido de Corte
h	coeficiente de troca de calor por convecção
HB	Dureza Brinell
HSS	<i>Aço rápido</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
LVDT	Transformador diferencial variável linear
MQF	Mínima Quantidade de Fluido
MQF	Mínima quantidade de fluido
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira
P.A.	<i>Pro Analyse</i>
pH	Potencial hidrogeniônico
Ra	Rugosidade média aritmética
UFC	Unidade Formadora de Colônia
VB_B	Desgaste de flanco médio
$VB_{Bmáx}$	Desgaste de flanco máximo
kg	kilograma
m	metro
mm	milímetro
h	hora
min	minutos

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Retífica utilizada em ambiente familiar, para afiar facas, semelhante aos desenhos de Leonardo da Vinci.....37
- Figura 2.2 - Máquinas-ferramenta projetadas para fabricar grandes peças (McCOY, 2006).....38
- Figura 2.3 - História do desenvolvimento dos fluidos de corte (adaptado de BRINKSMEIER et al., 2015).....41
- Figura 2.4 - Distribuição do calor entre peça, ferramenta e cavaco (Teixeira, 2001).....43
- Figura 2.5 - Representação da afinidade natural de óleos polares (base vegetal) em superfícies metálicas e a maneira que as moléculas se alinham. Essa estrutura cria um filme lubrificante mais forte do que as de óleos não polares.....47
- Figura 2.6 - Diagrama de reação triboquímica: v , velocidade da reação; t , tempo; AB, reação na superfície “bruta”; BC, fase de crescimento com o início do atrito; CD, fase estacionária de reação; DE, diminuição da reação após o termino do atrito (passivação superficial); F, momento da divisão das superfícies pelo corte; FG, fase de acesso complicado para o fluido; G, momento de separação completa do cavaco com a ferramenta; GH, fase de passivação da superfície do cavaco (ASTAKHOV, 2012).....50
- Figura 2.7 - Sistema tribológico observados em processos de usinagem e conformação que assume interações físicas e químicas entre seus componentes (BRINKSMEIER et al., 2015).....51
- Figura 2.8 - Esboço esquemático de uma superfície usinada incluindo formas de interação assumidas pelos aditivos contendo enxofre (FORBES; REID, 1970; BRINKSMEIER; WALTER, 2000; BUCKLEY, 1982; BRINKSMEIER et al., 2015).....52
- Figura 2.9. - Perfis de energia potenciais para a fisiossorção e quimiossorção de uma molécula. P é a entalpia de fisiossorção e C que por quimiossorção é apresentado em (A) sem energia de ativação e em (B) com a energia de ativação, simplificada de acordo com Atkins e de Paula (2009).....53
- Figura 2.10 - (a) Cálculo do ângulo de contato θ de uma gota séssil de acordo com (GLEICH, 2004), (b) medição do ângulo de contato: imagens de gotas (óleo de base /

	surfactante / água) em uma superfície polida de aço AISI 1015 (CAMBIELLA et al., 2007).....	56
Figura 2.11 -	Ilustração esquemática de tensão superfície dependente da temperatura em líquidos (aqui: uma gota em uma superfície sólida).....	58
Figura 2.12 -	Conceito envolvendo necessidades e exigências do mercado na formulação de um fluido de corte.....	62
Figura 2.13 -	Tipos de bases oleosas/sintéticas utilizadas nas formulações de FCs (adaptado BRINKSMEIER et al., 2015).....	64
Figura 2.14 -	Classificação dos FCs de acordo com a norma DIN 51385 (simplificada).....	66
Figura 2.15 -	Evolução histórica do consumo de fluidos de corte durante o século 20.....	67
Figura 2.16 -	Micela de emulsão óleo em água (adaptado de HARKINS; MATTOON; CORRIN, 1946; ROSSI et al., 2007; BERGSTRÖM, 2015; BRINKSMAYER, 2015).....	70
Figura 2.17 -	Principais métodos de aplicação de FCs.....	76
Figura 2.18 -	(A) Corrosão Microbiologicamente induzida (CMI) por (b) bactérias que formam substâncias poliméricas extracelulares (EPS) e biofilmes na superfície (ORTIZ; GUIAMET; VIDELA, 1990).....	79
Figura 2.19 -	Variação da concentração dos aditivos de um FC em função do tempo (BYERS, 2006).....	80
Figura 2.20 -	Formação de N-nitrosaminas pela reação entre amina secundária (NAU; STEINBERG; KIETZMANN, 2003).....	81
Figura 2.21 -	Mecanismos de estabilização de emulsões.....	84
Figura 2.22 -	Frequência do tamanho das gotículas em proporção (f (x) em% / µm) indicando a distribuição do tamanho das gotículas e o comportamento de envelhecimento de uma emulsão.....	86
Figura 2.23 -	Fluidos de corte a) vegetal novo recém diluído, b) mineral novo recém diluído, e após biodegradação por 70 dias c) vegetal e d) mineral (AMORIM-FINZI, 2015).....	87
Figura 2.24 -	Influência da carga microbiana na qualidade técnica de FCs e desgaste da ferramenta na furação (MEYER, 2011).....	88
Figura 2.25 -	Classificação dos microrganismos de acordo com sua sensibilidade aos biocidas (adaptado de Russell et al. (1997) e Maillard (2002)).....	95

Figura 2.26 -	Estrutura da parede celular externa de a) bactérias Gram-negativas; b) bactérias Gram-positivas e c) micobactérias (adaptado de MAILLARD, RUSSELL, 2000).....	96
Figura 2.27 -	Respiração dos microrganismos envolvidos na corrosão microbiologicamente induzida (CMI).....	100
Figura 2.28 -	(A) Biofilme macroscópico em um tanque contendo fluido de corte e (B) filtro coberto por biofilme (MEYER, 2011).....	102
Figura 2.29 -	Constituintes e contaminantes dos fluidos de corte integrais e à base de água (adaptado de MIRER, 2003; FRIESEN et al., 2011).....	103
Figura 2.30 -	Abordagem para a linha de controle de circuito fechado de FCs usando sensores avançados, como um nariz eletrônico. Adaptado de Meyer (2014) e Brinksmeier et al. (2015).....	111
Figura 2.31 -	Estruturas e componentes de microrganismos e de fluidos de corte comparativamente.....	115
Figura 3.1 -	Detalhamento da metodologia utilizada nas etapas experimentais realizadas.....	117
Figura 3.2 -	Microestrutura dos materiais utilizados no estudo. Em a.) aço de livre corte ABNT 12L14; em b) aço ABNT 1045.; em c.) alumínio comercialmente puro e em d.) aço inoxidável austenítico V304UF.....	120
Figura 3.3 -	Reativação de microrganismos a partir do estoque em cultura overnight (24hs) e cultivo para a) obtenção dos pellets contaminantes do fluidos de corte de base vegetal e mineral e em b) determinação e monitoramento da carga microbiana de viáveis utilizada tanto para o cultivo dos contaminantes quanto para o cultivo de viáveis nos fluidos de corte após contaminação microbiológica “ <i>in vitro</i> ”.....	123
Figura 3.4 -	Viscosímetro utilizado para caracterizar os FC investigados.....	124
Figura 3.5 -	Condutivímetro utilizado na caracterização dos FCs.....	125
Figura 3.6 -	Classificação do papel filtro quanto ao grau de corrosão por análise do aspecto do papel após ensaio.....	127
Figura 3.7 -	Corpos de prova fabricados para o teste de corrosão.....	128
Figura 3.8 -	Ensaio de corrosão em poços (aço ABNT 12L14). A interrupção dos ensaios	

	ocorreu: i.) após 8 horas; ii.) após 24 horas e iii.) após 72 horas do início do teste. Cada poço recebeu alíquota de 275 microlitros, de: a.) FCs novos (recém diluídos), b.) FCs após 7 e c.) 70 dias de contaminação microbiológica artificial “ <i>in vitro</i> ”.....	129
Figura 3.9 -	Tribômetro Plint TE 67 utilizado nos ensaios de desgaste por deslizamento.....	130
Figura 3.10 -	Esclerômetro Pendular desenvolvido por Franco (1989) utilizado nos ensaios.....	132
Figura 3.11 -	Dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios de capacidade refrigerantes dos FCs.....	133
Figura 3.12 -	Sistema utilizado para ensaio de furação.....	136
Figura 3.13 -	Insertos utilizados nos ensaios de torneamento. a) insertos, b) geometria do inserto ($i_c = 1 = 15,7 \text{ mm}$, $s = 4,76$, $r_e = 8\text{mm}$) (SANDVIK, 2012).....	137
Figura 3.14 -	Representação da fixação do corpo de prova dividido em dois trechos e intervalos de usinagem.....	139
Figura 4.1 -	Monitoramento do pH dos dois FCs nas quatro concentrações e três condições de contaminação microbiológica investigadas.....	147
Figura 4.2 -	Alterações nos parâmetros de viscosidade dinâmica e cinemática e comportamento da massa específica do FC de base vegetal, nas três condições testadas e quatro concentrações de uso investigadas.....	148
Figura 4.3 -	Monitoramento dos parâmetros de viscosidades dinâmica e cinemática e massa específica do FC de base mineral, nas três condições testadas e em quatro concentrações de uso investigadas.....	148
Figura 4.4 -	Monitoramento dos parâmetros de viscosidade dinâmica, cinemática e comportamento da massa específica para os dois FC a 3,0%, nas três condições testadas	150
Figura 4.5 -	Monitoramento dos parâmetros de viscosidade dinâmica, cinemática e comportamento da massa específica para os dois FC a 5,0%, nas três condições testadas.....	151
Figura 4.6 -	Monitoramento dos parâmetros de viscosidade dinâmica e cinemática e comportamento da massa específica para os dois FC a 8,0%, nas três condições testadas.....	151
Figura 4.7 -	Monitoramento dos parâmetros de viscosidade dinâmica e cinemática e comportamento da massa específica para os dois FC a 10,0%, nas três condições	

	testadas.....	152
Figura 4.8 -	Ranqueamento dos dois fluidos de corte (emulsão base vegetal e semissintético base mineral) para as quatro concentrações investigadas, nas duas condições propostas de contaminação microbiológica e novos.....	153
Figura 4.9.a. -	Alterações nos parâmetros de condutividade e difusividade térmicas e do calor específico para o FC de base vegetal nas quatro concentrações e três condições testadas.....	154
Figura 4.9.b. -	Alterações nos parâmetros de condutividade e difusividade térmicas e do calor específico para o FC de base vegetal nas quatro concentrações e três condições testadas.....	155
Figura 4.10 -	Parâmetros de condutividade e difusividade térmicas e do calor específico para os FCs de bases vegetal e mineral a 3,0%.....	156
Figura 4.11 -	Parâmetros de condutividade e difusividade térmicas e do calor específico para os FCs de bases vegetal e mineral a 5,0%.....	157
Figura 4.12 -	Alterações nos parâmetros de condutividade e difusividade térmicas e do calor específico para os FCs de bases vegetal e mineral a 8,0%.....	157
Figura 4.13 -	Monitoramento dos parâmetros de condutividade e difusividade térmicas e do calor específico para os dois FCs (bases vegetal e mineral) a 10%, nas três condições investigadas.....	158
Figura 4.14 -	Evolução do ângulo de contato de cada fluido testado ao longo do tempo. Em a) FC novos/ recém diluídos; b) FC após sete dias de contaminação microbiológica e c) FCs após setenta dias de contaminação microbiológica.....	159
Figura 4.15 -	Estabilização da gota séssil na superfície do aço inoxidável nos primeiros 20 segundos de ensaio. As quatro concentrações de FC utilizadas nos ensaios são mostradas nas letras a)3,0%, b) 5,0%, c) 8,0% e d) 10,0%.....	160
Figura 4.16 –	Ângulo de contato médio avaliado considerando-se os 30 segundos finais do ensaio de molhabilidade, durante segundo período de estabilização da gota séssil na superfície do aço inoxidável.....	161
Figura 4.17 -	Evolução do ângulo de contato dos FCs na concentração de3,0%, nas três condições investigadas, FC de base vegetal (a, b, c) e mineral (d, e, f) nas condições de novo (a, d), biodegradado por 7 dias (b, e) e biodegradado por setenta dias (c, f).....	162
Figura 4.18 -	Evolução do ângulo de contato dos FCs na concentração de 5,0%, nas três condições investigadas, FC de base vegetal (a, b, c) e mineral (d, e, f) nas condições de novo (a, d), contaminado por 7 dias (b, e) e contaminado por setenta dias (c,	

- f).....163
- Figura 4.19 - Evolução do ângulo de contato dos FCs na concentração de 8,0%, nas três condições investigadas, FC de base vegetal (a, b, c) e mineral (d, e, f) nas condições de novo (a, d), contaminado por 7 dias (b, e) e contaminado por setenta dias (c, f).163
- Figura 4.20 - Evolução do ângulo de contato dos FCs na concentração de 10,0%, nas três condições investigadas, FC de base vegetal (a, b, c) e mineral (d, e, f) nas condições de novo (a, d), contaminado por 7 dias (b, e) e contaminado por setenta dias (c, f).....164
- Figura 4.21 - Ângulo de contato determinado após dois segundos de ensaio para os dois FCs, quatro concentrações e três condições investigados.....165
- Figura 4.22 - Manchamento dos papéis filtro utilizados de acordo com o tempo de contaminação microbiológica para cada fluido de corte base..... 169
- Figura 4.23 - Evolução do grau de corrosão em superfície metálica de acordo com as condições testadas para os dois FCs investigados na concentração de 8,0%..... 171
- Figura 4.24 - Tempo de evaporação da gota (10 µL) em superfície metálica plana deixada em temperatura ambiente.....172
- Figura 4.25 - Ensaio de desgaste por deslizamento utilizando os FCs em concentração de 3,0% e em ambiente sem fluido de corte.....175
- Figura 4.26 - Desempenho dos FCs a 3,0% durante ensaio de desgaste por deslizamento. Coeficiente de atrito médio correspondente a totalidade do ensaio.....175
- Figura 4.27 - Desempenho de resistência ao cisalhamento em ensaio de desgaste por deslizamento dos dois FCs investigados, na concentração de 3,0%, nas três condições testadas e também em ambiente seco.....176
- Figura 4.28 - Ensaio de desgaste por deslizamento utilizando os FCs em concentração de 5,0% e em ambiente seco.....177
- Figura 4.29 - Desempenho dos FCs a 5,0% durante ensaio de desgaste por deslizamento.....178
- Figura 4.30 - Desempenho de resistência ao cisalhamento em ensaio de desgaste por deslizamento dos dois FCs investigado, na concentração de 5,0%, nas três condições testadas e também em ambiente seco.....179
- Figura 4.31 - Ensaio de desgaste por deslizamento utilizando os FCs em concentração de 8,0% e em ambiente seco.....179

Figura 4.32 -	Desempenho dos FCs a 8,0% durante ensaio de desgaste por deslizamento.....	180
Figura 4.33 -	Desempenho de resistência ao cisalhamento em ensaio de desgaste por deslizamento dos dois FCs investigados, na concentração de 8,0%, nas três condições testadas e também em ambiente seco.....	181
Figura 4.34 -	Ensaio de desgaste por deslizamento utilizando os FCs em concentração de 10% e em ambiente seco.....	181
Figura 4.35 -	Desempenho dos FCs a 10,0% durante ensaio de desgaste por deslizamento.....	182
Figura 4.36 -	Desempenho de resistência ao cisalhamento em ensaio de desgaste por deslizamento dos dois FCs investigados, na concentração de 10,0%, nas três condições testadas e também em ambiente seco.....	183
Figura 4.37 -	Desempenho de resistência ao cisalhamento em ensaio de desgaste por deslizamento dos dois FCs de base vegetal investigados, nas quatro concentrações testadas.....	183
Figura 4.38 -	Ensaio de desgaste por deslizamento dos FCs de base mineral investigados, nas quatro concentrações testadas.....	184
Figura 4.39 -	Energia específica consumida no riscamento da superfície do aço inoxidável a seco e submerso em 1,2 ml de fluido de corte a 3,0%. Pontos experimentais.....	186
Figura 4.40 -	Curvas geradas no riscamento do aço inoxidável utilizando FCs a 3,0% ajustadas por um modelo de potências.....	187
Figura 4.41 -	Energia específica consumida no riscamento de superfície do aço inoxidável submerso em 1,2 ml de fluido de corte a 5,0% em em ambiente seco. Pontos experimentais.....	188
Figura 4.42 -	Curvas geradas no riscamento do aço inoxidável utilizando FCs a 5,0% ajustadas por um modelo de potências.....	190
Figura 4.43 -	Energia específica consumida durante riscamento de superfícies do aço inoxidável submersas em 1,2 mL de fluidos de corte a 8,0%. Pontos experimentais.....	191
Figura 4.44 -	Curvas ajustadas por um modelo de potências para os ensaios de esclerometria pendular em aço inoxidável em ambientes: seco e úmido (utilizando FCs a	

	8,0%).....	192
Figura 4.45 -	Energia específica consumida no riscamento de superfície do alumínio submerso em 1,2 ml de fluido de corte a 8,0% e em ambiente seco. Pontos experimentais.....	193
Figura 4.46 -	Curvas ajustadas por um modelo de potências para os ensaios de esclerometria pendular realizados na superfície de alumínio submerso em 1,2 mL de FC a 8,0% e em ambiente seco.....	193
Figura 4.47 -	Energia específica consumida no riscamento de superfície do aço inoxidável submerso em 1,2 ml de fluido de corte a 10,0% e em ambiente seco. Pontos experimentais.....	194
Figura 4.48 -	Curvas geradas no riscamento do aço inoxidável utilizando FCs a 10,0% e em ambiente seco, ajustadas por um modelo de potências.....	196
Figura 4.49 -	Tempo médio de resfriamento dos corpos de prova de 296 °C a 41 °C, submetidos aos ensaios de resfriamento em ambiente úmido (presença de fluido de corte).....	198
Figura 4.50 -	Desempenho refrigerante dos FCs de base vegetal e mineral para a concentração de 3,0% (a), 5,0% (b), 8,0% (c) e 10,0% (d), todos eles contendo as três condições investigadas.....	199
Figura 4.51 -	Desempenho refrigerante dos FCs de base vegetal e mineral de acordo com cada condição testada: (a) FCs novos, (b) FCs após sete e (c) FCs após setenta dias de contaminação microbiológica “ <i>in vitro</i> ”.....	200
Figura 4.52 -	Desempenho refrigerante dos FCs de base vegetal e mineral de acordo com (a) melhores desempenhos em cada concentração testada e (b) piores desempenhos em cada concentração testada.....	202
Figura 4.53 -	Capacidade refrigerante de cada fluido testado a partir do valor calculado de Biot e h	204
Figura 4.54 -	Ranqueamento da capacidade refrigerante dos ambientes testados (seco e úmidos) da maior para a menor capacidade de acordo com o coeficiente de troca de calor por convecção, h (W/m ² K).....	204
Figura 4.55 -	Profundidade alcançada pelos furos utilizando FC a 3,0%, brocas de 8 mm de diâmetro, rotação de 1770 rpm, carga de 19,90 N, durante 20s. Os resultados em ambiente seco também são apresentados.....	205
Figura 4.56 -	Profundidade alcançada pelos furos utilizando FC a 5,0%, brocas de 8 mm de diâmetro, rotação de 1770 rpm, carga de 19,90 N, durante 20s. Os resultados em	

	ambiente	seco	também	são	
	apresentados.....				206
Figura 4.57 -	Profundidade alcançada pelos furos utilizando FC a 8,0%, brocas de 8 mm de diâmetro, rotação de 1770 rpm, carga de 19,90 N, durante 20s. Os resultados em				
	ambiente	seco	também	são	
	apresentados.....				207
Figura 4.58 -	Profundidade alcançada pelos furos utilizando FC a 10,0%, brocas de 8 mm de diâmetro, rotação de 1770 rpm, carga de 19,90 N, durante 20s. Os resultados em				
	ambiente	seco	também	são	
	apresentados.....				207
Figura 4.59 -	Desempenho do FC de base vegetal, nas quatro concentrações testadas e nas três condições propostas em relação a carga microbiana inoculada. Parâmetros de corte: brocas de 8 mm de diâmetro, rotação de 1770 rpm, carga de 19,90 N, por 20s.....				
	208				
Figura 4.60 -	Desempenho do FC de base mineral, nas quatro concentrações testadas e nas três condições propostas em relação a carga microbiana inoculada. Parâmetros de corte: brocas de 8 mm de diâmetro, rotação de 1770 rpm, carga de 19,90 N, por 20s.....				
	209				
Figura 4.61 -	Média de profundidade obtida para os dois FCs nas diversas concentrações, nas três condições testadas para o ambiente úmido comparados ao ambiente seco. Parâmetros de corte: brocas de 8 mm de diâmetro, rotação de 1770 rpm, carga de 19,90 N, por 20s.....				
	210				
Figura 4.62 -	Desgaste de Flanco quando utilizado o FC de base vegetal em baixa e alta velocidade de corte.....				
	211				
Figura 4.63 -	Desgaste de Flanco quando utilizado o FC de base Mineral em baixa e alta velocidade de corte.....				
	212				
Figura 4.64 -	Desgaste de Flanco quando utilizado os FCs de base Vegetal e Mineral em baixa (a) e alta (b) velocidade de corte relacionados a presença da carga microbiana.....				
	214				
Figura 4.65 -	Tempo de vida (T) da ferramenta de corte em baixa e alta velocidade de corte.....				
	216				
Figura 4.66 -	Evolução do desgaste de flanco no teste de vida utilizando os dois CFs base, vegetal (a e c) e mineral (b e d), ambos contaminados por setenta dias. Em 4.66a e 4.66b,				

- ambos com $v_c = 125$ m/min, $a_p = 1,0$ mm, $f = 0,20$ mm/volta. Em 4.66c e 4.66d, ambos com $v_c = 250$ m/min, $f = 0,20$ mm/volta, $a_p = 1$ mm.....217
- Figura 4.67 - (a) Desgaste de flanco da ferramenta de corte utilizada no teste com $v_c = 250$ m/min e fluido de corte de base mineral após contaminação de 7 dias, após ataque com ácido clorídrico para remoção de material da peça aderido; (b) Detalhe da região destacada em (a) (GRUB 2014).....218
- Figura 4.68 - Forças de corte e avanço (F_c e F_f) em função do avanço. Em (a) e (c) ensaios com $v_c = 125$ m/min; Em (b) e (d) ensaios com $v_c = 250$ m/min.....219
- Figura 4.69 - Variação da rugosidade (R_a) pelo avanço, na usinagem do aço inoxidável austenítico V304UF com os diversos meios lubri-refrigerantes, utilizando baixa (125 m/min) e alta (250 m/min) velocidade de corte em (a) e (b) respectivamente.....220

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Biodegradabilidade de alguns lubrificantes (PAWLAK, 2003)	65
Tabela 2.2 -	Exemplos de formulação de FC a base de óleo e a base de água (emulsão e solução).....	72
Tabela 2.3 -	Aditivos usados em fluidos de corte durante as últimas décadas, incluindo exemplos e funções associadas, são classificados também quanto ao sítio de ação.....	73
Tabela 2.4 -	Análise comparativa das propriedades dos tipos básicos de FCs à base de água utilizados no processamento de metais.....	75
Tabela 2.5 -	Principais grupos de componentes ativos encontrados em biocidas não oxidantes e mecanismo de ação na célula microbiana.....	94
Tabela 2.6 -	Alvos Bacterianos.....	97
Tabela 2.7 -	Medidas de controle adotadas de acordo com o parâmetro envolvido.....	109
Tabela 2.8 -	Recomendações dos limites de vários parâmetros.....	110
Tabela 2.9 -	Tratabilidade de resíduos de aditivos.....	112
Tabela 3.1 -	Relação de ensaios realizados em função das condições de contaminação microbiológica e das concentrações utilizadas para os dois FCs investigados.....	118
Tabela 3.2 -	Composição química (% em massa) e dureza dos materiais utilizados.....	119
Tabela 3.3 -	Características dos dois FCs utilizados.....	121
Tabela 3.4 -	Classificação do ensaio de corrosão.....	127
Tabela 3.5 -	Dimensões do suporte de ferramenta conforme Fig. 3.9.d. (SANDVIK, 2012).....	137
Tabela 3.6 -	Parâmetros de usinagem nos ensaios de forças e rugosidade superficial.....	139
Tabela 4.1 -	Características dos FCs após procedimento de contaminação microbiológica e novos em relação a concentração/índice Brix e óleo base.....	141
Tabela 4.2 -	Consolidação dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização física dos FCs investigados.....	165
Tabela 4.3 -	Percentual de área do papel filtro comprometida pela corrosão utilizando os dois	

	FCs nas três condições investigadas.....	167
Tabela 4.4 -	Classificação do grau de corrosão obtido utilizando os dois FCs investigados de acordo com a norma DIN 51360-2.....	167
Tabela 4.5 -	Classificação do grau de corrosão determinado nos dois FCs testados de acordo com a norma ASTM D4627.....	168
Tabela 4.6 -	Resultados do ensaio de corrosão realizado em poços de superfície metálica.....	169
Tabela 4.7 -	Parâmetros característicos do ajuste em modelo de potência (FCs 3,0% riscamento em V304UF).....	187
Tabela 4.8 -	Parâmetros característicos do ajuste em modelo de potência (FCs 5,0% riscamento em V304UF).....	189
Tabela 4.9 -	Parâmetros característicos do ajuste em modelo de potência (FCs 8,0% riscamento em V304UF).....	191
Tabela 4.10 -	Parâmetros característicos do ajuste em modelo de potência (FCs 8,0% riscamento em alumínio).....	193
Tabela 4.11 -	Parâmetros característicos do ajuste em modelo de potência (FCs 10,0% riscamento em V304UF).....	195
Tabela 4.12 -	Desempenho refrigerante em cada concentração de uso dos FCs de base mineral e vegetal nas três condições testadas.....	200
Tabela 4.13 -	Ranqueamento do desempenho refrigerante dos FCs de base mineral e vegetal nas três condições testadas e quatro concentrações de uso a partir do FC que obteve o melhor resultado.....	200
Tabela 4.14 -	Determinação de Bi e h para cada fluido testado.....	202
Tabela 4.15 -	Ranqueamento do desempenho dos dois FCs nas três condições propostas, no processo de furação a partir do FC que obteve o melhor resultado (1,0).....	209

Sumário

AGRADECIMENTOS.....	VII
RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XII
LISTA DE FIGURAS.....	XV
LISTA DE TABELAS.....	XXV
CAPÍTULO I.....	27
1. INTRODUÇÃO.....	27
1.1 OBJETIVOS.....	32
GERAL.....	32
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	33
CAPÍTULO II.....	34
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	34
2.1 HISTÓRICO E IMPORTÂNCIA DOS FLUIDOS DE CORTE PARA OS PROCESSOS DE USINAGEM.....	34
2.2 FUNÇÕES.....	40
2.2.1 REFRIGERANTE.....	42
2.2.2 LUBRIFICANTE.....	46
2.2.3 REMOÇÃO DO CAVACO DA REGIÃO DE CORTE E OUTRAS.....	47
2.2.4 PREVENIR RESSOLDAGENS.....	47
2.2.5 INIBIR OXIDAÇÃO E CORROSÃO.....	48
2.2.6 PROLONGAMENTO DA VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE E REDUÇÃO DO TEMPO DE USINAGEM.....	48
2.2.7 REDUÇÃO DA POTENCIA NECESSÁRIA PARA CORTE DO MATERIAL.....	49
2.3 MECANISMOS DE AÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE.....	49
2.3.1 ASPECTOS FÍSICO-QUÍMICOS DA APLICAÇÃO DE FLUIDOS DE CORTE.....	51
2.3.2 CARACTERÍSTICAS DA SUPERFÍCIE METÁLICA.....	60
2.3.3 COMPONENTES ESPECÍFICOS DOS FCs E SEUS EFEITOS SOBRE OS PROCESSOS SELECIONADOS.....	61
2.4 FORMULAÇÕES DOS FLUIDOS DE CORTE.....	61
2.5 CLASSIFICAÇÃO.....	66
2.5.1 HISTÓRICO.....	67
2.5.2 FCs INTEGRAIS.....	69
2.5.3 FCs A BASE DE ÁGUA.....	70
2.6 TIPOS DE ADITIVOS.....	73
2.7 SELEÇÃO.....	76
2.8 MÉTODOS DE APLICAÇÃO DE FCs.....	77
2.9 INFLUÊNCIA DA DEGRADAÇÃO E BIODEGRADAÇÃO DOS FCs NO DESEMPENHO TÉCNICO DE SUAS PROPRIEDADES AO LONGO DE SUA VIDA ÚTIL.....	78
2.9.1 FLUIDOS DE CORTE A BASE DE ÓLEO.....	79
2.9.2 FLUIDOS DE CORTE A BASE DE ÁGUA.....	80
2.10 ASPECTOS DA CONTAMINAÇÃO MICROBIOLÓGICA EM FCs A BASE DE ÁGUA.....	91
2.10.1 ORIGEM DA CONTAMINAÇÃO MICROBIOLÓGICA.....	91
2.10.2 MICRORGANISMOS RECUPERADOS DE FLUIDOS DE CORTE.....	91
2.10.3 MICROBIOMAS.....	93
2.10.4 MÉTODOS DE DETECÇÃO MICROBIOLÓGICA.....	94
2.10.5 MÉTODOS DE CONTROLE/ PREVENÇÃO.....	96

2.10.6 BIODEGRADAÇÃO DOS COMPONENTES	100
2.10.7 CORROSÃO MICROBIOLOGICAMENTE INDUZIDA	101
2.10.8 FORMAÇÃO DE BIOFILMES.....	102
2.10.9 SAÚDE DO OPERADOR.....	104
2.10.10 MEIO AMBIENTE.....	107
2.10.11 ESTRATÉGIAS DE GESTÃO DOS FC	109
2.10.12 NOVAS TECNOLOGIAS DE CONTROLE E INVERSÃO DE PARADIGMAS	115
<u>CAPÍTULO III</u>	<u>118</u>
3.1. INTRODUÇÃO	118
3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	121
3.2.1 MATERIAIS DE CORPOS DE PROVA.....	121
3.2.2 ENSAIO METALOGRÁFICO	121
3.3. PREPARO DOS FLUIDOS DE CORTE E LIMPEZA DA MÁQUINA PARA OS ENSAIOS DE TORNEAMENTO ..	122
3.3.2. MICRORGANISMOS CONTAMINANTES.....	123
3.3.3. CONTAMINAÇÃO MICROBIOLÓGICA DOS FCs.....	124
3.4. CARACTERIZAÇÃO DOS FLUIDOS DE CORTE	125
3.4.1. pH.....	125
3.4.2. VISCOSIDADES DINÂMICA, VISCOSIDADE CINEMÁTICA E MASSA ESPECÍFICA.....	125
3.4.3. DIFUSIVIDADE TÉRMICA, CONDUTIVIDADE TÉRMICA E CALOR ESPECÍFICO	126
3.4.4. MEDIÇÃO DO ÂNGULO DE CONTATO	127
3.5 ENSAIOS DE DESEMPENHO DAS PROPRIEDADES DOS FLUIDOS	128
3.5.1. ANTI-CORROSIVA	128
3.5.2. PROPRIEDADE LUBRIFICANTE – DESGASTE POR DESLIZAMENTO (“ <i>RECIPROCATING</i> ”).....	132
3.5.3. PROPRIEDADE LUBRI-REFRIGERANTE - ESCLEROMETRIA PENDULAR.....	133
3.5.4. PROPRIEDADE REFRIGERANTE – CURVA DE RESFRIAMENTO	135
3.5.5. PROPRIEDADES LUBRI-REFRIGERANTES - FURAÇÃO COM FORÇA CONSTANTE	137
3.5.6. PROPRIEDADES LUBRI-REFRIGERANTES - TORNEAMENTO.....	138
<u>CAPÍTULO IV.....</u>	<u>143</u>
<u>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	<u>143</u>
4.1. CONTAMINAÇÃO ARTIFICIAL “IN VITRO”	143
4.1.1. CONSIDERAÇÕES SOBRE A CONTAMINAÇÃO DOS FCs	144
4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS FCs INVESTIGADOS.....	147
4.2.1. MONITORAMENTO DO pH.....	147
4.2.2. VISCOSIDADES DINÂMICA, VISCOSIDADE CINEMÁTICA E MASSA ESPECÍFICA.....	150
4.2.3. DIFUSIVIDADE TÉRMICA, CONDUTIVIDADE TÉRMICA E CALOR ESPECÍFICO	155
4.2.4. MOLHABILIDADE DOS FCs.....	160
4.2.5. ENSAIOS DE CORROSÃO	169
4.2.6. DESEMPENHO LUBRIFICANTE - DESGASTE POR DESLIZAMENTO - “ <i>RECIPROCATING</i> ”	175
4.2.7. DESEMPENHO LUBRI-REFRIGERANTE – ESCLEROMETRIA PENDULAR	187
4.2.8. DESEMPENHO REFRIGERANTE - CURVA DE RESFRIAMENTO.....	199
4.2.9. DESEMPENHO LUBRI-REFRIGERANTE - PROCESSO DE FURAÇÃO	207
4.2.9. DESEMPENHO LUBRI-REFRIGERANTE – PROCESSO DE TORNEAMENTO.....	214
<u>CAPÍTULO V</u>	<u>225</u>
<u>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</u>	<u>225</u>
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>	<u>230</u>

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Os fluidos de corte (FCs) devido ao importante papel que desempenham em processos tais como: conformação (BAY et al., 2010), usinagem (WEINERT et al., 2004), e retificação (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999), foram abordados em vários “*CIRP Keynote Papers*” no passado (BRINKSMEIER et al., 2015). Eles influenciam a geração de calor nos processos de usinagem, reduzindo o coeficiente de atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho. A refrigeração é obtida principalmente pela dissipação quanto da condução do calor gerado. Por suas propriedades lubri-refrigerantes contribuem para a prevenção de dano térmico ao material da peça de trabalho, reduzem o desgaste da ferramenta de corte, assim como, protegem o sistema no qual circula contra oxidação/corrosão (VAN DER GAST et al., 2003; VAN DER GAST; THOMPSON, 2004; McCOY, 2006; BRINKSMEIER; HUNTEMANN, 2009; CETIN et al., 2011; LUCCHESI; EGUCHI; MORAES, 2012; KURAM; OZCELIK; DEMIRBAS, 2013; MACHADO et al., 2015).

Os FCs são de alta relevância para a geração (BRINKSMEIER; LUCCA; WALTER, 2004; JAWAHIR et al., 2011) e compreensão (LUCCA; BRINKSMEIER; GOCH, 1998) da integridade superficial no trabalho de metais. Na usinagem, processos de transporte do cavaco para fora da zona de trabalho é uma sub-tarefa também muito importante do FC, que pode responder por até 17% do custo do processo. Contudo, as pesquisas em sua maioria e até o presente momento têm sido realizadas na elucidação fenomenológica voltada para a melhoria do desempenho de certos processos de fabricação que o utilizam, sendo responsável por até 15% do processo (SANDIN; MATTSBYBALTZER; EDEBO, 1991; SILLIMAN et al. 1992; McCOY, 2006; RABENSTEIN et al., 2009; BRINKSMEIER et al., 2015; MACHADO et al., 2015), com pequeno aprofundamento no desempenho de suas propriedades durante o uso.

Desde os tempos da revolução industrial, as máquinas que utilizam fluidos de corte o fazem para obter maiores velocidades, elevar ao máximo a vida da ferramenta, reduzir o

tempo de inatividade da máquina e produzir a menor quantidade possível de sucata, tudo isso enquanto mantêm altos os índices de precisão e os requisitos de acabamento (McCOY, 2006).

Apesar de atingir maiores níveis de desempenho no processamento de metais, a utilização de FCs é frequentemente associada a desvantagens ambientais, funcionais, econômicas e à saúde humana (DETTMER, 2004; WINTER; BOCK; HERRMANN, 2012), necessitando ser vista de forma crítica devido ao potencial perigo associado, em cada fase de seu ciclo de vida, desde a extração da matéria prima, até a sua eliminação (DETTMER, 2004).

Por se tratar de um produto com uma vasta gama de características, existem diferentes métodos de classificar os fluidos de corte tradicionais (SHOKRANI CHAHARSOOGHI; DHOKIA; NEWMAN, 2014), sendo o mais comum deles baseado em sua solubilidade em água. Fluidos de corte miscíveis em água compreendem:(i) emulsões; (ii) micro-emulsões/semisintéticos e (iii) sintéticos, e os não miscíveis em água compreendem os integrais ou óleos puros (DIN 51385, 2013; SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012).

FCs são altamente suscetíveis a agentes químicos, físicos e a contaminação microbiana (ROSSMOORE 1995; VAN DER GAST et al., 2001). O que contribui para esta susceptibilidade é a reciclagem contínua do FC com a finalidade de reduzir custos, resultando em sua contaminação progressiva por partículas de metais, sais e sobretudo no desenvolvimento potencial de biomas de “microrganismos” (MURAT et al., 2012). Para prevenir esta contaminação, os fabricantes adicionam vários aditivos como: biocidas que atuam na redução da carga microbiológica (BYERS, 2006; CAPELLETTI, 2006) agentes anti-espuma, inibidores de corrosão e corantes para melhorar as propriedades do fluido, seu desempenho e vida útil, bem como a aceitação pelo operador (HOWELL; LUCKE; STEIGERWALD, 1996; VIRJI et al. 2000; SELVARAJU; KHAN; YADAV, 2005; SELVARAJU; KHAN; YADAV, 2011; SUURONEN et al., 2007; ROSENMAN, 2009; SAHA; DONOFRIO, 2012).

Entretanto, a adição do biocida ao FC como único método preventivo ou de controle a contaminação microbiológica pode ser ineficaz em preservar o fluido livre de microrganismos ou de reduzir a densidade da contaminação, podendo até mesmo agravar a situação (CAPELLETTI, 2006). Adicionalmente eles podem acarretar dermatite, corrosão, resistência microbiana e toxicidade, além de aumento nos custos resultantes da sua manipulação e descarte (SELVARAJU; KAPOOR; YADAV, 2008a; SELVARAJU; KHAN; YADAV, 2008b).

A análise microbiológica de FCs pode evidenciar altos níveis de contaminação, que variam de 10^4 a 10^{10} Unidades Formadoras de Colônia/mililitro de fluido (UFC/mL) (MATTSBY-BALTZER et al., 1989; SLOYER; NOVITSKY; NUGENT, 2002; VAN DER GAST et al., 2003; SAHA; DONOFRIO, 2012). Uma grande variedade de bactérias são usualmente detectadas, tais como: *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, bactérias redutoras de sulfato (BRS) e as conhecidas como *Acinetobacter* (MATTSBY-BALTZER et al., 1989; SANDIN; MATTSBY-BALTZER; EDEBO, 1991; VIRJI et al., 2000; VAN DER GAST et al., 2003; PERKINS; ANGENENT, 2010), além de patógenos oportunistas tais como: *Legionella* spp., *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, e *Escherichia coli* (BAKALOVA et al., 2007; ELSMORE, 2003; LUCCHESI; EGUCHI; MORAES, 2012). Há pouco tempo, uma nova espécie de *Mycobacterium* (*Mycobacterium immunogenum*) foi isolada a partir de FCs e associada à doença pulmonar, denominada “MOL” – “machine operator's lung” (“pulmão do operador da máquina” – POM) (MOORE et al., 2000; WALLACE et al., 2002; RHODES et al. 2011).

Os microrganismos presentes nos FCs contêm principalmente bacilos Gram-negativos (BGN), como referido acima, constituído principalmente por representantes do gênero *Pseudomonas* (KREISS; COX-GANSER, 1997; LONON; ABANTO; FINDLAY, 1999; DILGER; FLURI; SONNTAG, 2005; GILBERT; VEILLETTE; DUCHAINE, 2010; MURAT et al., 2012). As *Pseudomonas* comumente encontradas são: *Pseudomonas oleovorans* subsp. *oleovorans*, *Pseudomonas oleovorans* subsp. *pseudoalcaligenes*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas aeruginosa* e a recentemente descrita *Pseudomonas oleovorans* (BAECKER; ROUX; AV, 1989; CHAZAL, 1995; KREISS; COX-GANSER, 1997; WILSON et al., 2001; KHAN; YADAV, 2004; NARAYAN RAO; SATYANARAYANA; VENKATASUBBAIAH, 2011; SELVARAJU; KHAN; YADAV, 2011). A existência de outro bioma microbiano mais rico em bacilos Gram-positivos (BGP), particularmente micobactérias e fungos filamentosos, incluindo especialmente espécies de *Fusarium*, também foi relatada na literatura (KREISS; COX-GANSER, 1997). Outra fonte de contaminação para os FCs, contribuindo com microrganismos como: *Escherichia coli*, *Enterobacter aerogenes* e vários *Staphylococcus* sp. e *Micrococcus* sp., é a microbiota normalmente encontrada nos operadores de máquinas-ferramentas (NIOSH, 2001).

A exposição ocupacional ao FC através da inalação de aerossóis produzidos a partir de óleos solúveis ou FCs aquosos sintéticos e semissintéticos (KREISS; COX-GANSER, 1997; FALKINHAM, 2003) está associada com doenças respiratórias e cutâneas (AWOSIKA-OLUMO; TRANGLE; FALLON, 2003), destacando-se a asma e pneumonite por

hipersensibilidade (“*hypersensitivity pneumonitis*”, HP), conhecida como pulmão do operador de máquina (“*machine-operator’s lung*”, MOL) (ROSENMAN, 2009). HP foi caracterizada como uma doença pulmonar granulomatosa similar a sarcoidose e doença por berílio (KREISS; COX-GANSER, 1997). A partir de detecção do primeiro caso em 1991, um total de 98 casos de HP foram posteriormente associados a esta exposição ocupacional (KREISS; COX-GANSER, 1997).

Em relação a esta contaminação microbiológica dos FCs por bactérias e fungos são observadas as seguintes implicações:

a) para a indústria: i.) entupimento de tubulações e filtros, resultante da biomassa microbiana aderida as superfícies/substratos, com redução de sua vazão no sistema e recontaminação (MATTSBY-BALTZER et al., 1989; LUCCHESI; EGUCHI; MORAES, 2012; VEILLETTE et al., 2004; MEYER, 2011; PALMOWSKI et al., 2014); ii.) corrosão microbiologicamente induzida de máquinas-ferramenta e componentes (PALMOWSKI et al., 2014); iii.) odor característico ao FC (PALMOWSKI et al., 2014); iv.) utilização dos componentes de sua formulação como fonte de nutrientes (van der GAST, 2001; MURAT et al., 2012; TRAFNY et al., 2015; BRINKSMEIER et al., 2015); v.) bem como reação de seus produtos metabólitos com componentes da fórmula; vi.), ambas causando alterações químicas, levando à instabilidade do FC; vii.) acidificação do FC pela redução do pH; entre outros, tendo como resultado, acelerado processo de biodegradação, principal responsável pela viii.) queda do desempenho técnico do FC além de aumento dos custos com viii.) tratamento e descarte precoce do FC (van der GAST, 2001); ix.) aumento dos custos descarte

b.) para o operador da máquina: i.) relacionados a contaminação microbiológica, devido a presença de antígenos, endotoxinas, e dos próprios microrganismos no FC, representando risco potencial a saúde do operador da máquina, sobretudo para doenças cutâneas e respiratórias (CASTELLAN et al, 1987; SANDIN; ALLENMARK; EDEBO, 1990; GORDON, 1992; THORNE; DEKOSTER, 1996; KREISS; COX-GANSER, 1997; THORNE, 2000; GORDON et al., 2006; THORNE et al, 2006; ROSENMAN, 2009; LIU et al., 2010);

c) para o meio ambiente devido a i.) contaminação microbiológica da atmosfera, água e do solo; ii.) contaminação com subprodutos dos componentes do FCs, da atmosfera, água e do solo, deteriorados pelos microrganismos, podendo apresentar pequena ou nenhuma biodegradabilidade.

A avaliação da relação entre a qualidade técnica de usinagem e a carga microbiana de FCs somente recentemente tornou-se uma preocupação em trabalhos científicos (PASSMAN,

1988; BRINKSMEIER et al., 2009; RABENSTEIN et al., 2009; GRUB, 2014; AMORIM FINZI, 2015). Na contramão da demanda por recursos e energia, dentro de uma produção eficiente, a parte que cabe a qualidade de produção, exige que o desgaste da ferramenta de corte seja mínimo durante sua vida útil, e que o FC contribua com o processo, exercendo integralmente suas propriedades lubri-refrigerante (KOCH; PASSMAN; RABENSTEIN, 2015). Com este propósito, o seu monitoramento contínuo, incluindo a análise da carga microbiana é imprescindível (PASSMAN, 2006; RABENSTEIN et al., 2009; AMORIM FINZI, 2015),

O atual desafio enfrentado pela indústria metal-mecânica e demais usuários obrigatórios de fluidos de corte, diante da problemática exposta envolvendo contaminação microbiológica é de determinar a influencia desta contaminação microbiológica na qualidade técnica desses fluidos lubri-refrigerantes, considerando ainda, custos adicionais para a indústria, quando da realização de práticas não sustentáveis, e não biocompatíveis ao meio ambiente, desconsiderando ainda os riscos ao operador da máquina. A importância desses microrganismos para os processos de usinagem deve ser melhor esclarecida.

Como referido anteriormente, o descarte precoce do fluido devido a biodegradação microbiológica e o afastamento de operadores de máquinas ferramenta devido a problemas de saúde ocupacionais podem apresentar custos associados muito elevados, incluindo custos relacionados ao tratamento de resíduos. Desse modo o monitoramento do desempenho desses fluidos contaminados por bactérias e fungos é muito importante e essencial para a adoção de medidas de controle dessa contaminação nesses ambientes.

Embora, a utilização do fluido de corte ainda seja essencial para a obtenção de melhor desempenho em vários processos de usinagem, o sistema água/óleo constitui-se em ambiente favorável à reprodução de uma ampla variedade de microrganismos que acaba provocando alterações nas propriedades iniciais do fluido, tornando-o instável e diminuindo seu tempo de uso no processo de usinagem. Conseqüentemente torna-se necessário o seu descarte.

Portanto, a contaminação microbiológica dos fluidos de corte, por apresentar múltiplos prejuízos às empresas, com inúmeros desdobramentos, como conseqüências diretas para a qualidade do processo produtivo, nocivas e preocupantes tanto para a saúde do homem quanto do meio ambiente, constituindo-se num problema de abrangência mundial, motivou esse estudo e justifica o trabalho aqui apresentado, visto que requer medidas e cuidados urgentes, além de existirem poucos estudos bem desenhados sobre o assunto.

1.1 Objetivos

Geral

Determinar o desempenho de dois Fluidos de Corte, um semissintético de base mineral e um emulsionável de base vegetal, quanto as suas propriedades: físico-químicas, lubrificante, refrigerante e anticorrosiva, em ensaios físico-químicos, tribológicos, de usinagem e termodinâmico, em função da concentração de fluido em água e do tempo de contaminação microbiológica “*in vitro*”.

Específicos

- ✓ Analisar a carga de microrganismos viáveis nos fluidos de corte novos e submetidos a contaminação microbiológica “*in vitro*” por sete e setenta dias.
- ✓ Determinar e analisar comparativamente os dados físico-químico dos dois fluidos de corte investigados, nas quatro concentrações propostas, tanto novos/recém diluídos, quanto após a contaminação microbiológica “*in vitro*” por sete e setenta dias, quanto aos índices de pH, viscosidade cinemática, condutividade e difusividade térmicas, medição do ângulo de contato, dentre outros.
- ✓ Determinar e analisar o desempenho lubri-refrigerante desses dois fluidos de corte investigados, nas quatro concentrações propostas, tanto novos/recém diluídos, quanto após a contaminação microbiológica “*in vitro*” por sete e setenta dias, em ensaios tribológicos (esclerometria pendular e desgaste por deslizamento).
- ✓ Determinar e analisar o desempenho lubri-refrigerante desses dois fluidos de corte investigados, nas quatro concentrações propostas, tanto novos/recém diluídos, quanto após a contaminação microbiológica “*in vitro*” por sete e setenta dias, em ensaios para obtenção da curva de resfriamento e de usinagem (processo de furação).
- ✓ Determinar e analisar comparativamente o desempenho lubri-refrigerante desses dois fluidos de corte investigados, na concentração de 8,0%, após a contaminação microbiológica “*in vitro*” por setenta dias, no processo de torneamento.
- ✓ Determinar e analisar o desempenho das propriedades anticorrosivas dos dois fluidos de corte investigados, na concentração de 8,0%, tanto quando novos/recém diluídos, quanto após a contaminação microbiológica “*in vitro*” por sete e setenta dias, de acordo com as normas DIN 51360-2e ASTM D4627-92.

1.2 Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido em sete capítulos descritos a seguir: Capítulo 1- Introdução ao tema principal (este capítulo). Capítulo 2 – Apresenta a revisão bibliográfica. Capítulo 3 – Descreve a metodologia dos ensaios, mostrando os equipamentos usados e apresenta os planejamentos executados em cada bateria de testes. Capítulo 4 – Apresenta, analisa e discute os resultados. Capítulo 5 – Apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros relacionados ao tema. Capítulo 6 – Lista as referências bibliográficas consultadas na tese.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico e importância dos fluidos de corte para os processos de usinagem

Fluidos de corte (FCs) utilizados em usinagem de materiais ou mais amplamente falando, fluidos utilizados em processamento de metais (do inglês “*metalworking fluids*” - FCs), devido a sua utilização também em setores de conformação de metais e indústria galvânica (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999; WEINERT et al., 2004; BAY et al., 2010; BENITO et al., 2010) são hoje mais conhecidos pelas funções que desempenham nos diversos processos/operações nos quais são empregados do que propriamente pelo que são, sendo definidos como material de engenharia utilizado para otimizar os seus processos (McCOY, 2006).

Embora seja encontrada, em revistas técnicas, escritas por engenheiros e especialistas, a verdadeira história dos fluidos de corte ainda não pôde ser contada com real fidedignidade científica em enciclopédias ou bibliografias de referência em engenharia. Apesar da existência de evidências de sua presença nos primeiros escritos históricos (quando da fabricação de artefatos e armas das primeiras civilizações: Mesopotâmia, Egito, era Grega e Romana e idade média), sua utilização nesta época não é fidedignamente descrita. Ainda assim, o forjamento e o trefilamento foram os mais antigos processos relatados, para os quais os fluidos lubrificantes eram empregados devido a necessidade de suas propriedades nesses processos (McCOY, 2006).

Os óleos e gorduras animais (principalmente de baleias, sebo bovino e banha de porco), bem como óleos vegetais de oliva, palma, mamona e outros originários de sementes, devido a sua disponibilidade e eficiência na época, foram utilizados como fluidos

lubrificantes. Por inferência pode-se pensar que estes fluidos foram os primeiros utilizados nos processos de usinagem, visto que não foram encontrados registros sobre essa associação (McCOY, 2006).

Examinando-se os escritos dos antigos filósofos é fácil entender por que há falta de documentação das experiências e habilidades executadas pelos artesãos. Havia pouco interesse dos “intelectuais” pelas bases científicas da tecnologia, utilizada por estes profissionais na época, o que os deixou relegados a uma posição de inferioridade social cujo conhecimento foi desprezado como não científico. Suas habilidades se tornaram um poderoso bem pessoal guardado de geração em geração (McCOY, 2006).

Durante o Renascimento, manuais de ferro, aço, latão e bronze foram cada vez mais utilizados, especialmente o disco de rolamento por esferas de Da Vinci, encontrados nos relógios e maquinaria de moagem, já em 1494. Embora máquinas tenham sido desenvolvidas para fabricar essas peças, não existem registros da utilização de lubrificantes em rolamentos, engrenagens, parafusos ou fabricação de eixos. É possível que as partes que foram feitas de metais macios como cobre e latão não tenham exigido lubrificação no processo de fabricação, mas parece lógico que os requisitos de acabamento de peças de ferro e aço exigiriam o uso de algum tipo de fluido de corte (McCOY, 2006).

Foi pouco depois da virada do século 17 que a investigação científica sobre a mecânica do atrito e do desgaste motivou o estudo da lubrificação tanto para partes móveis como para os processos de usinagem. As primeiras referências de lubrificação, embora escassas, foram nas descrições de máquinas a motor (animais, vento e água) pelos primeiros pesquisadores sobre a natureza do atrito (McCOY, 2006).

Na China, Sung Ying-Hsing (1637 apud McCOY, 2006) escreveu sobre a vantagem de petróleo “*in cart axles*”. Hooke (1685 apud McCOY, 2006) alertou sobre a necessidade de lubrificação adequada para rolamentos de carro e Amontons (1699 apud McCOY, 2006) elucidou as leis de atrito em máquinas através da experimentação. No mesmo ano (1699), De la Hire (apud McCOY, 2006), descreveu a prática de usar óleo de banha em máquinas. Mais tarde, Desaugliers (1734 apud McCOY, 2006), sugeriu que o papel do lubrificante fosse para preencher as imperfeições nas superfícies e atuassem como pequenos rolos, enquanto Leupold (1735 apud McCOY, 2006) recomendou que o óleo de sebo ou de produtos hortícolas deveriam ser usados para a lubrificação de superfícies ásperas (DOWSON, 1979 apud McCOY, 2006). Amontons, em seus estudos de atrito a seco, registrou em suas notas o uso de gordura de porco para revestir as superfícies deslizantes de cada experimento, entretanto,

como Dowson mais tarde pontuou, Amontons estudava características de atrito em superfícies lubrificadas, em condições de atrito hoje descritas como lubrificação limite. Esses conceitos foram fundamentais para o desenvolvimento das teorias do atrito e desgaste que ocorreram durante o século 18, culminando nas obras aprofundadas de Coulomb, que teorizou a adesão e a rugosidade da superfície como os causadores de atrito (McCOY, 2006).

No século 19, os meios encontrados para atenuar o atrito e o desgaste utilizando a lubrificação foram investigados, através da teoria de Reynolds da lubrificação por filme fluídico. Nas primeiras décadas do século 20, Hardy e Doubleday introduziram o conceito de lubrificação limite, que ainda é a pedra angular de toda fundamentação sobre a teoria da lubrificação (SCHEY, 1970 apud McCOY, 2006). Ainda sobre o trabalho de William Hardy, deveria ser notado que suas descobertas sobre a química coloidal pavimentaram o caminho para o desenvolvimento de fluidos de corte “solúveis” em água (McCOY, 2006).

No entanto, não foi o desenvolvimento da teoria científica que levou à explosão da pesquisa nesta área, especialmente sobre a mecânica dos fluidos de usinagem e metalurgia do século 20. Pelo contrário, era a riqueza de invenções mecânicas e as tecnologias em desenvolvimento que criaram a necessidade de compreensão da natureza do atrito e desgaste, e como estes efeitos poderiam ser mitigados pela lubrificação adequada. O aumento do interesse pelas tecnologias de artesanato durante este período, foram impulsionadas pela fundação da Sociedade Real de Inglaterra em 1663, na qual um grupo que se identificava como “classe de homens novos”, interessados na aplicação da ciência à tecnologia (SINGER, 1957 apud McCOY, 2006), contribuíram de forma mais importante, com o patrocínio da publicação “Histórias de arte da natureza”, ou “Works”, que pela primeira vez, continha descrições científicas de tecnologias artesanais como a praticada no século 17 para uso popular (McCOY, 2006).

O primeiro registro de uma operação mecanizada de retífica, que foi realizado com o uso de um rebolo de afiação e polimento, é evidenciado no Saltério de Utrecht de 850 d.C., no qual um rebolo é manipulado através de um mecanismo de manivela. A primeira retífica utilizando fluido, provavelmente a água, foi descrita para o processo básico de remoção de metal no ato familiar de afiar uma faca em uma pedra de amolar, como ainda é feito nos dias de hoje. Evidência para essa presunção é vista na gravura de metal e cobre feita em 1575 por Johannes Stradanus (Figura 2.1), que mostra uma retífica semelhante a desenhos de Leonardo da Vinci, na qual retrata uma loja criada para retificar e polir armaduras (WOODBURY, 1959 apud McCOY, 2006).



Figura 2.1 - Retificadora utilizada em ambiente familiar, para afiar facas, semelhante aos desenhos de Leonardo da Vinci (McCOY, 2006)

O desenvolvimento de máquinas-ferramenta foi lento durante os próximos 200 anos. Neste período, a fabricação de têxteis floresceu na Inglaterra com a invenção de máquinas, como as de Hargreaves (*spinning jenny*) e a de Awkwright (*weaving machinery*). A Carton Ironworks, fundada em 1760, trouxe significativas melhoras na produção de ferros fundidos e aço, disseminando o ferro fundido para fabricação de eixos em máquinas, o que impulsionou a produção de máquinas-ferramentas que produzissem essas novas peças (McCOY, 2006).

A utilização de fluidos de corte em processos de usinagem foi concomitante com o desenvolvimento de máquinas-ferramenta, tanto nos EUA como na Inglaterra, na qual Woodbury (1959 apud McCOY, 2006) relatou maiores evidências na utilização de água como fluido de corte. Em 1838, James Whitelaw desenvolveu uma máquina de Retificadora cilíndrica para dar acabamentos em superfícies de polias em que “uma capa foi inserida para manter o respingo de água” “*a cover was provided to keep in the splash of water*” (WOODBURY, 1959 apud McCOY, 2006). James H. Nasmyth (1830), em sua autobiografia, descreve a necessidade de um pequeno tanque para abastecimento de água, ou água e sabão, para manter a ferramenta de corte refrigerada. Esta consistia em um arranjo simples de uma lata para manter o fornecimento de refrigerante e um tubo ajustável para permitir que o fluido pudesse escorrer diretamente sobre a ferramenta de corte (NAYSMYTH, 1883 apud McCOY, 2006). Woodbury (1959 apud McCOY, 2006) relata que a prática mais comum de aplicação de fluido de corte durante a usinagem úmida, consistia em usar uma esponja molhada contra a peça e que a prática foi logo abandonada. Um desenho de dezembro 1866 mostra que o abastecimento de água foi fornecido através de um bocal, e um desenho de 1867 mostra uma

proteção instalada nas guias do torno para evitar que sofressem corrosão pela água (WOODBURY, 1959 apud McCOY, 2006).

Os próximos 50 anos viram o rápido crescimento da indústria de máquinas-ferramenta e a difusão de uso de fluidos de corte, em resposta às novas invenções deste período, atendendo demandas para o transporte, incluindo ferrovias. O século seguinte viu o desenvolvimento do automóvel e do avião. Para construir essas máquinas, máquinas-ferramentas maiores, capazes de produzir grandes peças de aço pesadas, foram rapidamente projetadas (Figura 2.2), essas novas invenções foram acompanhadas da valorização dos benefícios propiciados pelos fluidos, visto que solucionaram os problemas emergentes enfrentados pelas novas máquinas-ferramenta.

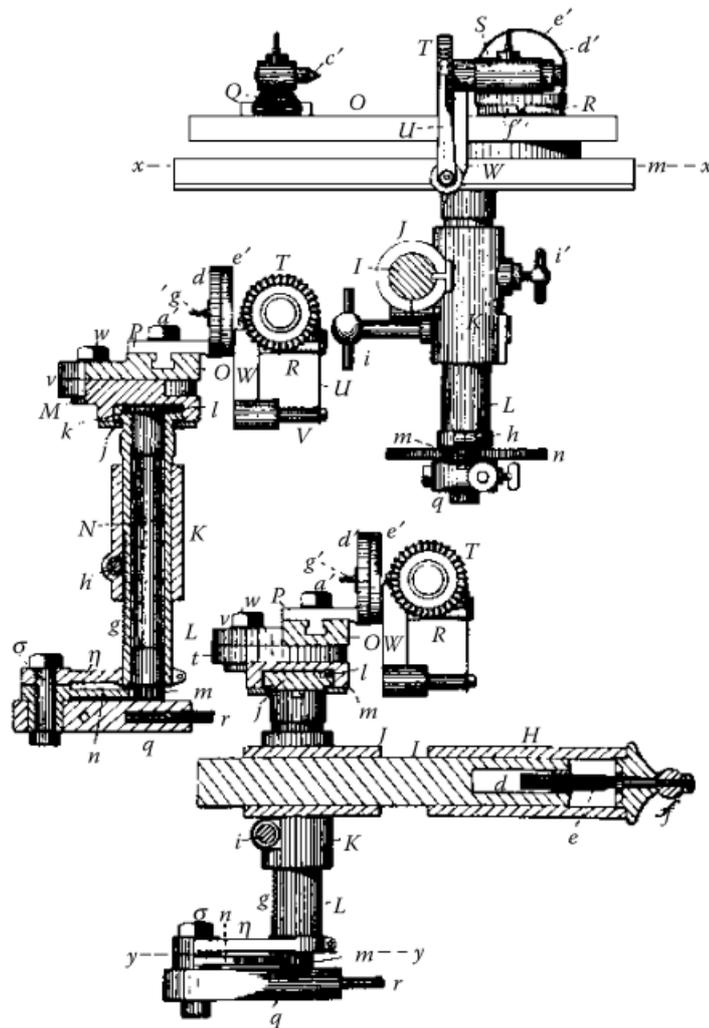


Figura 2.2 - Máquinas-ferramenta projetadas para fabricar grandes peças (McCOY, 2006)

No entanto, quatro acontecimentos foram significativos para o evolução e sofisticação das máquinas-ferramentas: i.) descoberta do petróleo; ii.) surgimento de melhores ligas de alumínio; iii.) crescimento da indústria química; e iv.) uso da eletricidade como fonte de energia (HOWARD, 1995; McCOY, 2006).

Em 1868 surgiu a primeira publicação relatando melhora substancial na produtividade do torno quando utilizado o fluido de corte. Tal fato foi confirmado por dois eventos subsequentes no mesmo ano: desenho da primeira máquina universal de retífica, patenteada por Joseph R. Brown (WOODBURY, 1959 apud McCOY, 2006) e impressão em um catálogo de Brown e Sharpe (1875), incluindo no desenho um dispositivo para transportar a água ou outros fluidos utilizados em operações de retífica (WOODBURY, 1959 apud McCOY, 2006). Obviamente, o uso de FCs na máquina foi tornando-se uma prática padrão, com estudos sobre sua propriedade lubrificante interferindo no atrito, publicados pela “*Royal Society of London Proceedings*” (MALLOCK, 1882 apud McCOY, 2006).

Nesse mesmo período, evidências para o uso de vários tipos de petróleo em operações de usinagem apareceram no “*Treatise on Friction and Lost Work in Machining and Mill Work*”, o qual advertiu que a escolha do lubrificante seria determinada pelo óleo que desse maior “suavidade” ao corte, melhorando os custos com energia. O conselho foi para a utilização de óleo de banha, embora concordasse com a prática insurgente de óleo mineral (McCOY, 2006).

Thurston, um engenheiro que presidiu o Departamento de Engenharia Mecânica na “*Stevens Institute of Technology*,” nos Estados Unidos, em 1870, trouxe importantes contribuições na área de processos de fabricação (DOWSON, 1979 apud McCOY, 2006). Foi durante este período que “misturas químicas” contendo óleos entraram em uso e ficaram conhecidas como fluidos de corte. Na sequência, o advento dos óleos de corte sulfurados em meados de 1882 foi ainda mais notável (McCOY, 2006).

Em torno deste mesmo tempo, outro famoso engenheiro estava envolvido em um empreendimento que mudou para sempre a maneira como a usinagem foi realizada e a forma como as oficinas mecânicas foram geridas. Fredrick W. Taylor, contemporâneo de Thurston, aspirava descobrir um método para administrar o corte de metais de modo que as velocidades das máquinas fossem otimizadas, aumentando significativamente as taxas de produção (McCOY, 2006).

Em 1883, através de seus diversos experimentos na usinagem de metais, Taylor (1907) provou que dirigindo um fluxo constante de água pesada no momento da remoção do cavaco, a velocidade corte era aumentada de 30% a 40%. Também revelou que a refrigeração da

ferramenta de corte, um dos elementos mais importantes dos processos de usinagem, foi deixado intocado pelos pesquisadores. Essas descobertas foram baseadas em resultados de 50.000 testes na usinagem de mais de 360 toneladas de metal, nos quais a aplicação de um fluxo de água saturado com carbonato de sódio (chamado de “espuma”), direcionado para a aresta de corte, resfriou a ferramenta, e assim preveniu oxidação/corrosão. O reservatório dessas máquinas consistia de uma panela de ferro fundido onde o fluido era drenado por tubulações para um tanque central, bem abaixo do chão, a partir do qual o refrigerante era devolvido para cada máquina por uma rede canalizada. Dessa forma, Taylor e outros pesquisadores impulsionaram o estudo e o desenvolvimento de vários tipos de fluidos de corte ao longo dos anos e, principalmente, nas últimas décadas (TAYLOR, 1907; SILLIMAN et al., 1992; DINIZ, 2010; MACHADO et al., 2015).

Contudo, os grandes avanços das máquinas-ferramentas, as altas velocidades de corte executadas e a produção de aços-ligas mais resistentes aumentaram os esforços e as tensões de corte, exigindo cada vez mais dos óleos de corte. Inicialmente estes eram principalmente combinações de óleos minerais e animais, ou misturas de enxofre livre e óleo mineral, porém o regime de utilização de recirculação contínua provocou sua decomposição química, resultando em odores desagradáveis, ranço e muitas vezes dermatite de contato (McCOY, 2006).

As desvantagens trazidas pela utilização dos fluidos de corte tiveram que ser abordadas e ganharam incentivo especial das exigentes indústrias armamentistas pela necessidade e conferir as peças dimensões mais apertadas. Sérias pesquisas foram estimuladas com o objetivo de melhorar a composição desses FCs a base de óleos. As experiências de Taylor também representaram um legado nas comunidades de engenharia, especialmente na área de fabricação, para a qual suas demonstrações estimularam novas buscas por fórmulas de fluidos de corte contendo cada dia mais inovação tecnológica. As evoluções a partir de Taylor são mostradas na Fig. 2.3. adaptada de Brinksmeier e colaboradores (2015).

2.2 Funções

Fluidos de corte (FCs) são hoje mais conhecidos pelas funções que desempenham nos diversos processos/operações de usinagem/conformação/outros nos quais são empregados do que propriamente pela sua composição química, sendo definidos como material de engenharia utilizado para otimizar processos (McCOY, 2006). Sua aplicação cumpre vários objetivos,

dentre eles, funcionar como uma ferramenta multiuso ou ainda um produto químico com múltiplas funções (BRINKSMEIER et al., 2015).

	FATOS	DESDOBRAMENTOS NOS FCs
> 1800	Demanda por usinagem de metais	Desenvolvimento do primeiro fluido baseado em produtos naturais como água e óleos vegetais e animais
1800 - 1899	Industrialização (máquinas operatrizes) Disponibilidade de óleo mineral – descoberta de petróleo Novas ligas metálicas para as máquinas (adição de cromo e vanádio melhorando a dureza) Novas necessidades de transporte – desenvolvimento de ferrovias Uso da eletricidade como fonte de energia	Substituição dos componentes naturais dos fluidos Primeiras investigações da propriedade lubrificante dos fluidos utilizados - Crescimento da indústria química Maior desenvolvimento da indústria de máquinas operatrizes bem como do uso de fluidos de corte
1900 - 1999	Ferramentas e materiais superiores Máquinas operatrizes avançadas Produção em massa	Adição de muitas substâncias químicas para incrementar a performance técnica dos fluidos Aplicação de fluidos mais nocivos contendo ácido bórico e produtos químicos clorados Primeiras abordagens para reduzir a quantidade de óleo mineral em fluidos (impulsionado pela subida do preço do petróleo)
2000 - Hoje	Regulamentação Eficiência da energia e recursos Contaminação microbiológica	Substituição ou eliminação dos clorados e outras substâncias nocivas Avaliação da sustentabilidade e da interdisciplinaridade dos fluidos Estudo do desempenho, toxicidade ao operador e meio ambiente

Figura 2.3 - História do desenvolvimento dos fluidos de corte (adaptado de BRINKSMEIER et al., 2015)

Em uma abordagem mais avançada na qual a aplicação de fluido de corte aconteça de maneira sustentável é possível enquadrá-los em três níveis, desempenhando uma ou mais funções em cada nível. Quando utilizado em diferentes aplicações o fluido de corte é considerado polivalente, podendo também apresentar múltiplas funções em uma única aplicação. O nível de aplicação pode ser subdividido em: i.) de processo unitário: remoção do

material ou processo de conformação; ii.) em máquinas-ferramentas: dispositivo que executa o processo de unidade; iii.) cadeia de processos: organização lógica das máquinas operatrizes e equipamentos de apoio, por exemplo sistemas de filtração ou limpeza (BRINKSMEIER et al., 2015).

No primeiro nível, o FC é aplicado para apoiar e facilitar a unidade do processo. As funções relacionadas são refrigeração, lubrificação, limpeza, processamento e isolamento/condução. Além disso, no nível de máquina-ferramenta, os FCs podem facilitar a circulação e retenção de componentes, bem como o monitoramento de processos e controle, acrescentando as funções de transmissão de energia e de sinal. No nível de cadeia de processo, o FC pode ser utilizado em vários processos unitários e máquinas-ferramentas (por exemplo torneamento, fresamento, retificação, polimento, etc.), assim como em diferentes materiais (metálicos e não metálicos) (JOKSCH, 2011; BRINKSMEIER et al., 2015).

2.2.1 Refrigerante

O calor gerado na interface de corte é causado pela deformação plástica do material de trabalho e pelo atrito nas interfaces da ferramenta de corte, peça de trabalho e cavaco. Para um determinado material de trabalho e ferramenta de corte, a velocidade de corte é o principal fator a afetar a quantidade de calor gerada, seguido pelo avanço de corte, e profundidade do corte (ASTAKHOV, 2012).

A ação refrigerante é uma das principais funções/contribuições dos fluidos de corte para o processo de usinagem, pois diminui a temperatura de corte dissipando (refrigeração) e reduzindo o calor no momento do corte da peça (Figura 2.4), e depende de suas propriedades físicas, químicas e térmicas. A capacidade refrigerante do FC é influenciada pela sua viscosidade, condutividade térmica, calor específico e calor específico de evaporação. Ao selecionar um MWF (*Metal Work Fluid*) para sua ação de resfriamento é necessário levar em consideração que cada material de ferramenta tem uma temperatura ideal que fornece a vida máxima da ferramenta (HOWARD, 1995; SALMON, 2006; ASTAKHOV, 2012; MACHADO et al., 2015).

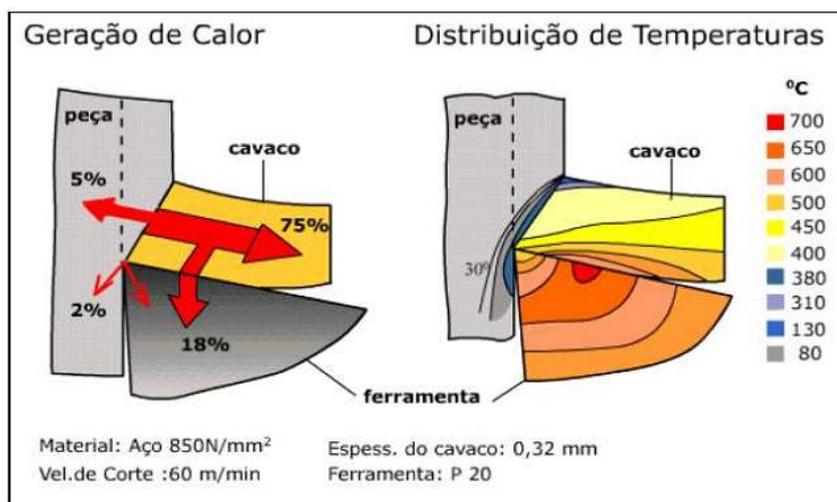


Figura 2.4 - Distribuição do calor entre peça, ferramenta e cavaco (TEIXEIRA, 2001).

Quando o fluido de corte a base de água é utilizado, a dissipação do calor é mais importante que a redução de sua geração, pois a eficiência do fluido em reduzir a temperatura de corte permite que outras variáveis do processo, como a vida útil da ferramenta, a precisão dimensional, a sua integridade superficial (por exemplo, acabamento superficial e tensões residuais de usinagem) tenham melhorias devido aos gradientes térmicos. De maneira geral, quanto maior a velocidade de corte (v_c), maiores serão as temperaturas e maior a necessidade de refrigeração (HOWARD, 1995; SALMON, 2006; ASTAKHOV, 2012; MACHADO et al., 2015).

Por outro lado, em algumas situações em que a usinagem ocorre em altas velocidades de corte e avanço, o FC pode não executar o efetivo resfriamento devido às altas rotações do eixo árvore envolvidas. Segundo Souza (2010), os efeitos negativos no processo, como a fadiga térmica e choques térmicos nos pontos de contato ferramenta-peça-cavaco onde a temperatura é máxima, também têm sido estudados.

Os meios lubri-refrigerantes removem o calor gerado durante a operação de corte impedindo que a ferramenta atinja temperatura crítica, acima da qual ela se desgasta rapidamente (SALMON, 2006; SOUZA, 2010; ASTAKHOV, 2012; MACHADO et al., 2015). Dessa forma, a difusão e a adesão, que são desgastes induzidos termicamente na ferramenta, e o amolecimento térmico do material são inibidos. Em contrapartida, ocorre uma redução da temperatura alcançada pela peça de trabalho, o que pode aumentar a dureza e resistência mecânica do material, aumentando assim o consumo de energia e as forças de corte, reduzindo a vida útil da ferramenta (ASTAKHOV, 2012; SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012; MACHADO et al., 2015).

Adicionalmente, FCs a base de água (emulsões e soluções) possuem calor específico e coeficiente de transferência de calor mais elevados do que os óleos integrais, sendo desta forma mais favoráveis às propriedades de resfriamento (SCHOLZ, 1999; SOUZA, 2010). Contudo, a capacidade refrigerante pode, por sua vez ser afetada por efeitos de lubrificação, porque a ação tribo-ativa de lubrificação leva a uma diminuição da temperatura de contato (ASTAKHOV, 2012).

Entretanto, óleos de base sintética, apesar de apresentarem pior capacidade lubrificante, comportam-se de forma superior em sua capacidade de refrigeração, quando comparado aos óleos integrais. Por não ser biodegradável, seu uso deve ser considerado de risco elevado. No entanto, as empresas não possuem sistemas de gerenciamento eficazes que proporcionem a reciclagem desses componentes (SCHOLZ, 1999; SOUZA, 2010).

Outro ponto importante a ser destacado é que o uso de FC como refrigerante do processo de usinagem também pode ter algumas consequências negativas. Durante o corte intermitente (por exemplo, fresamento) com ferramentas de metal duro, em velocidades de corte elevadas, a aplicação de FCs conduz a flutuações de temperatura consideráveis na ferramenta e, assim, podendo levar a sua falha térmica. A refrigeração intensiva da superfície quente usinada pode levar ao desenvolvimento de altas tensões residuais (tanto superficiais como em profundidade) que muitas vezes leva à deterioração de desempenho da superfície em serviço. Quando as velocidades de corte são baixas, a intensidade de desgaste da ferramenta depende da evolução da aresta postiça de corte “*build-up edge*”, isto é, sobre as propriedades de temperatura de corte e físico-mecânica do material de trabalho (ASTAKHOV, 2012).

A ação refrigerante de FCs tem um efeito muito menor sobre a temperatura de contato entre ferramenta de corte-cavaco devido ao curto tempo de contato. Desta forma a vida útil da ferramenta pode ter um aumento de 100% se o resfriamento ocorresse apenas na ferramenta e não no cavaco, cuja temperatura não afeta a vida da ferramenta (ASTAKHOV, 2012).

A transferência de calor em usinagem de superfícies quentes ocorre como resultado da convecção, condutividade térmica, radiação e reações químicas. A transferência de calor específica de q a partir de um corpo sólido com a temperatura t_T para o FC é definida pela fórmula de Newton (Eq. 2.1):

$$q = \delta(t_T - t_l) \quad (2.1)$$

onde:

δ : é o coeficiente de transferência de calor e

t_l : é a temperatura do Fluido de Corte.

A transferência de calor por radiação torna-se significativa a temperaturas superiores 800°C. Como tal o seu calor específico q_r é calculado conforme mostra a Eq. (2.2):

$$q = \varepsilon \sigma_0 t_T^4 \quad (2.2)$$

onde ε é o fator de emissividade e σ_0 é a constante de radiação de corpo negro ideal. Na maioria dos casos de corte de metal usando FCs, a transferência de calor associada com radiação e reações químicas não é particularmente significante. Portanto, para a ação de refrigeração do FCs é suficiente considerar a troca de calor por convecção; isto é, a troca de calor relacionada com a condutividade de calor do FC e a sua circulação. A intensidade de transferência de calor é determinada pelo regime de fluxo do FC (laminar ou turbulento) definido pelo número de Reynolds (Eq. 2.3):

$$Re = \frac{wD_H}{\nu} \quad (2.3)$$

onde w é a velocidade média de fluxo do FC, D_H é o diâmetro hidráulico e ν é a viscosidade cinemática do Fluido.

O cálculo da capacidade refrigerante de FCs mostrou que quando este é à base de óleo, o fator de transferência de calor diminui de 5 a 8 vezes (GODLEVSKIY; VOLKOV; MARKOV, 2009; ASTAKHOV, 2012). Quando FCs solúveis em água são utilizados, o atrito na interface da ferramenta corte/cavaco e a deformação plástica da peça de trabalho leva ao aumento dos fenômenos térmicos associados que por sua vez, conduz a um aumento na temperatura de corte. Como resultado, a temperatura na zona de corte não diminui na proporção direta do fator de transferência de calor, e depende de uma combinação de fatores mais complexos (ASTAKHOV, 2012).

2.2.2 Lubrificante

Quando a ponta da ferramenta está envolvida no corte do material de trabalho, altas pressões de contato e temperatura na interface de corte impedem a formação de qualquer tipo de filme lubrificante, que só pode ser formado com uma velocidade de corte muito baixa e atrito reduzido. A medida que a velocidade de corte aumenta, esta possibilidade diminui, principalmente porque a temperatura aumenta até o ponto em que a viscosidade do fluido diminui e a integridade de uma película lubrificante é quebrada (ASTAKHOV, 2012.)

Na interface cavaco-ferramenta existem duas condições de contato, denominadas: i.) *condição de aderência* (na qual a área de contato real é igual a aparente), com elevada tensão de compressão, impedindo o acesso do fluido de corte e ii.) *condição de escorregamento* (contato ocorre entre as asperidades das superfícies do cavaco e da ferramenta), possibilitando presença de vazios, onde o fluido consegue penetrar. Na ausência do fluido há o desgaste prematuro da ferramenta, resultado do calor e atrito gerados (RUNGE, 1990; MACHADO et al., 2015).

Em baixas velocidades de corte, na usinagem de materiais que contêm segunda fase, há a possibilidade de formação da aresta postiça de corte - APC, um fenômeno tridimensional e cíclico que diminui a força de corte, podendo até proteger a superfície de saída da ferramenta. Entretanto, a APC solta frequentemente fragmentos que prejudicam o acabamento superficial da peça, devendo assim ser evitada. Para reduzir o atrito na interface cavaco-ferramenta, reduzir ou eliminar a APC, o fluido de corte é utilizado, objetivando-se sua penetração na interface rugosa por capilaridade. Como consequência, reduz-se uma parcela da geração de calor, do consumo de energia e da força necessária ao corte, além de melhorar o acabamento da superfície (RUNGE, 1990; MACHADO et al., 2015).

Nos processos de usinagem, a lubrificação nas interfaces peça-ferramenta-cavaco é difícil e complexa, em virtude das elevadas pressões de contato nessas interfaces. Outro agravante é a dificuldade de levar esse lubrificante até a posição desejada. A eficiência do lubrificante vai depender das características intrínsecas, conferindo ou não habilidade de formar filme, na região entre o cavaco e a ferramenta, com resistência ao cisalhamento menor que a resistência do material.

Óleos de bases vegetais, provem de fontes renováveis, garantindo maior poder de lubrificação devido à polaridade de suas moléculas (Figura 2.5). Essas moléculas são longas, pesadas, e de natureza dipolar (possuem cargas elétricas opostas) (SOUZA, 2010).

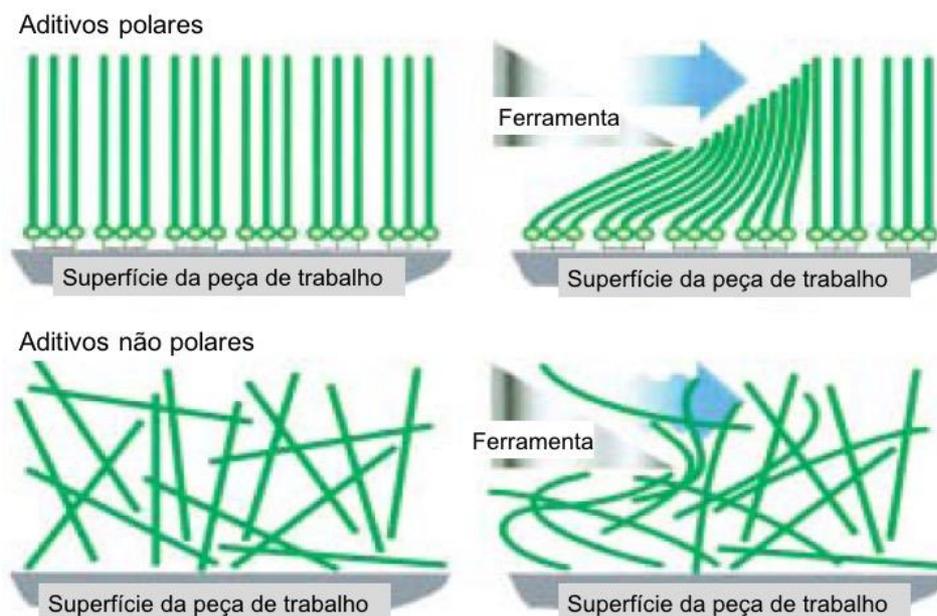


Figura 2.5 - Representação da afinidade natural de óleos polares (base vegetal) em superfícies metálicas e a maneira que as moléculas se alinham. Essa estrutura cria um filme lubrificante mais forte do que as de óleos não polares (SOUZA, 2010).

2.2.3 Remoção do cavaco da região de corte e outras

Outra importante função desempenhada pelo fluido é o papel de transportador do cavaco, retirando-o da zona de corte. Algumas formas de cavacos são prejudiciais, podendo enroscar-se na peça, na ferramenta ou gerar acidentes de maior proporção, incluindo danos a máquina-operatriz (BYERS, 2006).

Outra possível função seria a de evitar a suspensão de micropartículas da peça usinada (carbono da grafita, pós da peça, etc.) no ar, levando-as em si próprio. O fluido transporta o cavaco até a área de filtragem da máquina, na qual os de maior tamanho ficam retidos, sendo separados do fluido neste momento (BYERS, 2006).

A capacidade do fluido de corte em varrer os cavacos da zona de corte depende da sua viscosidade, vazão e da operação de usinagem que vai gerar o cavaco em um determinado formato (MACHADO et al., 2015).

2.2.4 Prevenir ressoldagens

Compostos de cobre, em particular, podem ser adicionados previamente ao fluido de corte para impedir a ressoldagem quando da usinagem de materiais ferrosos. Trabalho

desenvolvido por Frost, na Universidade de Bristol, Inglaterra mostrou como um dispositivo alimentador de partículas de cobre impediu a acumulação de aço em um rebolo abrasivo e reduziu a propensão do sistema de retificação cilíndrica, a sofrer trepidação regenerativa (CHILDERS, 2006).

2.2.5 Inibir oxidação e corrosão

Aditivos inibidores de oxidação e de corrosão são responsáveis pela proteção imediata da superfície metálica recém-usinada que é quimicamente ativa e oxida ou reage prontamente com o seu entorno. Considerando que a maioria dos fluidos irá fornecer alguma proteção contra a corrosão, outros podem fazer apenas o oposto e causar alguma coloração ou descoloração devido às suas propriedades. O fluido de corte não deve apenas proteger a peça, mas também a máquina-ferramenta, equipamentos e ferramental. Ao projetar equipamentos e ferramentas, é importante apreciar os efeitos da corrosão galvânica, que ocorrerá entre os diferentes materiais (BYERS, 2006).

Alguns fluidos de corte possuem forte atividade reativa na superfície do material usinado, e neste caso, ao penetrar nessas superfícies, atinge fissuras intersticiais superficiais do metal, bem como as superfícies do dispositivo da base e da mesa da máquina. A ação capilar permitirá que o fluido de corte percorra seu caminho entre as superfícies da peça e crie células galvânicas nestes pequenos espaços, nos quais o fluido pode ser expulso para fora, criando um sistema adequado para a corrosão. O monitoramento da condutividade elétrica do FC e a minimização dos contaminantes minerais contidos na água utilizada para diluição, são boas recomendações (BYERS, 2006).

2.2.6 Prolongamento da vida da ferramenta de corte e redução do tempo de usinagem

O fluido de corte primeiramente, e de maneira mais importante, visa maximizar a taxa de remoção de material e a vida útil da ferramenta. Fluidos que possuem boas propriedades de molhabilidade vão penetrar mais facilmente na interface cavaco-ferramenta-peça e reagir quimicamente com a superfície e subsuperfície para reduzir a tensão de cisalhamento. Ao fazê-lo, ele irá reduzir o atrito, a geração de calor e o consumo de energia. Isto não só permite taxas mais elevadas de corte, mas também aumenta a vida útil da ferramenta para uma determinada velocidade de corte (BYERS, 2006).

2.2.7 Redução da potencia necessária para corte do material

A maioria dos fluidos de corte reduzem o atrito peça/ferramenta de corte, e ao fazê-lo reduz a potência necessária para usinagem de um dado material, o que poupa energia consumida no processo e gera menos calor. Sendo assim a vida da ferramenta também é aumentada, pois sua integridade será protegida por mais tempo contra o desgaste. Globalmente, o sistema tenderá a ser mais estável. Quanto maior a eficiência do fluido em retirar calor do sistema, mais estáveis termicamente serão os processos que afetariam a integridade da peça - tanto em termos de usinabilidade, como dimensional. Sendo assim, a boa refrigeração do processo utilizando fluido de corte pode desempenhar um papel decisivo em determinados casos (BYERS, 2006; MACHADO et al., 2015).

2.3 Mecanismos de ação dos fluidos de corte

Além da funcionalidade geral dos FCs, que inclui a capacidade de refrigerar e de limpar a zona de contato entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho, efeitos decisivos que melhoram o desempenho dos FCs baseiam-se em mecanismos químicos de trabalho. Embora o uso desses fluidos tenha uma longa tradição, nem todos os efeitos, principalmente os empiricamente obtidos são hoje completamente compreendidos. Além disso, as teorias baseadas em modelos que lidam com potenciais mecanismos de atuação ainda são controversamente discutidas (BYERS, 2006).

Juntamente com o oxigênio, o componente tribo ativo “natural”, outros componentes reativos podem ser adicionados para reforçar a ação química dos FCs. Desses, os mais amplamente utilizados são os halogêneos, elementos como o enxofre e fosforo. Essas substancias são utilizadas em seu estado puro (e não como parte de compostos orgânicos), como componentes ativos conhecidos como aditivos de extrema pressão (EP). A interação química desses aditivos com as superfícies da zona de usinagem difere significativamente das reações habituais de volume, e são conhecidas como reações tribo químicas e os campos associados da ciência são conhecidos como mecano química e tribo química (ASTAKHOV, 2012).

Esses processos são aplicados a superfícies com a participação de átomos ativos, moléculas, exo elétrons e radicais livres. As características dessas reações estão ligadas com a cinética do processo e a ação catalítica das superfícies. As características gerais das reações tribo químicas são mostradas na Fig. 2.6, admitindo-se que exista uma superfície sólida ativa

no ambiente, sob a qual atua uma influencia mecânica como o atrito. Antes do início do processo (AB) a temperatura ambiente, a reação prossegue muito lentamente. A ativação mecânica causada pelo atrito ou pela formação de uma nova superfície durante o corte, acelera a reação de estado sólido e sua velocidade é aumentada em várias ordens de grandeza (BC). Quando as condições externas são invariáveis, uma velocidade constante de reação é estabelecida (CD). A interação da superfície sendo usinada com o FC sofre maior influencia das reações tribo químicas na fase de passivação (DE) (ASTAKHOV, 2012).

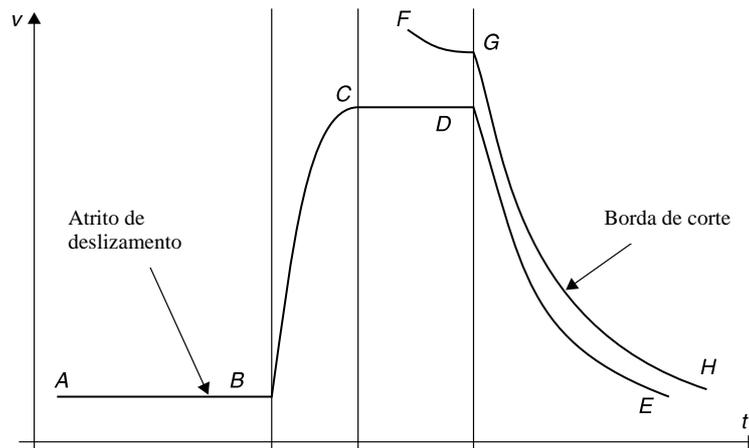


Figura 2.6 - Diagrama de reação tribo química: v , velocidade da reação; t , tempo; AB, reação na superfície “bruta”; BC, fase de crescimento com o início do atrito; CD, fase estacionária de reação; DE, diminuição da reação após o término do atrito (passivação superficial); F, momento da divisão das superfícies pelo corte; FG, fase de acesso complicado para o fluido; G, momento de separação completa do cavaco com a ferramenta; GH, fase de passivação da superfície do cavaco (ASTAKHOV, 2012).

O modelo descrito anteriormente demonstra a diferença entre a tribo reação entre o atrito simples e o atrito em corte. A Curva FGH corresponde ao corte. No ponto F desta curva, a separação do material de trabalho ocorre quando o cavaco é separado do resto da peça de trabalho. Como resultado, uma superfície fresca (frequentemente designada por uma superfície juvenil) é formada. Neste ponto, a atividade da superfície (e, portanto, também a velocidade das reações tribo químicas) está a um nível extremamente elevado (ASTAKHOV, 2012).

A velocidade de reação se torna mais lenta quando o cavaco passa a se mover a partir da interface da ferramenta (sobre a curva do ponto F ao ponto G). Depois de um certo ponto nesta curva, o ambiente tem acesso ilimitado ao cavaco e a sua passivação é fortemente acelerada; no entanto esta aceleração já não tem qualquer efeito prático sobre o mecanismo de formação de cavacos e as condições na interface ferramenta-cavaco ocorre fora do contato.

Esta curva também ilustra o fato de que os processos tribo químicos durante o corte (ao contrário de atrito normal) não estão em equilíbrio e não são estacionárias (ASTAKHOV, 2012).

Os sistemas tribológicos de “usinagem” e “conformação” são caracterizados pelo contato entre as superfícies opostas da ferramenta de corte e da peça de trabalho que estão em movimento relativo tendo entre elas um meio intermediário (o FC) que influencia significativamente as condições tribológicas. A Fig. 2.7 apresenta uma visão geral desse sistema tribológico e dos aspectos físicos e químicos relevantes desse contato (BRINKSMEIER et al., 2015).

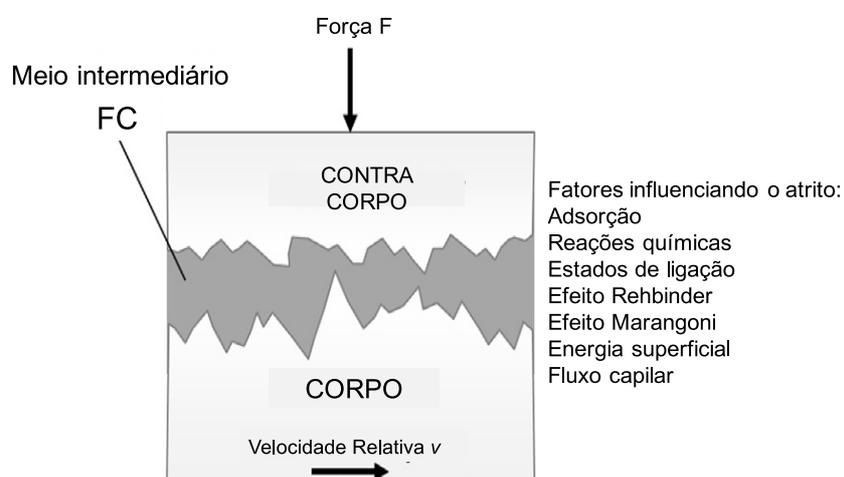


Figura 2.7 - Sistema tribológico observado em processos de usinagem e conformação que assume interações físicas e químicas entre seus componentes (BRINKSMEIER et al., 2015).

Para avaliar o desempenho de um FC é necessário ter uma perspectiva do sistema que abrange: as propriedades do FC, os materiais da ferramenta de corte e da peça de trabalho, bem como os aspectos cinemáticas do processo (BRINKSMEIER et al., 2015).

2.3.1 Aspectos físico-químicos da aplicação de fluidos de corte

O desempenho de um FC é o resultado de uma conjugação complexa de efeitos químicos e físicos. Na prática, esses efeitos se sobrepõem, o que torna difícil separar os efeitos individuais. Contudo, o entendimento dos mecanismos individuais permite a explicação dos efeitos observados para a maioria dos dados publicados (BRINKSMEIER et al., 2015).

Um fator decisivo para a discussão do mecanismo de atuação de FCs é o tipo de interação que este tem com as superfícies metálicas ao redor. Em 1970, um conceito foi publicado sobre as interações de aditivos contendo enxofre, que conduziam à formação de camadas de enxofre inorgânico (não necessariamente os sulfuretos de ferro (FeS)) em superfícies de metal (FORBES, REID, 1973). Seu trabalho é discutido de forma controversa e inicia a análise científica dos mecanismos de ação das substâncias tensoativas. Os três possíveis mecanismos de atuação assumidos pelo enxofre contendo aditivos: i.) fisiossorção (adsorção física), quimiossorção (adsorção química) e reação química (BUCKLEY, 1982) são apresentados na Fig. 2.8.

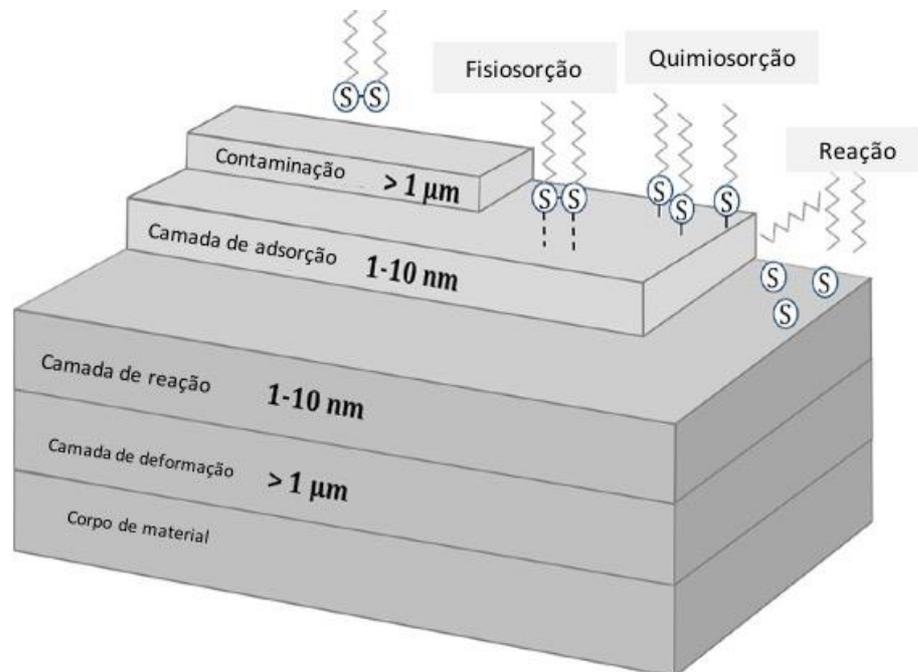


Figura 2.8 - Esboço esquemático de uma superfície usinada incluindo formas de interação assumidas pelos aditivos contendo enxofre (FORBES; REID, 1973; BRINKSMEIER; WALTER, 2000; BUCKLEY, 1982; BRINKSMEIER et al., 2015).

Superfícies metálicas e moléculas de aditivo, independentemente do tipo de interação envolvida, interagem apenas baseado na proximidade física entre elas. Interações inter e intramoleculares são relevantes para a capacidade dos aditivos pois melhoram a funcionalidade dos FCs. Quando uma molécula de aditivo se aproxima da superfície do metal, a certa altura, a distância mínima entre a molécula e a superfície será inferior a um limite crítico, levando a interações intermoleculares fracas: ligação de van der Waals ou interação de van der Waals. Estas forças de van der Waals atuam apenas sobre uma pequena distância (BRINKSMEIER et al., 2015).

Em geral, as forças de van der Waals são divididas em três tipos diferentes dependendo da interação dipolo (polarização fraca de diferentes partes de uma molécula) e da força resultante da interação: força Debye, força London e força Keesom (LONDON, 1937; BRINKSMEIER et al., 2015). Interações intermoleculares fortes ocorrem quando grupos funcionais de moléculas polarizadas, com um par de elétrons livres envolvidos como $-NH$, $-OH$, $-F$, são capazes de formar ligações de hidrogênio. A polarização leva a uma certa orientação elétrica das moléculas e influencia o seu comportamento físico. A elevada tensão superficial da água é um exemplo bem conhecido e evidente deste efeito. Atkins indica que as ligações de hidrogênio dominam ligeiramente as de van der Waals em relação à força das interações (ATINKINS; de PAULA, 2009). No que se segue, os tipos de interações de aditivos com as superfícies metálicas são discutidos quanto aos efeitos baseados na adsorção (fisiossorção e (em alguns casos) quimiossorção subsequente) ou reações químicas (BRINKSMEIER et al., 2015).

Do ponto de vista energético, a entalpia de fisiossorção é substancialmente menor do que para a quimiossorção. Por adsorção de moléculas ativas na superfície do metal, ligações existentes são quebradas e novas interações entre as moléculas de aditivos e os átomos na superfície de metal são realizadas. Na Fig. 2.9 é apresentado o perfil de energia potencial para a adsorção de uma molécula a partir de uma superfície de metal. Neste caso, fisiossorção e subsequente adsorção química são apresentados. Quimiossorção dissociativa é caracterizada pelo processo de fracionamento molecular da molécula de aditivo que se aproxima. Nos gráficos, se aproxima de uma molécula da superfície e o nível energético diminui quando é adsorvido para o estado fisiossorção (P) (BRINKSMEIER et al., 2015).

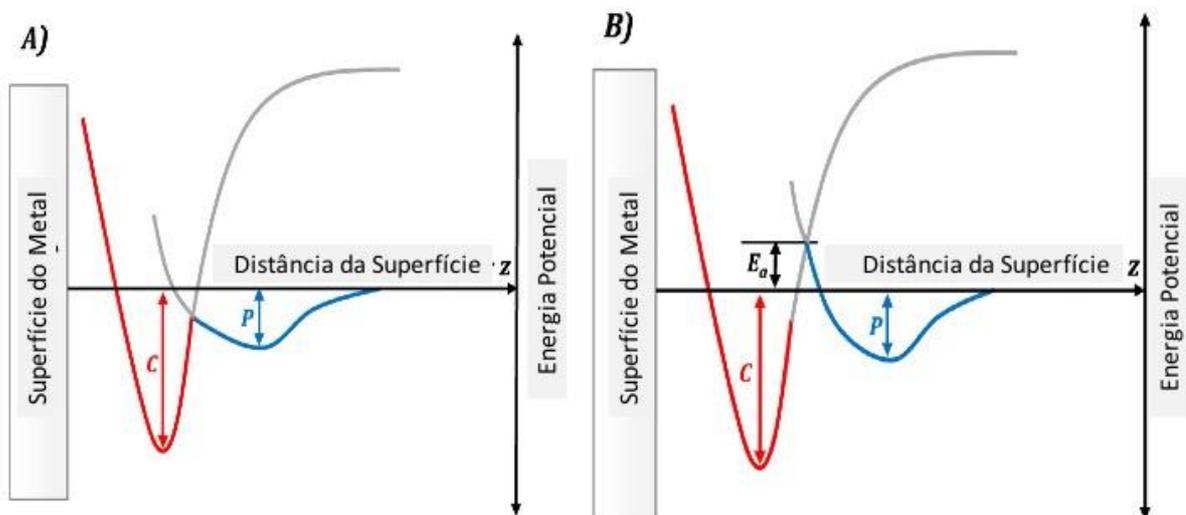


Figura 2.9 - Perfis de energia potenciais para a fisiossorção e quimiossorção de uma molécula. P é a entalpia de fisiossorção e C que por quimiossorção é apresentado em (A) sem energia de ativação e em (B) com a energia de ativação, simplificada de acordo com Atkins e de Paula (2009).

No caso em que a barreira de energia potencial é baixa, a molécula é transferida diretamente para o estado de quimiossorção (C). Se a barreira de energia é mais elevada, a energia de ativação (E_a) é necessária para superar a barreira energética e para permitir a quimiossorção. Com base no nível de energia, conduz a quimiossorção interações mais intensas das moléculas. Isto pode ser correlacionado com a capacidade de lubrificação das moléculas do aditivo. Estas moléculas, que são capazes de interagir através de quimiossorção, melhoram significativamente a lubrificação. Quanto a energia de ativação, em alguns casos tem de ser induzida para permitir a quimiossorção. A eficácia dos aditivos é dependente das condições do ambiente (por exemplo, parâmetros de usinagem) (BRINKSMEIER et al., 2015).

Fisiossorção e quimiossorção (adsorção) são mecanismos obrigatórios, que devem ocorrer antes de uma subsequente reação química. Quando o material de superfície e a molécula (adsorvida) que se aproxima perdem as suas estruturas individuais de elétrons e formam uma molécula inteiramente nova, com propriedades próprias, uma reação química está completada. Novas interações intramoleculares resultam de uma reação química: ligações atômicas covalentes. Na ilustração esquemática da Fig. 2.8, os átomos de enxofre do aditivo liberam seus grupos orgânicos para o ambiente e formam sulfuretos (por exemplo, ferro-sulfureto) (BUCKLEY, 1982). No entanto, a reação química não é um passo obrigatório, a ocorrer após fisio e quimiossorção, sendo que as três têm que ser consideradas em relação à sua ocorrência combinada em processos químicos. Por exemplo, com relação a formação de camadas de óxido em superfícies metálicas, a quimiossorção de oxigênio pode ser uma etapa intermediária antes da reação química do oxigênio com α -Fe (BRUCKER; RHODIN, 1976).

A questão do mecanismo dominante de atuação de FCs está intimamente ligada aos aspectos de tempo. Considerando o tempo de contato entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho nos processos de usinagem, a nova superfície é gerada dentro de uma escala de tempo de milissegundos. Para algumas das reações químicas ocorridas, este intervalo de tempo não é suficiente para permitir o rompimento e a formação de ligações covalentes. A adsorção é um mecanismo muito mais rápido, que poderia ser realizado no tempo de processamento. Contudo, além de aspectos como o tempo, outros aspectos devem ser discutidos, visto que os efeitos favoráveis da presença de aditivados em FCs utilizados nos processos de fabricação são inegáveis (De CHIFFRE, 1990; De CHIFFRE, 2009;

KAWAMURA, 1986) e os efeitos favoráveis mais prováveis devem ser investigados, como: i.) o efeito Rehbinder e microfissuras; ii.) energia livre de superfície e tensão superficial; iii.) fluxo por capilaridade e efeito de Marangoni; iv.) viscosidade, e v.) complexidade dos mecanismos de funcionamento dos FCs (BRINKSMEIER et al., 2015).

2.3.1.1 Efeito Rehbinder e microfissuras

O acesso do fluido de corte a interface peça-ferramenta bem como a extensão de seu alcance nestas superfícies ainda não está completamente claro. No entanto, em 1928, o químico russo Rehbinder apresentou uma nova teoria sobre a influencia de superfícies polares na energia de superfície de cristais minerais através da formação de camadas nas interfaces (REHBINDER, 1928 apud BRINKSMEIER et al., 2015). Em vários experimentos, Rehbinder e colaboradores observaram uma forte redução da resistência e da dureza destes cristais causada por exemplo por ácido oleico dissolvido em óleo mineral (BRINKSMEIER et al., 2015).

Rehbinder explicou esse efeito pelo “enfraquecimento das ligações dos elementos de superfície de uma estrutura devido a adsorção de moléculas de superfície ativas” (REHBINDER; LICHTMAN, 1957). O local da ação foi referido como “microfissuras”, que resultam da pré usinagem e tem sido discutida a sua presença em quase todas as peças de trabalho de relevância prática. A adsorção das substancias polares ativas e a existência de irregularidades como microfissuras, e ou o rearranjo de ligações interatômicas em um sólido, também levam a uma diminuição da força de espécimes metálicos (REHBINDER, 1931; REHBINDER; WENSTRÖM, 1930).

Merchant (1950; 1957) e Postinikov (1967) sugeriram o alcance do fluido lubrificante nestas superfícies por capilaridade, porém, assumindo falhas visto que o contato do fluido com a interface de corte não é completo. Por outro lado, Williams e Tabor (1977), utilizando lubrificantes como oxigênio e argônio puros e suas misturas com CCl₄ na usinagem do aço, verificaram que a penetração dos mesmos na interface de corte dependeria da pressão de vapor inserida no sistema e do tamanho molecular (MACHADO et al., 2015).

O efeito Rehbinder implica em uma relação entre a energia livre de uma superfície recém usinada e a força do sólido. Até hoje, a ocorrência, tamanho e localização de microfissuras em superfícies metálicas recém gerados não é realmente esclarecida. De acordo com Rehbinder e colaboradores as substâncias ativas de superfície (por exemplo, ácido valérico, ácido esteárico, etc.) difundem-se para microfissuras formadas numa superfície

recém-usinada e evitam a ressoldagem (REHBINDER; LICHTMAN, 1957). Contudo, um número elevado de parâmetros tais como a temperatura, tensão dentro do material da peça de trabalho, e a atividade do meio externo tem influência sobre o efeito obtido (MARINESCU et al., 2013; BRINKSMEIER et al., 2015).

2.3.1.2 Energia de superfície livre e tensão superficial

A chamada molhabilidade de FCs é outro aspecto a ser considerado para se determinar alta eficiência de um fluido. Uma abordagem para descrever a capacidade de umedecimento de FCs em superfícies de metal é a análise da energia livre de superfície e a tensão superficial através da medição do ângulo de contato θ (Fig. 2.10) (BENITO et al., 2010). A energia livre de superfície específica e a tensão superficial entre as fases em contato são usadas para explicar processos de molhamento na teoria da adesão termodinâmica (BENITO et al., 2010; BRINKSMEIER et al., 2015).

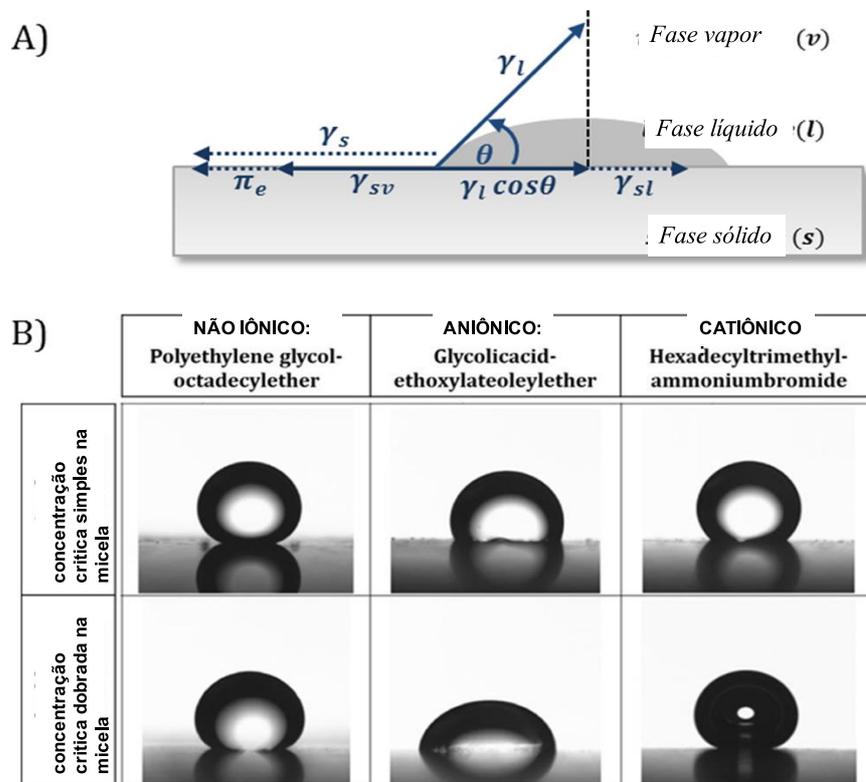


Figura 2.10 - (a) Cálculo do ângulo de contato θ de uma gota séssil de acordo com (GLEICH, 2004), (b) medição do ângulo de contato: imagens de gotas (óleo de base / surfactante / água) em uma superfície polida de aço AISI 1015 (CAMBIELLA et al., 2007).

Benito e colaboradores (2010), determinaram o mecanismo de ação de FCs emulsionáveis, de acordo com a capacidade do surfactante de formar ou não íons. Superfícies de aço imersas em solução aquosa apresentam carga, que depende do pH da solução. Nesse estudo verificou-se que a adição crescente de emulsificante aniônico ao fluido reduziu o pH do fluido e mudou o sinal da superfície do aço de negativo para positivo, aumentando a adsorção de monômeros aniônicos. Durante este processo, o monômero do surfactante adsorvido teve sua cabeça hidrofílica ligada à superfície de aço, enquanto a cauda hidrofóbica foi orientada para a solução, aumentando o caráter hidrofóbico e melhorando a umectação das gotículas de óleo na superfície da peça usinada. Nesse processo, a lubrificação do sistema foi aumentada (Figura 2.10b).

Vários outros estudos abrangentes e fundamentais (ZISMAN, 1963; 1964; WU, 1971; GLEICH, 2004) foram realizados para descrever o sistema específico de energia livre de superfície entre as fases e foram capazes de substanciar a equação (Eq. 2.4):

$$\gamma_s - \pi_e = \gamma_{sv} = \gamma_l \cos\theta + \gamma_{sl} \quad (2.4)$$

onde γ = tensão superficial da fase líquida, γ_s = energia livre de superfície da fase sólida, γ_{sl} = energia de superfície na interface de fase sólida/líquida; γ_{sv} = energia de superfície na interface da fase líquido/vapor; θ = ângulo de contato e π_e = pressão espalhamento (BRINKSMEIER et al., 2015).

De um modo geral, a diminuição do ângulo de contato (entre a fase líquida e sólida), demonstra melhoramento da capacidade molhante do fluido. Neste caso, a adesão de substâncias químicas presentes no líquido em contato com a superfície sólida é facilitada (GLEICH, 2004). Isso permitiria uma melhor lubrificação no trabalho de metais com base em interações entre aditivos e a superfície do metal (CAMBIELLA et al., 2007; BRINKSMEIER et al., 2015).

2.3.1.3 Fluxo por capilaridade e efeito Marangoni

A tensão superficial tem uma influência não só sobre a pressão de vapor, mas também sobre o fluxo por capilaridade. Ambos os efeitos são fatores relevantes para a capacidade de substâncias de superfície ativas (aditivos) em fluidos penetrarem em (micro) fissuras de acordo com o efeito Rehbinder. Considerando os aspectos de tempo de processos de fabricação, o rápido transporte de FCs para os locais relevantes de interação com a superfície

metálica, é crucial para se obter o efeito de aplicação do FC. O fluxo capilar suporta significativamente o processo de transporte.

O efeito convectivo Marangoni (1878) é uma inter-relação física, que descreve o comportamento de fluidos, dependendo do gradiente de temperatura na área circundante (KLIEN; SURBERG; STEHR, 2009; VELARDE; ZEYTOURIAN, 2003). Este efeito é um fenômeno induzido pela tensão superficial, por estar em função da temperatura ($d\sigma/dT - \sigma_T < 0$). Isto leva ao fluxo de fluido por termo capilaridade e a instabilidade em sistemas superficiais livres não-isotérmicos como teoricamente ilustrada na Fig. 2.11 (DAVIS, 1987; Van HOOK et al., 1997; BRINKSMEIER et al., 2015).

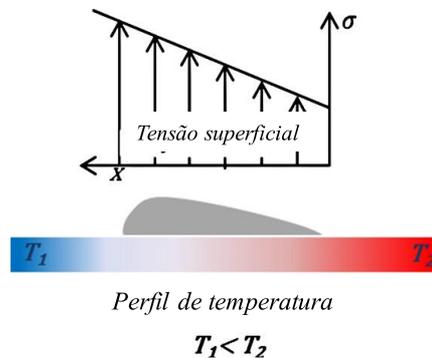


Figura 2.11 - Ilustração esquemática de tensão superfície dependente da temperatura em líquidos (aqui: uma gota em uma superfície sólida) (BRINKSMEIER et al., 2015).

2.3.1.4 Viscosidade

A resistência das moléculas de um fluido ao escoamento, gerando uma tensão de cisalhamento, caracteriza sua viscosidade. De acordo com Isaac Newton (1687), quando a viscosidade aumenta em função do aumento desta tensão, ou seja, a viscosidade mantém-se constante enquanto há variação da taxa de cisalhamento (relação linear entre ambos), trata-se de fluidos Newtonianos (apud FERREIRA; et. al., 2005). Para os demais casos, quando a viscosidade sofre variação de acordo com a variação na taxa de cisalhamento (relação não linear), trata-se de fluidos não newtonianos, cuja viscosidade é conhecida como aparente e seus valores podem aumentar ou diminuir de acordo com as características de cada fluido (PEREIRA, 2006). Esses fluidos podem ser classificados como: i.) plástico de Bingham; ii.) independentes do tempo (pseudoplásticos, dilatantes, viscoplásticos) e iii.) dependentes do

tempo (visco elásticos – subdivididos em liotrópico ou reopético) (FERREIRA; et. al., 2005; PEREIRA, 2006)

A viscosidade deve ser considerada em relação: ao efeito Rehbinder, a energia de superfície e ao efeito Marangoni, por tratar-se do principal fator que influencia a capacidade de óleos em manter um filme lubrificante satisfatório, bem como a habilidade dos óleos de fluir (SOMAYAJI, 2008). FCs à base de água tem uma viscosidade baixa comparativamente. As substâncias ativas da superfície são usadas em pequenas concentrações (ver Tabela 2.1), a maior parte delas são mais lipofílicas e, assim, mantem-se solvidas nas gotículas de óleo de uma micela. Portanto, para FCs à base de água, a influência da viscosidade de substâncias ativas da superfície pode ser negligenciada (BRINKSMEIER et al., 2015).

Para FCs à base de óleo, a elevada viscosidade dos aditivos, tais como polissulfuretos é um fator notável. Um aumento da concentração de um aditivo pode vir junto com viscosidade mais elevada (e, portanto, melhor capacidade de adesão) do FC. Isso torna difícil de rastrear uma influência da concentração de aditivo variada. Os efeitos positivos podem ser devido à interação do aditivo com a superfície do metal, como também pela formação de uma camada de líquido aderida (BRINKSMEIER et al., 2015).

Em geral, dois tipos de viscosidade são diferenciados: viscosidade cinemática e dinâmica. A viscosidade dinâmica depende da temperatura e é definida como a relação entre a tensão de cisalhamento que atua sobre o fluido e a taxa de cisalhamento (SOMAYAJI, 2008). A viscosidade cinemática é definida como a razão entre a viscosidade dinâmica e a densidade do fluido (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2005; 2014) e é um parâmetro muito utilizado pelos fabricantes de FCs para caracterizá-los.

O índice VI de viscosidade é um valor escalar que indica a alteração da viscosidade em função das alterações de temperatura. Este parâmetro é geralmente usado para indicar lubrificantes para sistemas mecânicos como motores ou engrenagens. Lubrificantes com um alto índice de viscosidade, são capazes de manter a viscosidade constante numa larga faixa de temperaturas. Devido ao seu elevado peso molecular e arquitetura altamente ramificada de cadeia, os polímeros são componentes adequados para melhorar a viscosidade de FCs (SANTOS et al., 2004; WANG; ZHU, 2007; GHOSH; DAS, 2014). MWFs com baixa viscosidade emitem compostos orgânicos voláteis (COV) mais facilmente (SIMPSON et al., 2000).

2.3.1.5 Complexidade dos mecanismos de funcionamento dos FCs

A lubrificação é uma das tarefas mais importantes dos FCs nos processos de fabricação. A capacidade de lubrificação é o resultado de uma complexa combinação de aspectos físicos (por exemplo, fluxo capilar, efeito Marangoni, viscosidade) e interações químicas (por exemplo, adsorção ou reação química). Por exemplo, a temperaturas mais elevadas, a viscosidade do FC diminui o que pode aumentar a capilaridade e a capacidade de molhamento. Mas, devido ao efeito Marangoni o FC flui para longe da zona mais quente. Como consequência desse efeito e em contrapartida, as condições individuais de um processo de fabricação são decisivas quanto ao mecanismo de trabalho do FC que dominará (BRINKSMEIER et al., 2015).

A velocidade de corte adotada em um determinado processo será um fator relevante para a determinação da atuação dos fluidos de corte. Em velocidades de corte mais elevadas, predomina a ação refrigerante em relação à lubrificante. Nestas condições, o fluido atua na zona de escorregamento, onde altera o gradiente térmico na ferramenta ao mesmo tempo em que reduz seu volume, afetado pelo superaquecimento (TRENT, 1991). Estudo proposto por Willians (1977 apud TRENT, 1991) confirma a perda da ação lubrificante em altas velocidades de corte, determinando que o fluxo de fluido deixa de se direcionar à ponta da ferramenta por ação capilar, sofrendo ação hidrodinâmica. Este efeito seria mais pronunciado com o aumento da velocidade de saída do cavaco. Assim, o fluido utilizado em altas velocidades de corte teria apenas características refrigerantes, recomendando-se um óleo à base de água (BENITO, 2010; MACHADO et al., 2015).

2.3.2 Características da superfície metálica

O tipo e a intensidade de interação química de FCs com superfícies metálicas é, por um lado, fortemente dependente da composição, aditivação e base do fluido. Por outro lado, a química das superfícies metálicas envolvidos (a ferramenta e a peça) desempenha um papel decisivo para a eficácia de um FC específico. As propriedades químicas de uma superfície metálica variam consideravelmente devido à composição básica, a presença e combinação de elementos de liga, a microestrutura, as condições envolvidas, o tipo de pré-tratamentos químicos e térmicos, etc. Até hoje, o estado químico de uma superfície metálica no momento em que o processo de metalurgia ocorre não pode ser medido ou estimado. Assim, os mecanismos de funcionamento dos FCs e de seus aditivos não tenham sido experimentalmente validados ou medidos em profundidade (BRINKSMEIER et al., 2015).

2.3.3 Componentes específicos dos FCs e seus efeitos sobre os processos selecionados

As propriedades químicas de superfícies metálicas diferem significativamente. Como consequência, o tipo e intensidade da interação de aditivos de FCs com materiais diferentes varia consideravelmente. Esta não é uma nova descoberta, mas, no entanto, em publicações com foco em desempenho de fluidos, a química do metal é muito pouco abordada (BRINKSMEIER et al., 2015). Os mecanismos de ação explícitas dos diferentes tipos de aditivos dos FCs são ainda não cientificamente verificadas. Resultados recentes indicam que a adsorção é provavelmente o aspecto mais importante da interação de aditivos com superfícies metálicas. A ocorrência de camadas resultantes de reações químicas, no entanto, é um fenômeno bem descrito (BRINKSMEIER et al., 2015).

Dois aspectos relacionados com a capacidade dos aditivos para acúmulo de ligações covalentes na superfície do metal durante o processo de fabricação devem ser considerados: i.) o tempo disponível para que o aditivo possa realizar uma reação química no decorrer do processo é muito curto e a adsorção é uma maneira muito mais rápida de interação; ii.) no caso de aditivos que reagem quimicamente com as superfícies metálicas, a sua concentração deve diminuir consideravelmente ao longo da vida útil de um FC (à base de água ou à base de óleo) (BRINKSMEIER et al., 2015).

2.4 Formulações dos fluidos de corte

Devido a uma crescente conscientização da necessidade de proteger o meio ambiente, e o operador da máquina-ferramenta, bem como pressões por inovações tecnológicas que otimizem a produtividade dos processos industriais que utilizam os fluidos de corte, novas iniciativas de desenvolvimento de produtos tem surgido (PAWLAK, 2003). O desenvolvimento de normas ambientais ou legislação que regulamente o uso de lubrificantes existe em alguns países como Áustria, Canadá, Hungria, Japão, Polónia, Escandinávia, Suíça, os EUA e a União Europeia (BARTZ, 1998).

A importância deste tipo de legislação está em exigir dos fabricantes de fluidos lubrificantes/refrigerantes que os mesmos sejam compatíveis com o ambiente, impactando significativamente sobre o uso e descarte de fluidos de corte, incentivando a utilização dos materiais de fontes renováveis, e ambientalmente seguros. O curso de ação dos fabricantes de FCs deveria ser o de reduzir a toxicidade aos seres vivos e aumentar a biodegradabilidade quando descartado. O desenvolvimento de critérios adequados para fabricação de FCs não é

uma tarefa simples. Na Fig. 2.12 a autora propõe um esquema que reconhece as obrigações e responsabilidades sociais, tanto dos usuários quanto as ambientais, que os fabricantes de fluidos de corte devem atender.

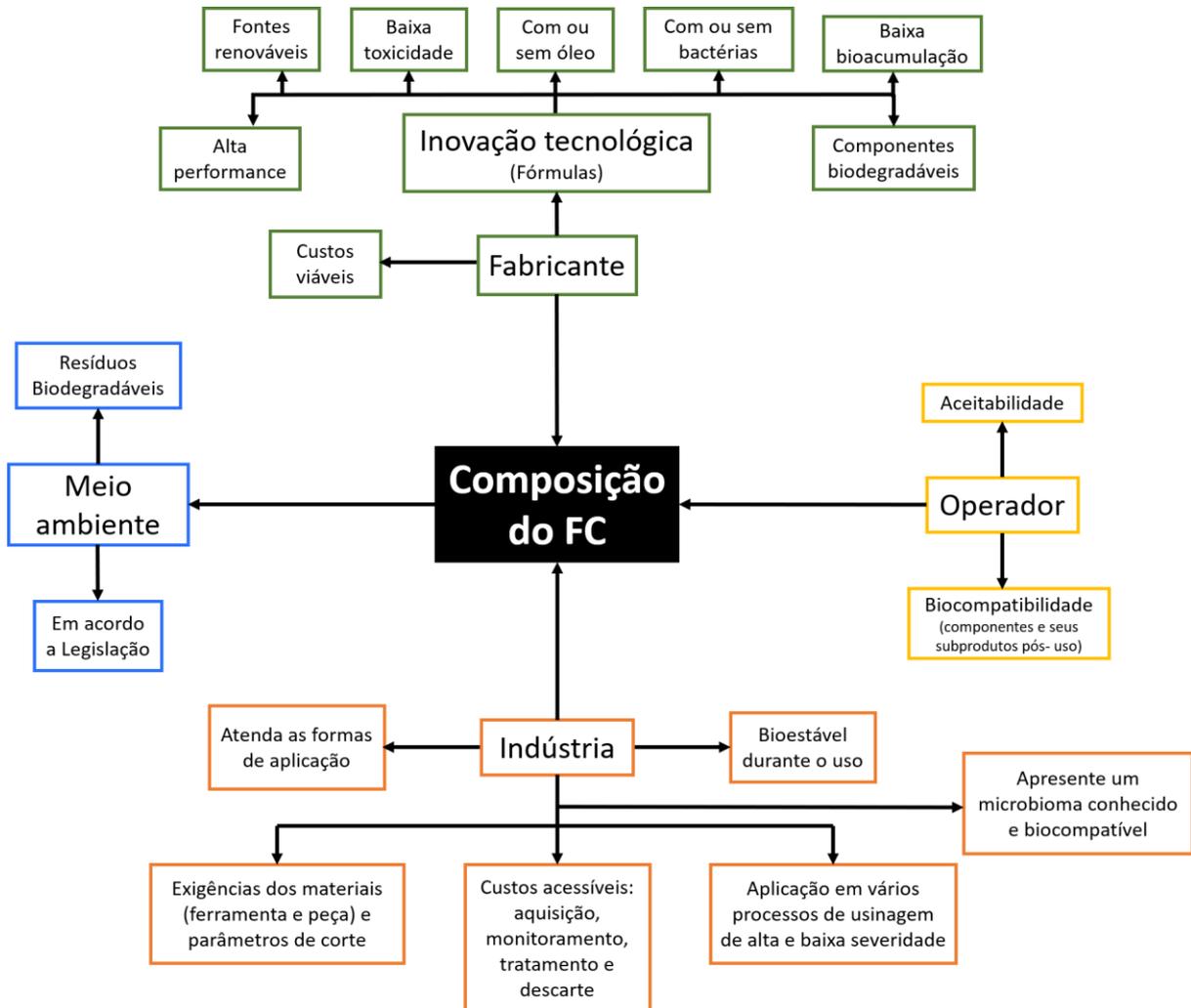


Figura 2.12 – Conceito envolvendo necessidades e exigências do mercado na formulação de um fluido de corte (Fonte: autora)

Apesar de atingir altas taxas de desempenho no processamento de metais, a utilização de FCs a base de óleo mineral é frequentemente associada a desvantagens ambientais, funcionais, econômicas e à saúde humana (DETTMER, 2004; WINTER; BOCK; HERRMANN, 2012), necessitando ser vista de forma crítica, devido ao potencial perigo associado em cada fase de seu ciclo de vida, desde a extração de recursos até a eliminação (DETTMER, 2004). Uma possível alternativa sustentável pode ser a utilização de polímeros diluídos em água, mas o fator decisivo nessa substituição é a capacidade de atingir

desempenhos semelhantes ou melhores do que os obtidos utilizando FCs convencionais (WINTER; BOCK; HERRMANN, 2012).

Os FCs a base de óleos puros, ou integrais e os de base aquosa têm recebido em suas formulações um impressionante número de fontes de matérias-primas (Figura 2.13). Em ambos os casos, os óleos naturais e sintetizados têm em sua composição produtos à base de óleo mineral, bem como materiais de fontes renováveis, enquanto ésteres sintetizados recebem triglicerídeos de base vegetal ou animal (por exemplo óleo de canola, óleo de palma, gordura animal) e um álcool, sendo estes os fluidos de fontes renováveis mais comuns até agora (BRINKSMEIER et al., 2015).

Os biopolímeros produzidos a partir de matérias-primas renováveis são aqueles que podem ser produzidos totalmente ou parcialmente por essas matérias-primas (por exemplo: etanol e açúcares de cana de açúcar, óleos vegetais, dentre outros) (SHEN; HAUFE; PATEL, 2009).

Esses materiais alternativos representam melhorias importantes nos fluidos de corte contendo bases tradicionais devido a alta qualidade, bom desempenho das propriedades, nenhuma toxicidade e excelente biodegradação. Para cumprir os requisitos ambientais exigidos para os lubrificantes ambientalmente adaptados (LAAs), os ésteres sintéticos fornecem o desempenho tecnológico e composição necessários (PETTERSON, 2006). A relevância dos ésteres torna-se óbvia para FCs à base de óleo por seu grande número e percentagem de opções identificadas (DETTMER, 2006; OLIVEIRA; ALVES, 2006; LAWAL; CHOUDHURY; NUKMAN, 2012).

Para os FCs à base de água, ésteres sintetizados também são importantes, mas há uma maior diversidade de fluidos mais adequados. Por exemplo, Winter, Bock e Herrmann (2012a; 2012b; 2013), têm trabalhado em soluções de FCs baseadas em glicerol e em biopolímeros. Além de FCs renováveis, líquidos iônicos e FCs re-refinados tem obtido espaço como base em soluções (PETTERSON, 2006; STOLTE et al., 2012; PHAM et al., 2014). Além disso, nano partículas de ácidos graxos sulfurados e líquidos iônicos são introduzidos novamente como aditivos alternativos (DEORSOLA et al., 2012, STOLTE et al., 2012).

Existem pressões mundiais para que o FC: i.) reduza toxicidade, principalmente quando aerossolizado (aplicação por MQF); ii.) seja de manuseio seguro ao ambiente e ao operador, iii.) tenha fácil manutenção; iv.) comporte-se de maneira bioestável quando em uso e v.) seja biodegradável quando do descarte. Para ser validado nestes princípios, vários aspectos devem ser considerados (BARTZ, 1998; PAWLAK, 2003), como: i.) ótima

performance em uso; ii.) baixa bioacumulação iii.) baixa toxicidade; iv.) emissão de escapes ou de resíduos reduzida ou limpa; vii.) biodegradabilidade.

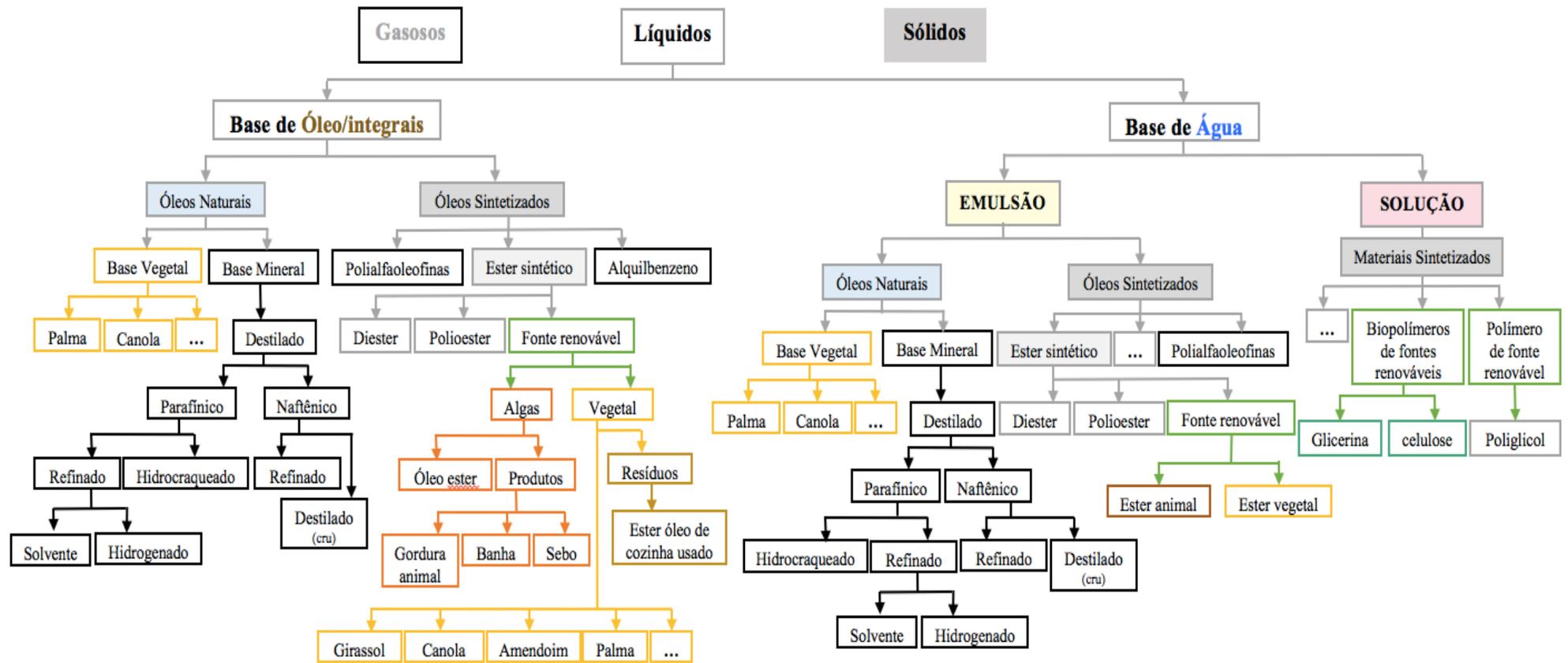


Figura 2.13 - Tipos de bases oleosas/sintéticas utilizadas nas formulações de FCs (adaptado de BRINKSMEIER et al., 2015)

A presença de aditivos nos lubrificantes é conhecida por ter um efeito significativo sobre a taxa de biodegradação. Os aditivos que contêm metais de transição têm um efeito negativo sobre a biodegradação, enquanto no lado positivo, estão os aditivos contendo nitrogênio e fósforo. Os substitutos de óleos minerais mais comuns consistem em óleos vegetais naturais (ésteres) e ésteres sintéticos. Óleos de colza ou canola são as bases mais comuns para lubrificantes de base vegetal. Aditivos para lubrificantes também devem ser biodegradáveis e não tóxicos, ou pelo menos não devem interferir com a biodegradação do fluido base. Os aditivos que são considerados adequados para lubrificantes biodegradáveis, não devem conter cloro ou metais pesados e não devem ser controlados sob qualquer regulação em saúde e segurança ocupacional (PAWLAK, 2003).

A degradação pode ocorrer por meio abióticos e bióticos, incluindo hidrólise, fotólise e biodegradação. Portanto, antes de realizar testes de biodegradação, deve-se avaliar as capacidades hidrolíticas e fotolíticas de uma substância. Do ponto de vista ecológico a maior parte do interesse na degradação é na área de biodegradação. Determinar a capacidade de biodegradação de um material é muito difícil, visto que a maioria dos métodos para testes de biodegradação são desenvolvidos para materiais solúveis em água e muitos materiais presentes nos fluidos são hidrofóbicos. A biodegradabilidade de alguns lubrificantes é mostrada na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Biodegradabilidade de alguns lubrificantes (PAWLAK, 2003)

Tipo lubrificante	Biodegradabilidade (%)	Tipo lubrificante	Biodegradabilidade (%)
Hidrocraqueados	25 – 80	Di-ésteres	50 – 100
Óleos brancos	25 – 45	Poliol Esteres	55 – 100
Óleos minerais	10 – 45	Esteres aromáticos	0 – 95
Óleos vegetais	75 – 100	Polipropileno glicóis	10 – 30
Polialfaolefinas	20 – 80	Polietileno glicóis	10 – 70
Alquilbenzenos	05 – 25	Polieteres	0 – 20

2.5 Classificação

Há quatro tipos de FCs: (1) óleo integral, (2) óleo emulsionável em água, (3) óleo semissintético, e (4) o óleo sintético (ROBERTSON; WEIR; SHERWOOD BURGE, 1988; NIOSH, 2001; GAUTHIER, 2003; MACHADO et al., 2015; KURAM; OZCELIK; DEMIRBAS, 2013). Excetuando-se os fluidos de corte sintéticos que são livres de óleo mineral, os tipos 1, 2 e 3 podem apresentar óleo base vegetal, mineral ou ambas, em proporções diferenciadas. As formulações contendo óleo de base mineral geralmente incluem: petróleo (1 a 5%), sulfonatos de petróleo (0,1 a 0,5%), e ácidos graxos livres (< 0,1%),

principalmente ácidos linoleico e oleico, que são fontes primárias de carbono para o crescimento microbiano (FOXALL-VANAKEN et al., 1986; CYPROWSKI et al. 2007); enquanto aquelas contendo óleo de base vegetal, consistem de triacilglicerídeos (triglicerídeos), que acrescentam propriedades lubrificantes a este tipo de fluido, devido a suas cadeias longas de ácidos graxos, de natureza polar, proporcionarem um filme lubrificante, que interage fortemente com superfícies metálicas, reduzindo assim o atrito e o desgaste (FOX; STACHOWIAK, 2007).

Por se tratar de um produto com uma vasta gama de características, existem diferentes métodos de classificar os fluidos de corte tradicionais (SHOKRANI CHAHARSOOGHI; DHOKIA; NEWMAN, 2014). O mais comum deles é apresentado na Fig. 2.14 e baseado em sua solubilidade em água (DIN 51385, 2013; SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012).

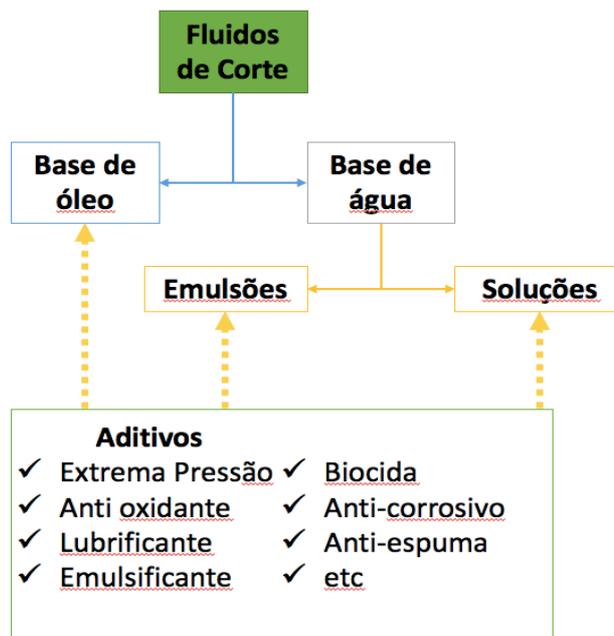


Figura 2.14 - Classificação dos FCs de acordo com a norma DIN 51385 (simplificada) (adaptado de WALTER, 2002; DIN 51385, 2013; BRINKSMEIER et al., 2015).

2.5.1 Histórico

Ao longo do século XX, a química de fluidos de corte evoluiu a partir de óleos simples para uma tecnologia sofisticada de fluidos à base de água. A evolução destes produtos é mostrada na Fig. 2.15. Entre 1910 e 1920, óleos solúveis foram inicialmente desenvolvidos para melhorar as propriedades de resfriamento e resistência ao fogo de óleos integrais. O óleo emulsionado em água, reduzia bastante a fumaça e fogo em fábricas, melhorando assim as

condições de trabalho. Ao refrigerar o processo, o FC emulsionável aumentou a vida útil da ferramenta de corte, reduzindo seu desgaste no processo. No entanto, essa associação também trouxe a oxidação da peça/ferramenta de corte/máquina exigindo a presença de inibidores de oxidação em sua formulação (CHILDERS, 2006).

Na década de 1950 os FCs sintéticos surgiram mostrando melhor desempenho que as emulsões em operações de retificação nas funções de refrigeração e anti-corrosiva. A escassez do petróleo na década de 1970 também impulsionou a produção de fluidos de corte sintéticos livre de óleo, que viriam a substituir os fluidos integrais e emulsões em operações de usinagem. Além de melhor desempenho refrigerante que as emulsões, apresentam maior vida útil no reservatório devido a boa estabilidade em água dura e resistência a degradação microbiológica.

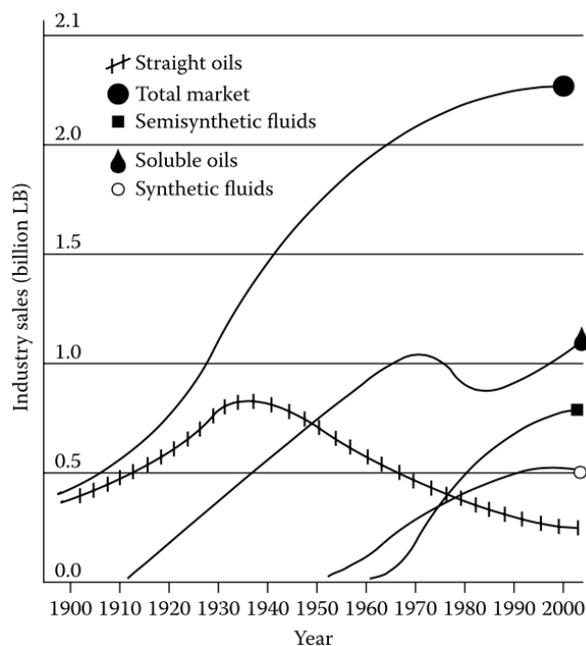


Figura 2.15 - Evolução histórica do consumo de fluidos de corte durante o século 20 (CHILDERS, 2006).

No entanto, as emulsões apesar da maior susceptibilidade ao crescimento de bactérias proporcionam melhor lubrificação e mais fácil tratabilidade de resíduos do que os fluidos sintéticos. Estas compensações incentivaram o desenvolvimento de fluidos semissintéticos. Esta classe de fluidos à base de água contém aditivos que a tornam um sistema de microemulsão “apertado”. Estes fluidos semissintéticos são uma tentativa de associar os benefícios da tecnologia das emulsões, mantendo o bom controle microbiano e longa vida útil dos fluidos sintéticos (CHILDERS, 2006).

Com a queda nos preços do petróleo ocorrida na década de 1990 houve uma disseminação da tecnologia que pudesse ser extraída do petróleo aproveitando seu baixo valor. Com o aumento dos custos de tratamento dos resíduos deixados pelo óleo sintético, os óleos emulsionáveis ganharam espaço por gerarem resíduos de tratamento mais fácil. Além disso, as etanolaminas comumente utilizadas em fluidos sintéticos para controle de corrosão tiveram sua regulamentação de risco incentivada, o que também beneficiou o uso de óleos emulsionáveis (CHILDERS, 2006).

A composição química dos fluidos de usinagem se tornou bastante diversificada. Cada formulação química foi desenvolvida de maneira própria para atender a critérios de desempenho das operações de usinagem. No entanto, cada "receita" permaneceu com ingredientes comuns e apesar de nenhum usuário estar totalmente ciente da exata composição do fluido utilizado, e que não existe fluido perfeito para cada operação, se tornou obrigatório saber se ele atenderia aos critérios de desempenho desejados (CHILDERS, 2006). Na verdade, o usuário adquire o produto com pouquíssimas informações sobre a composição química do fluido, principalmente quanto ao manuseio e descarte sustentável.

2.5.2 FCs Integrais

Apesar de terem sido os primeiros óleos utilizados como lubrificantes na usinagem dos metais, o alto custo e a rápida deterioração dos óleos vegetais e animais, tornaram a utilização destes fluidos, oriundos de fontes renováveis inviável. Coube, desta forma, um papel secundário a essas bases de óleos, que passaram a ser utilizadas como aditivos em fluidos de base mineral, devido a melhora nas propriedades lubrificantes do mesmo (MACHADO et al., 2015).

Fluidos de corte a base de óleos utilizados de forma pura, ou seja, integrais, são compostos à base de óleo mineral (fonte fóssil) ou vegetal (fonte renovável) (Figura 2.15), que muitas vezes contém substâncias químicas, tais como produtos químicos de extrema pressão (EP) a base de cloro, enxofre ou a mistura destes dois, modificadores do índice de viscosidade, modificadores de fricção, elementos antidesgaste (a base de fósforos e matérias graxas), a fim de melhorar as suas características de usinagem (SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012; BRINKSMEIER et al., 2015; MACHADO et al., 2015).

O emprego destes óleos nos últimos anos como fluido de corte tem perdido espaço para os óleos emulsionáveis em água, devido ao alto custo em relação aos demais, aos riscos

de incêndio, ineficiência a altas velocidades de corte, baixo poder refrigerante e formação de fumos, além de oferecerem riscos à saúde do operador.

Os óleos minerais são hidrocarbonetos (de base parafínica, naftênica ou aromática), obtidos a partir do refinamento do petróleo cru. Suas propriedades dependem do comprimento da cadeia, estrutura e grau de refinamento. Os de *base parafínica* derivam do refinamento do petróleo cru apresentando alto teor de parafinas (ceras), com excelente propriedade lubrificante. Seu custo é inferior devido a grande disponibilidade, possuindo ainda características de alto índice de viscosidade (IV), maior resistência à oxidação, menor toxicidade ao homem e menos agressivo ao plástico e à borracha. Os de *base naftênica* derivam do refinamento do petróleo cru naftênico. Apesar de formarem soluções mais estáveis que os de base parafínica e possuem maior resistência ao cisalhamento, sua utilização tem sido reduzida em FCs devido a alta toxicidade ao homem. Os de *base aromática* não são empregados na fabricação de FCs devido a alta oxidação apesar da maior resistência ao desgaste e boas propriedades EP, quando presentes em grandes quantidades, em óleos parafínicos (SHELL, 1991; MACHADO et al., 2015).

2.5.3 FCs a base de água

Os FCs emulsionáveis são sistemas coloidais formados por dois líquidos imiscíveis, onde um deles é disperso no outro sob a forma de finas gotículas. A miscibilidade desses líquidos é conseguida mediante duas situações: i.) *por adição de energia mecânica ao sistema* (mistura de curto período como resultado de forte agitação sofrida pelo sistema, que se separa cessada a agitação) e ii.) *por adição de pequenas quantidades de uma terceira substância* (agente emulsificante) seguido por agitação, que nesta situação, ao invés de haver a separação dos líquidos com o término da agitação, verifica-se a formação de uma mistura aparentemente uniforme, dessa maneira se produz uma emulsão (SOUZA, 2010). Nesta categoria existem as emulsões e as microemulsões (ou fluidos semissintéticos).

2.5.3.1 Emulsões

A parte lipofílica dos FCs à base de óleo pode consistir de óleos: natural, sintético e ou mineral: sintético vegetal, naftênicos, parafínicos, ou óleo de petróleo (BARTZ, 2010; MASSMANN, 2007). Os fluidos emulsionáveis compreendem de um sistema óleo-em-água (O / A), estabilizado através de surfactantes ou agentes tensioactivos. Como água e óleo não

são capazes de formar uma dispersão estável a partir de simples agitação é necessário que haja a adição de um composto chamado de surfactante, o qual reduz a tensão interfacial dos líquidos, para facilitar a emulsificação e promover o mecanismo de estabilização (SALAGER, 2006; TADROS, 2009; BYERS, 2006).

Com relação ao comportamento de fases do sistema, a adição do surfactante reduz a faixa de imiscibilidade óleo/água, sem um aumento de temperatura, através de um processo de solubilização associado a presença de micelas e estruturas auto-associadas (SALAGER, 2006). As moléculas emulsificantes apresentam uma parte hidrofílica e uma parte lipofílica (hidrofóbica). Essas moléculas ambivalentes se unem as gotas de óleo na extremidade lipofílica e a extremidade hidrofílica interage com a água. As gotas de óleo formadas pelos emulsionantes são chamados de micelas (Fig. 2.16). A fase oleosa dentro das micelas inclui todos os aditivos lipofílicos. Esses fluidos de corte à base de água são adquiridos na forma de óleos concentrados, que são diluídos em água pelo usuário, em concentrações que variam de 3% a 10% de óleo (BYERS, 2006).

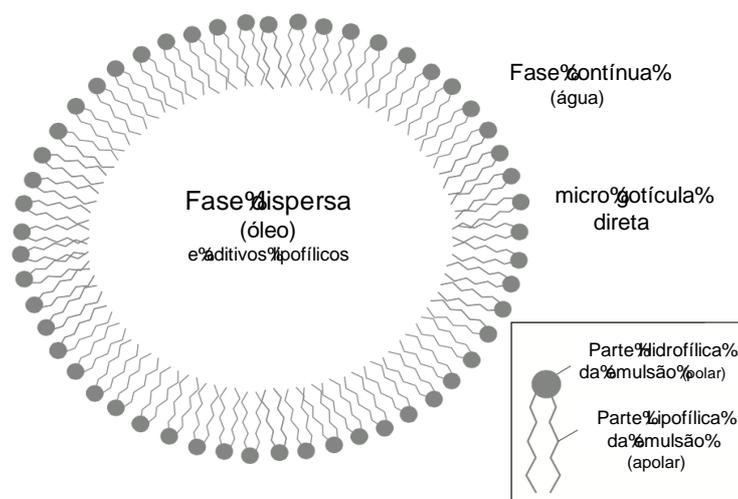


Figura 2.16 - Micela de emulsão óleo em água (adaptado de HARKINS; MATTOON; CORRIN, 1946; ROSSI et al., 2007; BERGSTRÖM, 2015; BRINKSMAYER, 2015)

Os fluidos emulsionáveis são compostos bifásicos, contendo pequenas partículas de óleo (fase contínua) adicionado à água (segunda fase) na proporção de 1: 10 a 1: 100, mais agentes emulgadores que garantem a miscibilidade destes com a água. Esses emulgadores são tensoativos (surfactantes) polares que reduzem a tensão superficial formando uma película monomolecular relativamente estável na interface óleo/água (MANG; NEUMANN, 1970).

Eles são comumente chamados de “óleos solúveis em água” (embora eles não sejam solúveis em água). As emulsões de óleo de petróleo geralmente têm capacidades lubrificantes maiores, porém, capacidade refrigerante inferior. Eles também contêm aditivos para melhorar suas propriedades de lubrificação. Em geral, as emulsões apresentam propriedades lubri-refrigerante moderadas (BENITO et al., 2010, MACHADO et al., 2015).

Assim, os emulsificantes promovem a formação de glóbulos de óleo que resulta em emulsões translúcidas. A estabilidade dessas emulsões se deve ao desenvolvimento de uma camada elétrica na interface óleo-água. Forças repulsivas entre glóbulos de mesma carga evitam a coalescência destes. Os efeitos nocivos da água presente na emulsão podem ser evitados com a adição de aditivos anticorrosivos como o nitrito de sódio, que ainda é utilizado na fabricação de fluidos de corte emulsionáveis. Para inibir o crescimento de bactérias e fungos na emulsão são usados biocidas, porém devem ser compatíveis com a pele humana e atóxicos.

2.5.3.2 Semi-sintéticos

Os fluidos semi-sintéticos são também formadores de emulsões. Eles se caracterizam por apresentarem de 5% a 50% de óleo mineral no fluido concentrado e aditivos e compostos químicos que verdadeiramente dissolvem-se na água, formando moléculas individuais. A presença de uma grande quantidade de emulsificadores propicia ao fluido uma coloração menos leitosa e mais transparente. A menor quantidade de óleo mineral e a presença de biocidas aumentam a vida do fluido de corte e reduzem os riscos à saúde (MACHADO et al., 2015).

Aditivos de óleos minerais e químicos em conjunto são utilizados nesses fluidos (BRINKSMEIER et al., 2015), bem como aditivos EP, anticorrosivos, agentes umectantes e corantes que proporcionam uma cor mais viva e aceitável pelo operador da máquina (BENITO, et al., 2010; MACHADO et al., 2015).

2.5.3.3 Sintéticos (Soluções)

Devido à ausência de partes lipofílicas, as soluções à base de água são livres de emulsionantes. Em soluções, a água é aditivada com substâncias hidrofílicas polares ativas. Também referidos como “fluidos químicos”, não contêm óleo mineral ou vegetal e são formadas por misturas de vários compostos solúveis em água, tais como agentes anti-corrosão

ou antiespumantes. Eles formam uma solução transparente ou translúcida em água e muitas vezes fornecem o melhor desempenho entre todos os fluidos de corte de refrigeração (BENITO et al., 2010).

São constituídos de sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubricidade, biocidas, inibidores de corrosão, entre outros. Por serem menos atacáveis por bactérias, apresentam uma vida maior que os fluidos semi-sintéticos, reduzindo assim o número de trocas na máquina. Além disso, formam soluções transparentes, resultando em uma melhor visibilidade durante o processo de usinagem. Estes fluidos possuem agentes umectantes que melhoram as propriedades refrigerantes da solução e também oferecem boa proteção anticorrosiva.

2.6 Tipos de aditivos

Na tabela 2.2, são comparadas as formas típicas de: formulação gerérica de uma solução, uma emulsão e um FC à base de óleo integral (BRINKSMEIER et al., 2015).

Tabela 2.2 - Exemplos de formulação de FC a base de óleo e a base de água (emulsão e solução)

Constituintes	Quantidade (peso %)		
	Solução	Emulsão (5,0%)	Integrais
Óleo mineral	-	3,5 – 4,0	75,0 – 1000,0
Emulsificantes	-	0,5 – 1,0	-
Agentes aglomerantes	-	0,05 – 0,25	-
Tamponadores de pH	5,0	-	-
Inibidores de corrosão	10,0	0,25 – 0,50	0,0 – 5,0
Aditivos de extrema pressão	4,0	0,0 – 0,5	5,0 – 20,0
Biocidas	2,0	desconhecida	-
Antioxidantes	-	-	0,0 – 2,0
Aditivos de lubrificação limítrofe	9,0	-	0,0 – 10,0
Água	70	95,0	-

Fonte: BYERS, 2006; RUDNICK, 2013

Os aditivos químicos utilizados na formulação de fluidos de corte incluem emulsificadores, inibidores de corrosão, agentes lubrificantes, controladores do crescimento microbiano (biocidas), tamponadores de pH, anti-espumantes, entre outros. A maioria dos aditivos utilizados são produtos químicos orgânicos na forma líquida para facilitar a mistura, incluindo componentes químicos como ésteres, sulfonatos, sabões, etoxilados tensoativos, parafinas cloradas, gorduras e óleos sulfurados, ésteres de glicol, etanolaminas, glicóis polialquilenos, óleos sulfatados, óleos graxos e vários biocidas/fungicidas. Em geral, um fluido

deve ser estável, proporcionar baixa formação de espuma e gerar resíduos tratáveis. Emulsionantes, inibidores de corrosão e biocidas são especialmente para FCs à base de água, enquanto que os aditivos de superfície ativos e estabilizadores de substâncias são aplicadas em todas as formulações (BRINKSMEIER et al., 2015). Os tipos de aditivos mais comumente utilizados, modo de ação e áreas funcionais são apresentados na Tab. 2.3.

Tabela 2.3 - Aditivos usados em fluidos de corte durante as últimas décadas, incluindo exemplos e funções associadas, são classificados também quanto ao sítio de ação.

Função	Tipo de aditivo	Substâncias	Modo de ação
Aditivos de proteção ao Fluido de Corte	Aditivo anti-envelhecimento, inibidor de oxidação	Aminas aromáticas, sulfeto orgânico, dialquilditiofostato de zinco	Estabilização da base oleosa e prevenção da oxidação em altas temperaturas.
	Emulsificante	<i>Aniônico</i> : sulfonatos, sabão de potássio, sabão de alcanolaminas, <i>Não iônico</i> : etoxilato álcool graxo; ácido graxo amida; <i>Catiônico</i> : sais de amônio quaternário	Formação e estabilização da emulsão. Reduzem a tensão superficial formando película monomolecular semiestável na interface óleo/água.
	Inibidor de espuma	Polímeros de silício, tributílfostato	Desestabiliza a espuma no óleo, melhora a visibilidade da região de corte. Reduz a tensão superficial das bolhas menores que se agrupam em bolhas maiores e menos estáveis
	Biocida	Compostos de enxofre, compostos de Isotiazolinona, Aldeídos, Derivados halogenados, aditivos nitrados, sais de cobre, sais quaternários de amônio	Prevenir a contaminação microbiana; inibir a proliferação de microrganismos contaminantes e eliminar sua presença
Aditivos de proteção a superfície do material	Aditivos anti desgaste	Ácido fosfórico e ácido fosfórico não iônico ester, dialquilditiofostato de zinco	Reduz o desgaste abrasivo por adsorção física das superfícies em atrito
	Detergente, Dispersante	Sulfonato, fenolato, salicilato, compostos organometálicos contendo magnésio, bário, cálcio, etc.	Impede acumulação de vernizes em superfícies, e a aglomeração de partículas sólidas formando depósitos, promove a sua suspensão.
	Surfactantes	Ésteres fosfato, sulfonatos e álcoois etoxilados	Garantir a uniformidade das emulsões
	Aditivo de Extrema Pressão (EP)	Cloroparafina, éster sulfuroso, éster ácido fosfórico, polisulfureto (PS), fosfato de ferro, cloreto de ferro, sulfeto de ferro, sendo os principais compostos de enxofre, fósforo ou cloro	Proteção contra desgaste pela adsorção ou formação de camadas de reação, previne a micro fusão das superfícies metálicas, conferem lubrificação adicional. Suportam elevadas temperaturas e pressões de corte reduzindo o contato metálico
	Modificador de atrito (MA)	Mono oleato de glicerol, óleo de baleia, gorduras naturais, óleos, éster sintético	Reduz o atrito e desgaste, melhora a adesão da película lubrificante
	Desativadores de metal	Heterociclos, di-amina, fosfito de triarilo	Formação de película adsortiva
	Passivo extrema-pressão (PEP)	Sobrebásificados de sódio ou sulfonato de cálcio	Tipo de lubrificante sólido, formação de película separando superfícies
	Inibidor de corrosão	Sulfonato, compostos orgânicos de boro, amina, aminofosfato, dialquilditiofostato de zinco, ácido graxo de cadeia longa, sulfurado, nitrito de sódio	Inibe ferrugem e corrosão de metais ferrosos e não ferrosos (prevenção de oxidação)
Aditivos de Performance do Fluido	Melhorador do índice de viscosidade	Polímeros	Aumenta o índice de viscosidade do lubrificante

Fonte: adaptado (PAWLAK, 2003; CAPELLETTI, 2006; BRINKSMEIER et al., 2015; MACHADO et al., 2015).

2.7 Seleção

FCs utilizados em processos de usinagem servem a três funções primárias: (a) proporcionar lubrificação para a zona de corte, (b) proporcionar refrigeração para a ferramenta de corte e peça de trabalho para a remoção rápida e eficaz do calor gerado durante o processo de corte e (c) facilitar ou ajudar na remoção de cavacos a partir da zona de corte. A importância relativa destas três funções é muitas vezes dependente do metal a ser usinado, da operação a ser executada e o conjunto de ferramentas a ser utilizado. A influência da lubrificação é importante e proporciona um impacto significativo na maioria das operações de usinagem. Redução das forças de atrito durante a usinagem irá produzir efeitos positivos para a vida da ferramenta e qualidade da peça. A refrigeração promovida é necessária para diminuir os efeitos da temperatura sobre a ferramenta de corte e a peça usinada, reduzindo as taxas de desgaste da ferramenta e melhorando a precisão dimensional das peças (BRINKSMEIER et al., 1999; SOKOVIC; MIJANOVIC, 2001; BARTZ, 2001; EL BARADIE, 1996; EVANS, 2012).

Isto é especialmente importante quando são usinados metais tais como os aços inoxidáveis e ligas de titânio que têm condutividade térmica relativamente baixa. É também necessário para remover cavacos a partir da ferramenta de corte e a superfície da peça usinada de forma rápida e eficiente. A incapacidade de fazer isso, muitas vezes, leva a uma má qualidade da superfície usinada, bem como o potencial para uma rápida perda da integridade da ferramenta (EVANS, 2012; MACHADO et al., 2015).

Devido à grande quantidade de variáveis envolvidas a seleção de um fluido de corte ideal é de alta complexidade, envolvendo parâmetros dentro do processo de usinagem como as condições de corte, o material da ferramenta de corte e aquele a ser trabalho e outros fora, relacionados a grande variedade de produtos disponíveis no mercado (ÇAKİR et al., 2008; EVANS, 2012; MACHADO et al., 2015).

Tudo isso, sem deixar de lado a preocupação com a origem das matérias-primas utilizadas na fabricação desses fluidos, o manejo adequado, a contaminação microbológica inexorável, a recuperação após uso, bem como a biodegradabilidade, impactando em seu descarte sustentável. Os custos envolvidos em todas essas etapas também devem ser considerados, assim como a saúde e a aceitação do produto pelo operador da máquina (MACHADO et al., 2015; AMORIM FINZI, 2015). A combinação de todos esses fatores irá fornecer informações básicas para a seleção do fluido mais adequado, que irá alcançar o máximo de benefícios oferecidos por suas muitas propriedades.

Assim, o primeiro passo no processo complexo que é a seleção de FCs é entender a natureza dos diferentes tipos de fluidos disponíveis e os pontos fortes e fracos que eles oferecem. É de grande importância, também, a identificação da principal característica (ou função) exigida ao fluido de corte pelo processo. Uma listagem geral das propriedades presentes é mostrada na Tab. 2.4. A seleção do fluido adequado, geralmente, envolve uma escolha entre o FC integral e aquele à base de água. Esta seleção será regida em grande parte pelos requisitos de lubrificação e gravidade da operação, bem como a segurança e restrições ambientais que possam existir (EVANS, 2012).

Tabela 2.4 - Análise comparativa das propriedades dos tipos básicos de FCs à base de água utilizados no processamento de metais.

Propriedade solicitada	Macro emulsão	Micro emulsão	Soluções sintéticas
Lubrificação	Boa	Moderada	Baixa
Refrigeração	Moderada	Boa	Ótima
Remoção do cavaco	Moderada	Boa	Ótima
Névoa	Moderada	Boa	Ótima
Limpeza	Moderada	Boa	Ótima

Fonte: EVANS, 2012

Por outro lado, existem várias operações nas quais o corte é realizado a seco (no ar), e o fluido de corte não se faz necessário. O torneamento e fresamento de ferro fundido cinzento, do alumínio e do magnésio; a usinagem com ferramentas cerâmicas; o fresamento com ferramentas de metal duro, onde as trincas térmicas estão presentes são exemplos deste tipo de operação. Em contrapartida, existem muitas operações onde o emprego do fluido de corte é essencial. Em termos de consumo industrial, os óleos emulsionáveis estão bem à frente dos demais. Porém, os novos produtos, principalmente os sintéticos, vêm cada vez mais conquistando os usuários (EVANS, 2012; MACHADO et al., 2015).

2.8 Métodos de aplicação de FCs

A seleção de um método em particular é uma consideração multifacetada e é baseada principalmente na economia, processo que combina a eficiência do sistema, as experiências disponíveis obtidas, a programação anual, os requisitos de qualidade, disponibilidade do sistema máquina e FC, e assim por diante (EVANS, 2012) os principais métodos de aplicação são apresentados na Fig 2.17

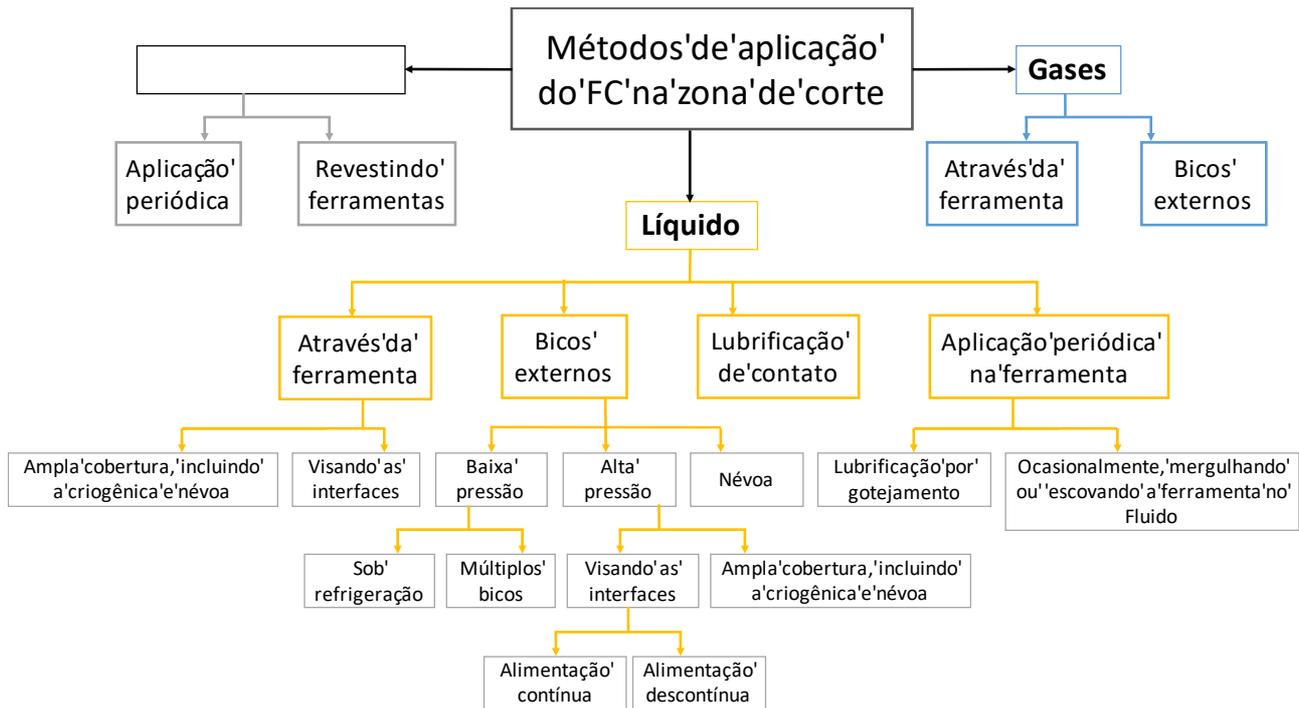


Figura 2.17 – Principais métodos de aplicação de FCs (EVANS, 2012)

com as máquinas, possibilitando instalar válvulas de controle para uma melhor integração. Estas vantagens fazem da MQF um sistema flexível para aplicações nos diversos processos de usinagem que requerem o uso do fluido de corte.

2.9 Influência da degradação e biodegradação dos FCs no desempenho técnico de suas propriedades ao longo de sua vida útil

Dentre as diversas funções desempenhadas pelos FCs estão a capacidade de refrigerar e de limpar a zona de contato entre a ferramenta e peça de trabalho. Esses são efeitos decisivos que melhoram o desempenho de FCs baseados em mecanismos químicos de trabalho. Embora o uso de FCs tenha uma longa tradição, nem todos os efeitos principalmente empiricamente obtidos de FCs são completamente compreendidos até hoje (BRINKSMEIER et al., 2015). A estabilidade química de um FC muda significativamente ao longo de sua vida útil. No entanto, para FCs à base de água e à base de óleo, os critérios para o fim da vida útil variam consideravelmente e de diferentes formas (SHENG; OBERWALLENY, 1997; NEDIĆ; PERIĆ; VURUNA, 2009; TOMS; TOMS, 2010). Portanto, os efeitos que ocorrem nestes tipos de FCs devem ser discutidos separadamente. Como exemplo, alterações da estabilidade química de FCs em sistemas à base de óleo são resultado principalmente de

efeitos, como oxidação ou polimerização de componentes dos FCs. O montante e a taxa de oxidação é fortemente dependente da acessibilidade do FC ao oxigênio atmosférico. A polimerização pode ocorrer devido a reações induzidas termicamente. Uma consequência desses efeitos químicos é uma alteração da viscosidade do fluido, levando à redução de sua vazão na máquina-ferramenta (NEDIĆ; PERIĆ; VURUNA, 2009; TOMS; TOMS, 2010).

2.9.1 Fluidos de corte a base de óleo

Tanto o óleo base quanto seus aditivos sofrem degradação durante o uso, em função da temperatura de utilização do fluido, stress mecânico, idade e contaminantes, inclusive a adição de óleos usados ou aditivos “velhos”, causando avarias ao produto novo. Além disso, muitos dos contaminantes podem atuar como catalisadores aumentando a taxa de degradação do óleo (NEDIĆ; PERIĆ; VURUNA, 2009). De acordo com Sheng e Oberwalleny (1997), os mecanismos de degradação observados em FCs a base de óleo, que inclusive devem ser monitorados durante o uso são: i.) cor e odor; ii.) densidade; iii.) contaminação por líquidos causando envelhecimento; iv.) viscosidade; v.) conteúdo de água; vi.) contaminação por sólidos; vii.) concentração de aditivos (Cl, S, P); viii.) EP características; ix.) oxidação; x.) ponto de fulgor.

Além da modificação química sofrida pela substâncias contidas no FC, as substâncias voláteis, quando submetidas a temperaturas mais elevadas (carga de impacto na zona de contato ou de altas temperaturas dentro do reservatório contendo FC utilizado em máquina ferramenta de alta produtividade) evaporam, causando uma diminuição da concentração da substância no FC (MEYER, 2014). As propriedades de FCs a base de óleo mineral também são alteradas pelo contato do FC com a ferramenta e a peça do material (BEEKHUIS, 2013). Em processos de retificação, por exemplo, pequenas partículas do rebolo, bem como os cavacos gerados, providenciam uma considerável área de superfície, favorecendo a transferência de íons metálicos para o FC ou para seus componentes, promovendo ainda mais mudanças na composição química do fluido. Alterações significativas dessa composição também são obtidas quando fugas levam à contaminação do FC, por exemplo, por fluidos hidráulicos (BRINKSMEIER, 2015).

O FC a base de óleo também pode ser avariado pela utilização de óleos de lubrificação do sistema, incompatíveis com o óleo base do fluido, representando um material estranho dentro do fluido ou óleo semelhante, porém de diferente viscosidade. Tudo isso reduzindo o desempenho do fluido, incluindo a falha nas propriedades de lubrificação e proteção anti-

corrosiva, levando ao desgaste excessivo do sistema e das superfícies em contato (NEDIĆ; PERIĆ; VURUNA, 2009).

Partículas metálicas (em decorrência do processo de usinagem ou da ruptura das superfícies em deterioração) também tornam a lubrificação ineficaz, pois são geralmente duras e aumentam a taxa de desgaste. Além disso, a presença de partículas de desgaste inicia desgaste anormal em outros componentes. Alguns metais tais como o cobre podem atuar como catalisadores de oxidação e a sua presença aumenta a taxa de degradação oxidativa do lubrificante. Outros metais tais como o zinco podem ser corrosivos para máquinas constituídas de peças de prata, tais como rolamentos e casquilhos (NEDIĆ; PERIĆ; VURUNA, 2009).

Os compostos de enxofre são normalmente encontrados em alguns óleos minerais e podem ser utilizados como anti-oxidantes e biocidas. A oxidação de compostos e ou aditivos com traços de enxofre, gera subprodutos de sulfato ácido. O aumento da oxidação e de subprodutos sulfatados geralmente resulta num aumento dos níveis de viscosidade e acidez do óleo, gerando a produção de vernizes e lamas, que interferem no desempenho lubrificante (NEDIĆ; PERIĆ; VURUNA, 2009).

O calor excessivo é responsável pela degradação dos lubrificantes de éster de poliol (TOMS et al., 1997). O colapso típico em subprodutos da degradação do éster são uma combinação de álcoois e ácidos orgânicos. A maioria dos FCs contém uma variedade de aditivos para melhorar o desempenho de lubrificação em aplicações de usinagem específicas. Os aditivos anti-oxidantes presentes, por exemplo servem para frear a degradação dos aditivos de lubrificação, no entanto, com o envelhecimento do fluido, ocorre o esgotamento dos anti-oxidantes, então os lubrificantes perdem rapidamente sua ação (NEDIĆ; PERIĆ; VURUNA, 2009).

2.9.2 Fluidos de corte a base de água

Os efeitos observados nos fluidos à base de óleo também se aplicam aos fluidos à base de água. A presença de água leva a uma série de alterações químicas e microbiológicas adicionais. A relativa estabilidade observada nos sistemas à base de óleo não é encontrada nos FCs à base de água, contudo ambos devem ser monitorados regularmente (SHENG, OBERWALLENY, 1997; ROCKER, 2010 apud BRINKSMEIER, 2015). Adicionalmente, associações de seguros de responsabilidade civil dos empregadores europeus recomendam um intervalo de monitoramento semanal para esses fluidos, que deve ter um sistema em execução

iniciado pelo controle da água utilizada para preparar o FC novo (ROCKER, 2010 apud BRINKSMEIER, 2015). Dentre os parâmetros testados na água de diluição estão: o valor de pH, condutividade, dureza da água, concentração de nitritos / nitratos / cloreto e a contaminação microbiana da água utilizada (SHENG, OBERWALLENY, 1997; ROCKER, 2010 apud BRINKSMEIER, 2015).

Nesse caso, se os testes revelarem propriedades desfavoráveis a água, deve-se esperar uma perda precoce do desempenho do FC. Esse envelhecimento prematuro do FC à base de água é acompanhado por efeitos como: a corrosão (Fig. 2.18) de componentes das máquinas-ferramenta e peças; contaminação microbiológica; questões de saúde; bem como custos mais elevados de eliminação e recarga do reservatório, sendo que um acompanhamento sistemático é de grande importância. As seções a seguir visam apresentar os métodos e parâmetros de monitoramento mais relevantes, bem como discutir as alterações desses parâmetros, no contexto do desempenho dos FCs (BRINKSMEIER, 2015).

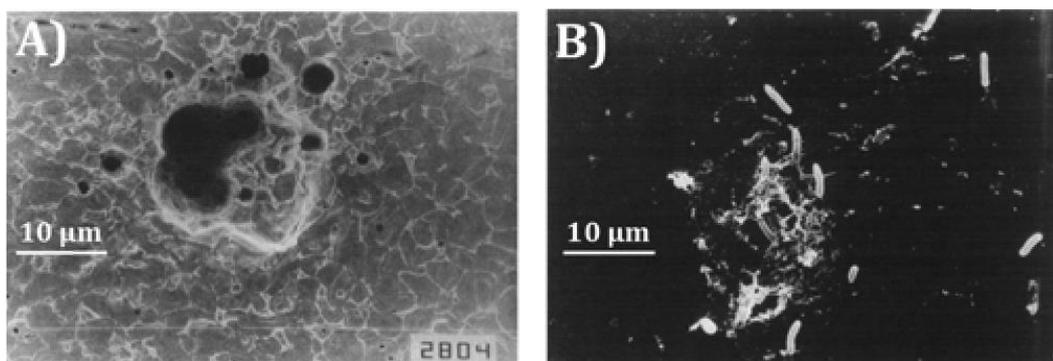


Figura 2.18 - (A) Corrosão Microbiologicamente induzida (CMI) por (b) bactérias que formam substâncias poliméricas extracelulares (EPS) e biofilmes na superfície (ORTIZ; GUIAMET; VIDELA, 1990)

2.9.2.1 Concentração do FC

Claramente, não é possível dizer qual é a concentração do fluido de corte pois nele estão contidos entre 10 e 20 ingredientes diferentes, cada um executando uma determinada função. Alguns componentes, ao longo do uso terão a concentração aumentada (materiais alcalinos, boratos, óleo, e detergentes não iônicos) enquanto que outros serão esgotadas (agentes tensioativos aniônicos, lubrificantes de extrema pressão e microbicidas). Na Fig. 2.19 essa variação é mostrada (BYERS, 2006).

A única circunstância em que se pode confiantemente falar de uma única concentração do FC é quando uma diluição é elaborada em água deionizada estéril e

armazenada em um frasco tampado. Uma técnica eficaz para o monitoramento de um fluido de corte é selecionar suas funções mais importantes e verificar o nível dos componentes responsáveis por essas funções. Os parâmetros críticos, frequentemente, serão: a alcalinidade (responsável pelo controle da oxidação) e surfactantes aniônicos (responsáveis pela integridade da emulsão, controle de corrosão, e lubrificidade). A concentração efetiva do FC será em algum ponto entre esses dois valores (BYERS, 2006).

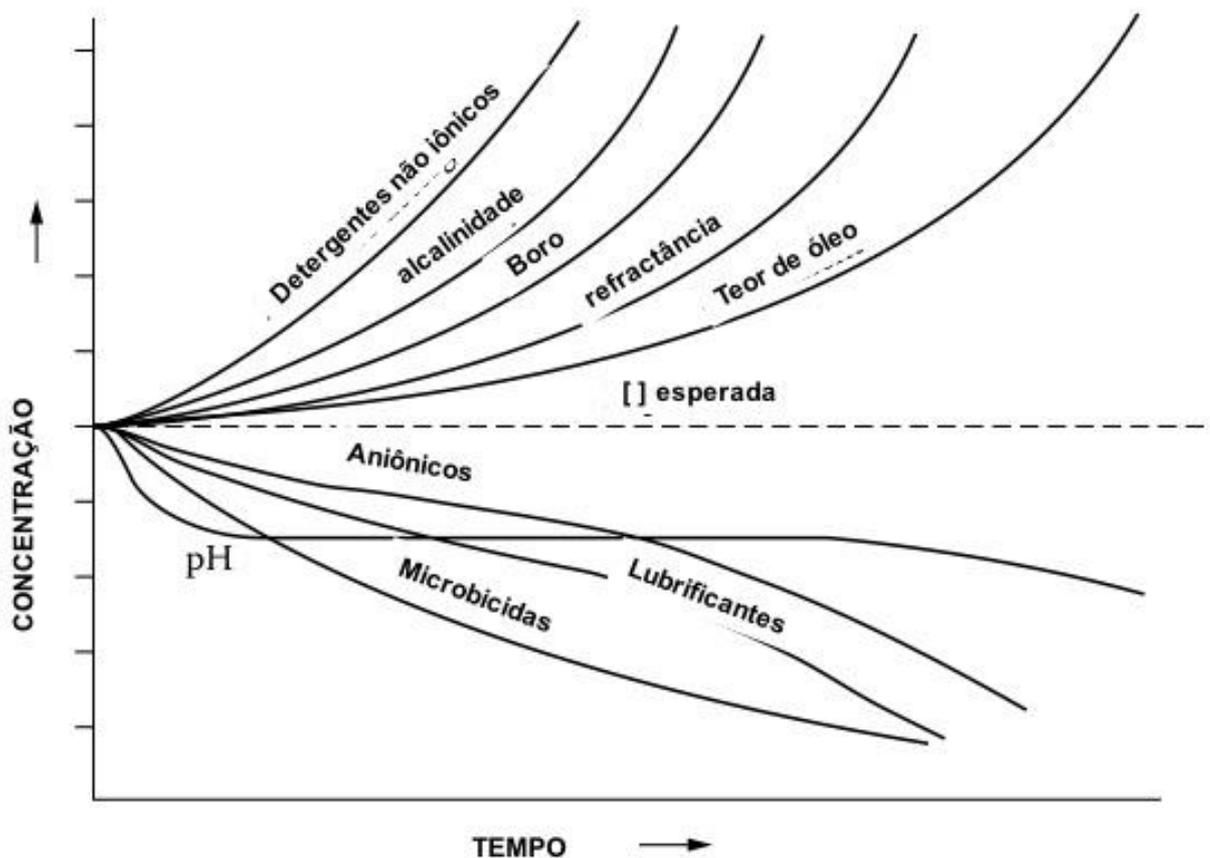


Figura 2.19 – Variação da concentração dos aditivos de um FC em função do tempo (BYERS, 2006)

Dependendo do processo de fabricação, FCs à base de água têm geralmente uma concentração que varia de 3-10% (concentração do FC em água). Essa concentração do FC pode mudar ao longo da vida útil de forma significativa devido aos efeitos antagônicos. Um aumento da concentração pode resultar da evaporação da água. A utilização desses fluidos em temperaturas elevadas (durante o verão e/ou em momento de alta produtividade), pode elevar bastante a concentração do FC por semana de uso (BRINKSMEIER et al., 2015).

Uma diminuição da concentração do FC é observada quando grande quantidade de óleo fica aderida aos cavacos ou peças de trabalho. Isto conduz a uma descarga contínua da

fracção oleosa dos FCs. Como muitos aditivos são lipofílicos e, na emulsão ficam solvidos na parte oleosa do FC, a concentração dos aditivos também diminui. O que acarreta em um efeito substancial no desempenho técnico dos FCs, visto que os desvios da concentração de determinados aditivos são maiores do que as variações controladas apresentadas. A concentração do FC é usualmente avaliada através de um refratômetro portátil que permite uma fácil medição do índice de refração do FC, e este pode ser correlacionado com a concentração do mesmo (BRINKSMEIER et al., 2015).

2.9.2.2 Valor do pH

Em geral, o valor de pH de FCs à base de água (emulsões ou soluções) deve estar numa gama alcalina moderada (pH = 8,0 - 9,5) para evitar a corrosão de elementos da máquina-ferramenta e para reduzir a carga microbiana. Estes fluidos são sistemas tamponados que permitem uma maior estabilidade do valor do pH, representado pelo logaritmo decimal negativo da atividade do íon hidrogênio (H⁺) e é influenciado principalmente pela contaminação microbiana. Em muitas vias metabólicas dos microrganismos, ions H⁺ são liberados para o meio circundante, levando a diminuição do valor de pH. Valores inferiores a 8,0 são acompanhados dos seguintes riscos: corrosão para a máquina-operatriz/peça de trabalho; instabilidade da emulsão e formação de N-nitrosaminas carcinogênicas (Fig. 2.20). Altos valores de pH (> 9,5), também são associados a irritação de pele (BYERS, 2006; MURAT et al., 2012). Consequentemente, o valor de pH deve ser avaliado semanalmente. Técnicas de medição comuns são baseadas em medidores de pH que utilizam eletrodos ou fitas de papel de pH, porém o segundo com resolução muito inferior (BRINKSMEIER et al., 2015).

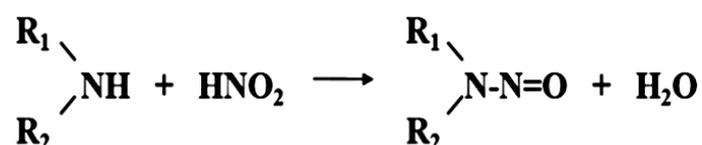


Figura 2.20 - Formação de N-nitrosaminas pela reação entre amina secundária (NAU; STEINBERG; KIETZMANN, 2003).

2.9.2.3 Controle da qualidade da Água (antes e após diluição)

A qualidade da água utilizada para diluir o FC é um factor muito importante no desempenho. Quando a diluição do FC à base de água é feita em água dura, e ainda, as alterações dessa dureza ao longo de prolongados períodos de utilização, podem exercer um impacto significativo no desempenho do fluido (YANG, 1979). Nesse longo período de uso do FC, o conteúdo de sais dissolvidos em água, que consiste principalmente de cálcio (Ca_2^+) e magnésio (Mg_2^+), juntamente com outros cátions, tais como bicarbonatos e sulfatos sofre mudanças (FOLTZ, 2003; ASTAKHOV, 2012). Estes íons bivalentes reagem com sabões, agentes umectantes e emulsionantes, de modo a formar compostos com solubilidade limitada. A formação destes materiais insolúveis acarreta na diminuição dos inibidores da oxidação, resultando em peças e máquinas mais oxidadas (FOLTZ, 2003).

Contudo, outros fatores podem ser somados aos já referidos, como: a evaporação de água a partir do fluido, a dureza da água adicionada para repor o fluido, bem como o contato com metais e seus cavacos, introduzidos no fluido durante o processo de usinagem. Todos eles contribuindo para alterações na dureza da água (ASTAKHOV, 2012). A dureza total pode ser classificada como a quantidade de carbonato de cálcio (CaCO_3) na seguinte escala: i.) 0-50 ppm - muito suave; ii.) 50-125 ppm – mole; iii.) 125-250 ppm – médio; iv.) 250-370 ppm – dura; e v.) mais de 370 ppm - muito dura (FOLTZ, 2003; ASTAKHOV, 2012).

Todos os fluidos a base de água precisam ser testados quanto a sua estabilidade em água dura devido ao fato de serem submetidos a esta condição durante a sua utilização na máquina. A água é removida por evaporação em sua forma desionizada, dessa forma os sais de cálcio e magnésio nela contidos vão se acumulando no fluido. O carregamento do FC pelo cavaco também é outro fator que esgota o volume de fluido. À medida que mais água e fluido concentrado são adicionados no reservatório da máquina, mais sais acumulam no tanque (CHILDERS, 2006).

Portanto, em emulsões, o emulsionante sulfonato de sódio é alterado para sulfonato de cálcio, perdendo sua capacidade emulsionante. Esse tipo de desestabilização da emulsão provoca a separação do óleo e a redução da concentração do mesmo em água. Em fluidos sintéticos, problemas de estabilidade quando em água dura são visíveis como a formação de espuma na superfície do líquido e máquinas. Tipicamente, os aditivos aniônicos podem ter problemas de estabilidade em água dura, enquanto que os do tipo não iônico são estáveis nessa condição. Agentes quelantes, tais como EDTA, também podem ser utilizados para ligar-se aos íons de cálcio e magnésio da água dura, tornando-os não disponíveis para reagir com os emulsionantes aniônicos (CHILDERS, 2006).

A resistência à corrosão propiciada pelo FC geralmente diminui à medida em que a concentração de água aumenta (BECKET, 1994 apud SHENG, OBERWALLENY, 1997).

2.9.2.4 Nitrato / nitrito

A utilização de água contaminada por microrganismos para diluição dos FCs, (DUCHAINÉ et al., 2012) e de aditivos nitrados presentes em biocidas, podem resultar em níveis mais baixos de concentração de nitrito e nitrato em FCs. Concentrações mais elevadas na maioria dos casos é resultado de atividade microbiana e são, assim, um forte indicador para a proliferação de microrganismos. No entanto, a relevância prática deste parâmetro, é independente da carga microbiana, e está relacionada a problemas de saúde. A presença de aminas primárias e secundárias (ou alcanolaminas, por exemplo, etanolamina, dietanolamina (DEA)), que atuam como estabilizadores de pH, agentes tensioativos, ou inibidores de corrosão em FCs, é acompanhada pelo risco de formação de N-nitrosaminas (SULLIVAN et al., 1998; WHITTAKER, 1997). N-nitrosaminas podem ser formadas em condições extremas, tais como de calor e de pressão gerada em processos de fabricação: o nitrato pode ser reduzido a nitrito, reagindo com aminas para a N-nitrosamina correspondente. Também aminas secundárias são capazes de reagir com óxidos de azoto (NO_x) a partir do ar ou nitritos (BARTZ, 2001; NIOSH, 1998). Na Fig. 2.20, o mecanismo de reação da formação de N-nitrosaminas é apresentado. O valor crítico é de 50 mg/L para a concentração de nitrato e 20 mg/L para a concentração de nitrito (TRAPP, 2001). Técnicas de medição comuns são baseadas em tiras de teste simples e uma avaliação ótica (BRINKSMEIERS, 2015).

2.9.2.5 Estabilidade da emulsão

Emulsões são sistemas termodinamicamente instáveis devido à quantidade de energia livre necessária para aumentar a área de superfície entre as fases de óleo e água, devido as suas diferentes densidades. Por esta razão, as emulsões são um sistema que tende a se separar em uma camada de óleo, menos densa, no topo e uma camada de água, de modo a minimizar a área de contato entre ambos (DICKINSON, 1992; MCCLEMENTS, 1999).

Para formar emulsões que sejam cineticamente estáveis durante um período razoável de tempo (por semanas, meses ou anos), substâncias químicas conhecidas como emulsionantes, moléculas tensioativas que adsorvem à superfície de gotículas recentemente formadas durante a homogeneização, devem ser adicionadas. Uma vez presentes na superfície

da gota, facilitam a separação das gotículas, formando uma membrana protetora que impede sua agregação (DICKINSON, 1992; MCCLEMENTS, 1999).

É muito importante manter os FCs estáveis, uma vez que essa condição tem um impacto direto sobre a produtividade do processo (ZHAO; TURAY; HUNDLEY, 2006). Quando uma emulsão desestabiliza/deteriora, pode causar diversos problemas, tais como a diminuição da vida da ferramenta, a corrosão e oxidação, espuma, odores e resíduos (BYERS, 2006; ZHAO; TURAY; HUNDLEY, 2006). A estabilidade de uma emulsão aplicada em um processo é afetada por muitos fatores, tais como: i.) a dureza da água; ii.) pH; iii.) contaminação microbiológica; iv.) força iônica; v.) temperatura e outros contaminantes (MORRISON; ROSS, 2002; ZHAO; TURAY; HUNDLEY, 2006; AMORIM FINZI; 2015). A fim de melhorar a estabilidade da emulsão, devemos primeiro compreender os mecanismos de estabilização de uma emulsão (MORRISON; ROSS, 2002). De um modo geral, existem dois mecanismos para conseguir a estabilidade da emulsão (Fig. 2.21):

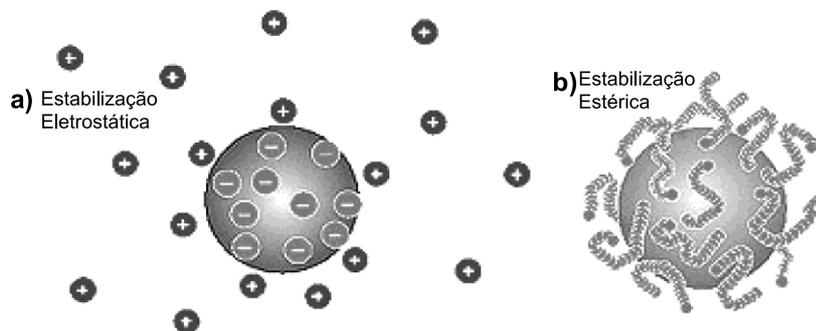


Figura 2.21 - Mecanismos de estabilização de emulsões (ZHAO; TURAY; HUNDLEY, 2006)

No primeiro deles (estabilização eletrostática) a estabilidade ocorre por forças principalmente elétricas (camadas duplas) conferidas por agentes tensoativos aniônicos. Esses agentes realizam adsorção em torno da gotícula de óleo, resultando em uma camada com carga elétrica negativa que se torna equilibrada por íons positivos. Essa dupla camada ao redor da gota repele uma gota com dupla camada que se aproxime, impedindo que ocorra a coalescência da fase óleo. Quando duas gotas se aproximam, as duplas camadas elétricas se repelem evitando a coalescência. Por esse motivo a dureza da água, o pH e a concentração de

íons (condutividade elétrica) irá afetar grandemente a estabilidade da emulsão (ZHAO; TURAY; HUNDLEY, 2006).

O segundo mecanismo (estabilização estérica) ocorre em emulsões contendo níveis significativos de emulsionantes não iônicos ou poliméricos. Nessas emulsões, o sistema é estabilizado principalmente por efeitos estéricos, que geram forças de repulsão de van der Waals, quando duas partículas estão muito próximas. O tamanho e o tipo de emulsionantes (ou de polímeros), pH, temperatura são importantes parâmetros na estabilidade destas emulsões. Em muitas emulsões de óleo em água (O/W), os dois mecanismos (eletrostáticos e estéricos) estão presentes (ZHAO; TURAY; HUNDLEY, 2006). Eles conferem estabilidade às emulsões, impedindo sua desestabilização através de: “formação de nata”, sedimentação, floculação/agregação e coalescência, processos que podem levar à completa separação da fase água com a fase óleo (MORRISON; ROSS, 2002; SCHUBERT, 2005; GLASSE, 2014).

A “formação de nata”, ou cremagem corresponde à primeira etapa na quebra de uma emulsão e seu processo é dependente das características físicas do sistema, podendo ser acelerado por centrifugação e retardado pelo aumento da viscosidade da dispersão ou pela diferença de densidade efetiva entre as duas fases (ROBINS et al., 1992) e consiste na migração de uma das substâncias para o topo da emulsão, não sendo necessariamente acompanhada de floculação das gotas (MUNIZ, 2008).

A formação de agregados irregulares de gotículas nos quais ainda é possível reconhecer cada gota de forma individual é responsável pela aglomeração por floculação, que pode ser um processo reversível em muitos casos, quando vencido pelo fornecimento de uma quantidade muito menor de energia do que aquela que foi necessária no processo original de emulsificação. Nesse processo três tipos de forças competem entre si: i.) Forças de repulsão elétrica; ii.) Forças de repulsão estérica; e iii.) Força de atração de van der Waals. A floculação ocorre quando a força de van der Waals supera o somatório das forças de repulsão elétrica e estérica (HUNTER, 1989; TADROS, 2004).

A coalescência é um fenômeno espontâneo (do ponto de vista termodinâmico) e irreversível no qual as gotas perdem a sua identidade e na maioria dos casos é a etapa lenta do processo de rompimento de uma emulsão. Ela se refere à ligação de uma ou mais gotas para formar uma única gota de volume maior, mas de área interfacial menor. Tal processo é energeticamente favorável em quase todos os casos. O aumento do tamanho das gotas tem dois efeitos: o primeiro é o de que elas se movem mais rápido, o segundo é que, isso acontecendo, elas tendem a arrastar outras partículas pequenas no caminho. Embora a coalescência resulte

em mudanças microscópicas significativas nas condições da fase dispersa, o processo pode não resultar, de imediato, em uma alteração macroscópica aparente do sistema. A coalescência é um fenômeno de competição entre a barreira energética e os fatores desestabilizantes. Portanto, quanto maiores os fatores desestabilizantes (energia de choque e vibração, coeficiente de difusão das gotas, etc) e menor a barreira energética (efeitos eletroviscosos e estéricos, etc), mais rapidamente se procederá a coalescência das gotas (OLIVEIRA; FIGUEIREDO, 1989; MUNIZ, 2008).

Devido a processos biológicos, térmicos e químicos, em operações de usinagem de metais, a composição e morfologia de FCs pode variar durante a utilização, o que resulta no aumento e ampliação do tamanho e distribuição das gotículas (TDG), afetando diretamente o desempenho do FC (de PAULA, 2005; BRINKSMEIER et al., 2009; GLASSE et al., 2014)

O tamanho médio das gotas de emulsões (macro-emulsão) é 0,1- 2,0 milímetros, dependendo dos parâmetros de usinagem e da composição do FC (GLASSE et al., 2014). O envelhecimento de uma emulsão conduz a uma mudança na composição do fluido, bem como no tamanho das gotas. Além disso, a distribuição de tamanho torna-se mais ampla (Fig. 2.22). O envelhecimento descontrolado de emulsões conduz a uma completa separação de fase devido aos impactos: microbiológico (metabolismo) (Fig. 2.20 e 2.21), químico (contaminações com sal e ácido) e térmico (usinagem) (GLASSE et al., 2014).

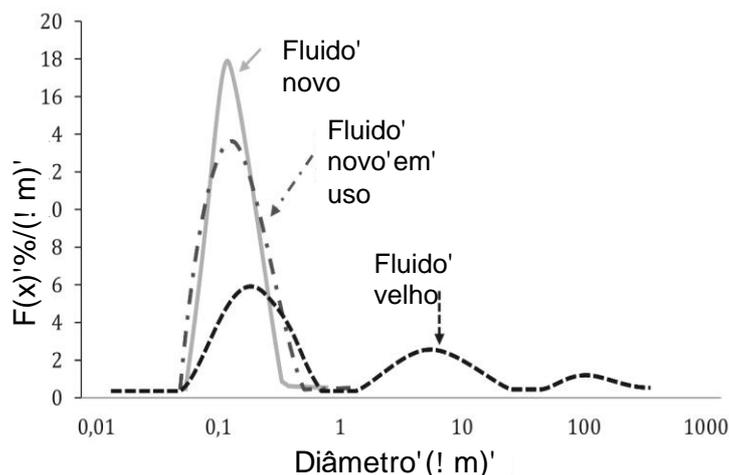


Figura 2.22 - Frequência do tamanho das gotículas em proporção ($f(x)$ em % / μm) indicando a distribuição do tamanho das gotículas e o comportamento de envelhecimento de uma emulsão (GLASSE et al., 2014).

O impacto da biodegradação microbiológica na estabilidade do tamanho das gotículas (uma micro-emulsão de base vegetal e um semissintético de base mineral) foi determinado

por Amorim Finzi (2015), no qual relata uma mudança no tamanho e forma da gotícula de óleo (micela). No estudo, os FCs foram submetidos a inóculos com altas cargas (10^{24} UFC/mL de FC) microbianas (bactérias e fungos leveduriformes) durante 70 dias (Figura 2.23). A análise das gotículas encontradas nos FCs biodegradados, mostra microestrutura semelhante para ambas, apesar das diferentes proporções. Nas figuras 2.23c e 2.23d, são visualizadas gotículas escassas e a presença de uma gota de óleo usualmente única (para a mesma área de varredura com escala de 0-100 μm) com diâmetros bastante aumentados e borda irregulares.

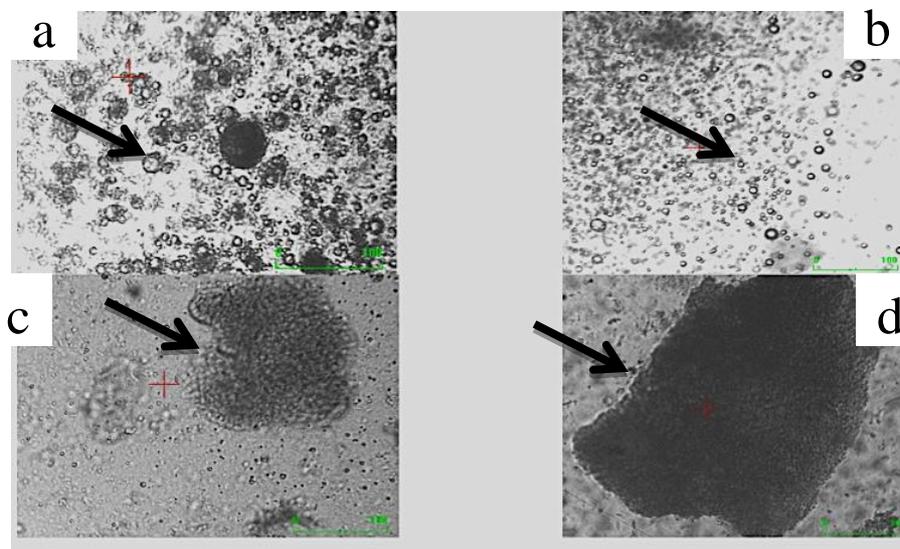


Figura 2.23 - Fluidos de corte a) vegetal novo recém diluído, b) mineral novo recém diluído, e após biodegração por 70 dias c) vegetal e d) mineral (AMORIM FINZI, 2015).

Zimmermann, Hayes e Skerlos (2004), investigaram a influência do acúmulo de íons na estabilidade da emulsão e vida útil de FCs. Foi apresentado que a maior concentração de sal, proveniente de sais de água dura, conduziram a um aumento do diâmetro médio de gotículas de 0,02 mm para 2 mm. Além disso, verificou-se que a contaminação microbiana foi acelerada. Emulsões estáveis em nano-escala podem melhorar a bioresistência dos FCs aos contaminantes microbiológicos e assim prover maior longevidade aos fluidos (ZIMMERMANN; HAYES; SKERLOS, 2004; RABENSTEIN et al., 2009). No entanto, a capacidade lubrificante de um teste de rosqueamento melhorou com o aumento do diâmetro das gotículas enquanto que o desempenho em outros processos de usinagem não sofreu influência. Em FCs cujas gotículas alcançaram diâmetros médios maiores do que 3 mm a separação de fases foi observada.

Vários outros métodos também podem ser usados para investigar e avaliar a estabilidade de FCs à base de água: A dispersão de luz dinâmica (DLS), por exemplo, permite a caracterização da distribuição do tamanho das gotículas e a taxa de coagulação e o potencial Zeta quantifica a estabilidade da emulsão por medição da carga de partículas. As análises da turbidez revelam a distribuição de tamanho de gotícula, por exemplo por medições ópticas (CLARK et al., 2005; GLASSE et al., 2014).

2.9.2.6 Implicações da contaminação microbiológica

O principal parâmetro associado ao envelhecimento precoce de FCs à base de água é a contaminação microbiológica, tema que está em foco nas publicações desde o século passado (BENNET, 1972; LEE; CHANDLER, 1941; PASSMAN, 2004; RABENSTEIN et al., 2009; ROSSMOORE; ROSSMOORE; YOUNG, 1987; VAN DER GAST et al., 2003). Dois efeitos causados pelo crescimento microbiano devem ser consideradas em relação ao desempenho de FCs: a formação de biofilmes no sistema e o metabolismo de seus componentes (BRINKSMEIER et al., 2015). Na Fig. 2.24 são apresentados exemplos de alguns efeitos observados durante a vida útil de um FC à base de água.

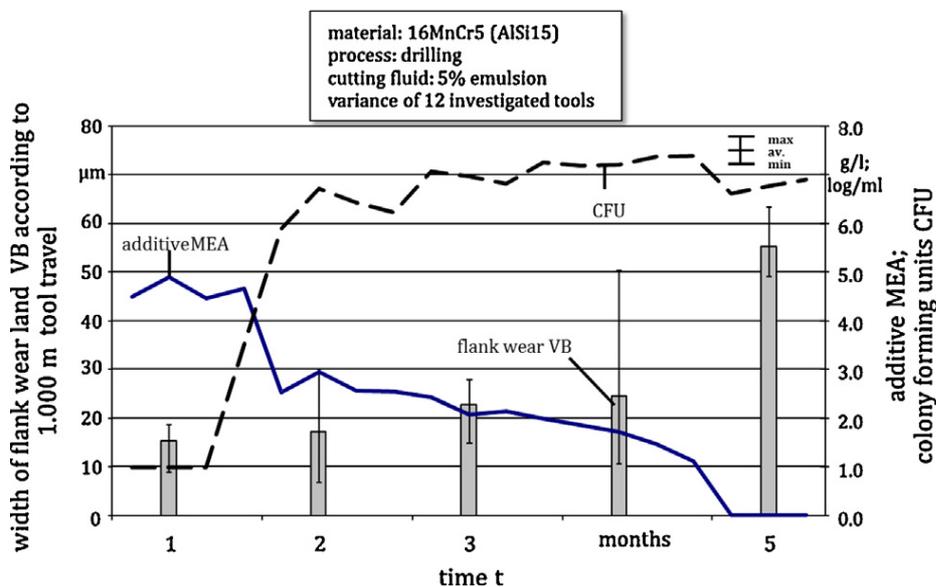


Figura 2.24 - Influência da carga microbiana na qualidade técnica de FCs e desgaste da ferramenta na furação (MEYER, 2011)

Com o aumento da carga microbiana (unidades formadoras de colônias por mililitro de fluido de corte, UFC/mL), a concentração de um aditivo selecionado (monoetanolamina,

MEA) cai. Além disso, o desempenho técnico (aqui, o desgaste da ferramenta corte) diminui. Outros estudos revelaram um risco crescente de danos à pele e desenvolvimento de infecções induzidas por esses microrganismos nos operadores de máquina (MURAT et al., 2012; SAHA; DONOFRIO, 2012).

2.10 Aspectos da contaminação microbiológica em FCs a base de água

Os fluidos de corte são formulados para uma série de funções nas quais também está inserida a de aumentar a longevidade do equipamento, impedindo a corrosão do metal (GILBERT; VEILLETTE; DUCHAINE, 2010), porém, continuam altamente propensos a contaminação química, física, e microbiológica, resultando na deterioração desses fluidos (SAHA; DONOFRIO; BAGLEY, 2011).

2.10.1 Origem da contaminação microbiológica

Dentre as várias e possíveis fontes da contaminação microbiológica de FCs, destaca-se a água utilizada na sua diluição, no entanto a própria máquina pode ser uma retroalimentadora de microrganismos para o fluido recém recarregado, através de FC residual que permanece usualmente após a limpeza e/ou desinfecção de tubulações e espaços mortos da máquina, ou através de biofilmes, levando a uma contaminação rápida do sistema. Contudo, os microrganismos contaminantes do FC podem ser provenientes das peças de trabalho, mãos dos funcionários e do próprio ambiente de trabalho (aerossóis de FC, poeira) (RABENSTEIN et al., 2009; DUCHAINE et al., 2012; TRAFNY, 2013; AMORIM FINZI, 2015). A água cria condições ótimas para o crescimento de diferentes organismos dentro de biofilmes em sistemas de circulação que, ocasionalmente, podem contaminar a água utilizada como diluente do refrigerante (MENA; GERBA, 2009)

2.10.2 Microrganismos recuperados de fluidos de corte

As bactérias mais comumente isoladas são as aeróbicas Gram-negativas, especialmente *Pseudomonas*, muitas espécies de bactérias Gram-positivas (incluindo *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Streptococcus* e *Bacillus*) e numerosas espécies de fungos, incluindo leveduras e fungos filamentosos (TRAFNY, 2013).

De acordo com Redetzky e colaboradores (2014), diversos estudos científicos realizados a partir do meio do século XX, bem como de publicações recentes indicam que FC

à base de água estão geralmente contaminados com microrganismos quando em uso. Em 1941, estudo realizado por, Lee e Chandler (1941), isolou pela primeira vez bactérias (*Pseudomonas oleovorans*) a partir de emulsões recém-preparadas e com alguns dias de uso, permitindo que postulassem que os microrganismos poderiam ser os responsáveis pela deterioração dos fluidos.

Poucos anos depois, Fabian e Pivnick (1953), investigaram a carga microbiana em diferentes FCs, nos quais detectaram uma variação de 10^6 a 10^8 células/mL, com características como: odores desagradáveis, descoloração, e deterioração das emulsões. Na sequência, Sabina e Pivnick (1956) descreveram a capacidade de microrganismos como *P. oleovorans* e *Pseudomonas formicans* de oxidar componentes de FCs convencionais. Pivnick e Fabian (1954) recuperaram em amostras de FC bactérias coliformes, utilizadas como indicadores para a qualidade sanitária da água.

Além de isolar bacilos Gram-negativos não fermentadores como as *P. oleovorans*, Tant e Bennett (1956) investigaram a diversidade microbiana em 100 amostras de FCs, nas quais outras bactérias aeróbicas foram recuperadas, como *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa* e *Escherichia coli*, microrganismos esses que até recentemente ainda não eram isolados nesses fluidos (VAN DER GAST et al., 2001).

Quase trinta anos depois, Rossmoore e colaboradores (1985 apud REDETZKY, 2014), relataram uma carga microbiana de 10^9 células/mL, incluindo microrganismos patogênicos. Ladders e Kämpfer (2012) demonstraram que mais de 20 gêneros microbianos diferentes (por exemplo, *mycobacterium*) foram detectados em um único FC. Veillette e colaboradores (2004) investigaram a contaminação microbiana de uma máquina-ferramenta após o descarte do fluido velho, limpeza e recarga do sistema com FC novo. As contagens de células foram levantadas após 12 h, variando de zero a $6,9 \times 10^6$ células/mL. Apesar do uso de biocidas, um aumento da carga microbiana foi observado durante o período de monitoramento de 6 meses. Em estudo semelhante, Marchand e colaboradores (2010) e Amorim-Finzi (2015), também detectaram uma rápida recontaminação do fluido de corte mesmo após a limpeza das máquinas e utilização de biocidas.

Importante ressaltar ainda a importância de trabalhos como de Dilger e colaboradores (2005), no qual a utilização de biocidas convencionais não reduziu suficientemente a carga microbiana do FC, bem como foi ineficiente em evitar a contaminação e crescimento de microrganismos patogênicos.

Em estudo realizado no Canadá, Gilbert, Veillette e Duchaine (2010) isolaram o máximo de cinco diferentes espécies por amostra de FC, com a predominância de bacilos

Gram-negativos, incluindo representantes como: da família *Pseudomonadaceae*, seguido por *Shewanella putrefaciens*, *Stenotrophomonas maltophilia*, *Comamonas testosteroni*, *Morganella morganii*, e *Citrobacter freundii*. Neste estudo, analisaram 44 amostras de FC recolhidos a partir de 25 máquinas de diferentes indústrias, utilizando cultivo em meios de cultura bem como métodos moleculares (DGGE). Representantes de bactérias Gram-positivas, como *Ochrobactrum* spp., *Brevundimonas diminuta*, e *Bacillus* spp. e fungos dos gêneros: *Fusarium*, *Exophiala*, *Trichoderma*, *Penicillium* também foram detectados (GILBERT VEILLETTE; DUCHAINE, 2010).

2.10.3 Microbiomas

A evaporação durante uso, levando ao aumento na concentração de sais dissolvidos na água, contribuem para o aumento de sua dureza. Essa e outras modificações sofridas ao longo do seu uso resultam no desenvolvimento de diferentes microbiomas (MURAT et al., 2012), pois torna o fluido um sistema dinâmico (FOLTZ, 2003; KOCH, 2008)

Os microorganismos que habitam os FCs incluem ambas as bactérias: aeróbias e anaeróbias, que podem se multiplicar em grande quantidade durante os períodos de inatividade ou de armazenamento do fluido, ou ainda durante o repouso, quando o FC não é aerado (TRAFNY, 2013).

Os microbiomas microbianos de FCs contém principalmente bacilos Gram-negativos (BGN), como referido anteriormente, incluindo representantes do gênero *Pseudomonas* (KREISS; COX-GANSER, 1997; LONON; ABANTO; FINDLAY, 1999; DILGER; FLURI; SONNTAG, 2005; GILBERT; VEILLETTE; DUCHAINE, 2010; MURAT et al., 2012; AMORIM FINZI, 2015). A existência de outro microbioma microbiano mais rico em bacilos Gram-positivos (BGP), particularmente micobactérias e fungos filamentosos, como espécies de *Fusarium*, também foi relatada (KREISS, COX-GANSER, 1997).

Investigação epidemiológica realizada na França (MURAT et al., 2012), relatou microbiomas distintos nas indústrias automotiva e não automotiva, sugestivo de uma associação de micobactérias, com um risco maior de “MOL”, de acordo com o material usinado, estando associado ao silício, ao contrário de materiais como: cromo, níquel e ferro. Entretanto, estudo realizado por Amorim Finzi (2015), não encontrou relação entre os microbiomas presentes nos fluidos de corte, materiais usinados e o processo de usinagem desenvolvido, bem como o setor industrial, automotivo e não automotivo.

2.10.4 Métodos de detecção microbiológica

Existem vários métodos para estimar a quantidade de microrganismos em FCs: placas de Petri, medição de adenosina trifosfato (ATP) por espectroscopia de luminescência enzimática, medição de oxigênio dissolvido, e os testes de catalase (CANTER, 2011). Como um método simples para determinar a contaminação microbiana, as placas foram largamente utilizadas, no entanto, limitações do método (pelo menos 24 horas ou mais de incubação antes que a quantidade de UFC possa ser avaliada; tipos de meios de cultivo utilizados e a própria metodologia de recuperar a amostra, etc.) tem exigido melhores alternativas (PASSMAN, 2004). A determinação da carga bacteriana com base na concentração de ATP, por exemplo, um portador de energia universal, se correlaciona com a atividade microbiológica no FC (PASSMAN et al., 2009). Entretanto, a medição direta do número de UFC por esse método desconsidera células com pequena produção de ATP ou células não produtoras/inativas (porém viáveis). Ainda assim, essa metodologia é uma alternativa adequada para o controle da contaminação microbiológica em tempo real pois detecta os microrganismos metabolicamente ativos na amostra (CANTER, 2011).

Para avaliar o efeito prejudicial da presença de microrganismos em um FC tem-se que estimar o quão grande é a sua população no fluido, particularmente nas máquinas em operação que o utilizam. Os métodos microbiológicos clássicos (crescimento em meios enriquecidos) não permitem estimar adequadamente o número real, pois as bactérias ou fungos viáveis, porém, não cultiváveis (VPNC) ou mortas não são consideradas na contagem (TRAFNY, 2013).

Estudos recentes, utilizando técnicas moleculares, demonstraram que quando a concentração de bactérias é relativamente baixa, abaixo de 10^5 UFC (unidades formadoras de colônias) / mL, os métodos de cultura subestimam em até cinco ordens de grandeza o número real de bactérias contaminando o FC. Quando a densidade de microrganismos for acima deste valor, as duas abordagens, PCR (reação em cadeia da polimerase) quantitativa ou plaqueamento forneceram resultados semelhantes ($4,51 \times 10^9$ 16S rRNA cópias / mL com um valor médio de $9,23 \times 10^7$ cópias / mL contra $2,36 \times 10^9$ CFU / mL, com um valor mediano de $3,05 \times 10^7$ UFC/mL, N = 44) (GILBERT; VEILLETTE; DUCHAINE, 2010).

Em estudos realizados por Perkins e Angenent (2010), a detecção de microrganismos nos FCs foi realizada com análise direta de genes codificando 16S rRNA. Verificou-se que um número semelhante de microrganismos (uma média de $5,1 \times 10^8$ bactérias/mL), incluindo bactérias cultiváveis e não cultiváveis, estavam presente no FC durante longos períodos de

tempo (fluidos foram investigados no inverno e verão de um ano). A ocorrência de potenciais microrganismos patogênicos, com significância clínica foram demonstrados: *Pseudomonas* spp. e *Acinetobacter* spp., com a identificação de espécies dominantes como *Alcaligenes faecalis* (TRAFNY, 2013).

Muitos autores enfatizam a relativa baixa diversidade de espécies bacterianas e fúngicas habitando os FC. Usando técnicas moleculares, como FAME (análise do éster metílico ácido graxo), DGGE (eletroforese em gel de gradiente desnaturante) e FISH (hibridização in situ fluorescente), 179 isolados bacterianos que pertenciam a apenas 11 gêneros e 15 espécies foram identificadas em amostras de fluidos de corte recolhidos em vários locais na França (VAN DER GAST et al., 2003).

2.10.5 Métodos de controle/ prevenção

Para reduzir os efeitos negativos da contaminação microbiana, estão disponíveis vários métodos. A aplicação de biocidas, por exemplo, utiliza dentre outros princípios ativos, agentes de liberação de formaldeído como método para retardar a contaminação microbiana. A evasão completa, mesmo em sistemas bem limpos, é quase impossível devido às propriedades excepcionais dos microrganismos (BRINKSMEIER et al., 2015).

A constituição química dos biocidas permite classifica-los em: oxidantes (ex.: ozônio, peróxido de hidrogênio, e compostos de cloro) e não oxidantes (ex.: sulfurados, estanho, isotiazolinonas, sais de cobre, aldeídos, sais quaternários de amônio, dentre outros) (Burk, 1984). Os biocidas oxidantes são contra indicados para FC devido a acelerarem o processo de corrosão a curto prazo (CAPELLETTI, 2006). O mecanismo de ação dos biocidas não-oxidantes aplicáveis em FCs é apresentado na tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Principais grupos de componentes ativos encontrados em biocidas não oxidantes e mecanismo de ação na célula microbiana.

Grupo	Nome comercial de ativos	Componente celular-alvo
Compostos sulfurados	Tiocianometiltiobenzotiazol (TCMTB)	Membrana (reação com enzimas e grupos S-H)
Compostos de Isotiazolinona	Clorometilisotiazolinona Metilisotiazolinona	Parede; membrana; citoplasma (coagulação de proteínas)
Aldeídos	Triazina Dimetiluréia	Parede;
Derivados halogenados	Bronopol (baixa toxicidade) iodopropinilbutilcarbamato (IPBC)	Parede; membrana (enzimas e grupos S-H); citoplasma (grupos tiol e amino)

Fonte: Burk (1984).

A utilização de biocidas como preservativos ou em concentrações muito baixas (sub-letais), em que sua atividade será bacteriostática (inibitória) requer uma melhor compreensão dos seus sítios de ação, com vistas aos seguintes objetivos: desenvolvimento de formulações antimicrobianas mais eficazes além de dificultar a emergência de resistência microbiana (MAILLARD, 2002). A escala de suscetibilidade microbiana aos biocidas (Figura 2.25), revisada por Favero e Bond (1991), fornece um guia útil para a escolha daqueles mais adequados para uma aplicação específica (MAILLARD, 2002).

As estruturas fundamentais da célula bacteriana incluem: parede celular, membrana citoplasmática, citoplasma e genoma. A atividade de biocidas está muito relacionada às características: estrutura/composição e presença de parede celular em bactérias e de envelope nos vírus. As bactérias são divididas em três grupos, com base predominantemente nas

características da parede celular: Gram-positivas, Gram-negativas e micobactérias (Figura 2.26), com os dois últimos grupos mais resistentes, em função da maior presença de lipídeos na composição deste envoltório. O mesmo ocorre com os vírus envelopados que são suscetíveis a ação dos biocidas. Esses envoltórios atuam como barreira da permeabilidade e são considerados os principais responsáveis pela denominada resistência intrínseca (natural) aos antimicrobianos, germicidas e biocidas (GILBERT et al., 1990; TRIAS; BENZ, 1994; MAILLARD, 2002).

Resistência alta	Exemplos
PRIONS (Partículas protéicas infecciosas)	DCJ, EEB
COCCIDIA	<i>Cryptosporidium spp.</i>
Esporos bacterianos	<i>Bacillus, Clostridium difficile</i>
Micobactérias	<i>Mycobacterium tuberculosis, MAI</i>
Cistos	<i>Giardia</i>
Vírus não envelopados pequenos	<i>poliovirus</i>
Trofozoitos	<i>Acanthamoeba spp.</i>
Bactérias Gram-negativas	Pseudomonads <i>Providencia spp.</i>
Fungos	<i>Candida spp., Aspergillus spp.</i>
Vírus não envelopados grandes	adenovírus
Bactérias Gram positivas	<i>Staphylococcus aureus, enterococci</i>
Vírus envelopados grandes	HIV
Resistencia baixa	

Figura 2.25 - Classificação dos microrganismos de acordo com sua sensibilidade aos biocidas (adaptado de Russell et al. (1997) e Maillard (2002)).

DCJ, Doença de Creutzfeld-Jacob; EEB, agentes da encefalopatia espongiforme bovina; MAI, *Mycobacterium avium* intra celular; HIV, vírus da imunodeficiência humana.

A membrana citoplasmática (interna) de bactérias é constituída essencialmente de uma bicamada fosfolipídica com proteínas incorporadas, e é um dos principais alvos de antibióticos, germicidas e biocidas de uma forma geral. É semipermeável e regula a transferência ativa de solutos e metabólitos para dentro/fora do citoplasma da célula. Também apresenta várias enzimas envolvidas neste transporte, bem como em funções metabólicas da célula (SINGER; NICHOLSON, 1972; SALTON; OWEN, 1976). É alvo dos biocidas que provocam: i.) comprometimento de sua integridade; ii.) interferência no mecanismo de bomba de próton, existente nesta membrana e iii.) interação/inibição com outros sistemas enzimáticos presentes na mesma (MAILLARD, 2002). Os biocidas variam muito em sua estrutura química e o seu mecanismo de ação reflete essa diversidade, embora no dano final seja possível que o biocida tenha o potencial de ter mais de um mecanismo de ação (Tab. 2.6) (MAILLARD, 2002).

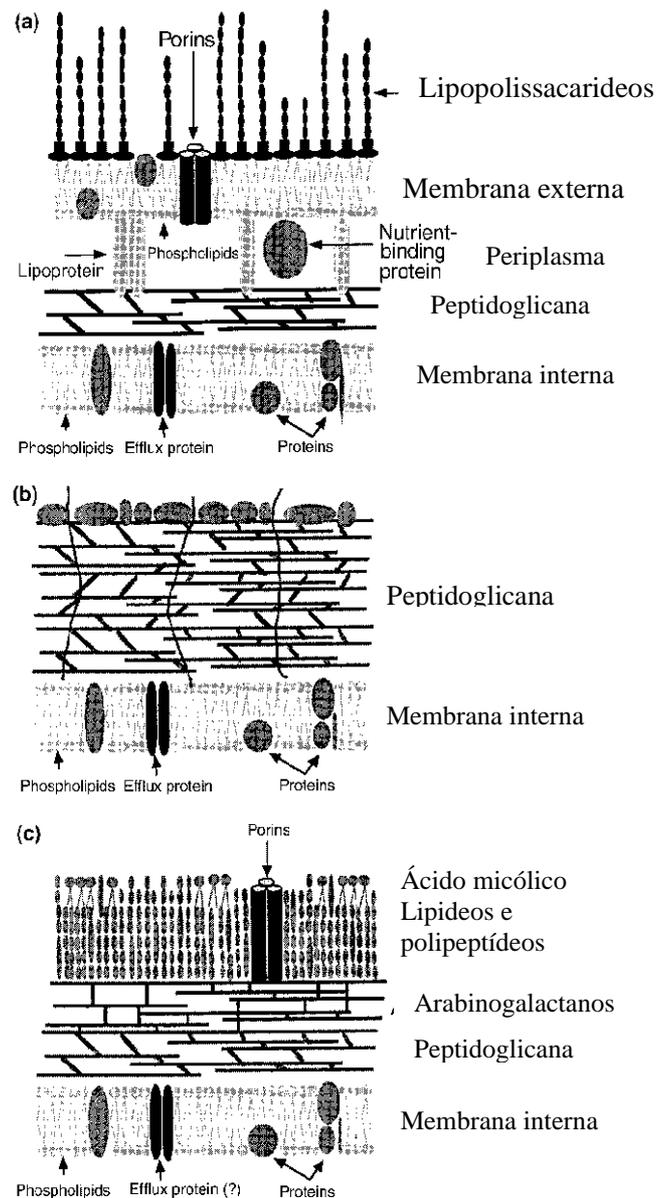


Figura 2.26 - Estrutura da parede celular externa de a) bactérias Gram-negativas; b) bactérias Gram-positivas e c) micobactérias (adaptado de MAILLARD, RUSSELL, 2000)

A adição de biocida em fluidos de corte tem como objetivos: i.) prevenir a contaminação microbiana; ii.) inibir a proliferação de microrganismos contaminantes e iii.) eliminar sua presença (CAPELLETTI, 2006). Nestas três situações, o biocida atua através de mecanismos inespecíficos, ou seja, diferentemente dos antibióticos que têm sítio de ação específico (toxicidade seletiva) e são empregados em concentrações, próximas à concentração inibitória mínima, os biocidas apresentam um espectro de ação amplo, incluindo diferentes espécies de microrganismos e são empregados em concentrações bem maiores do que na condição “*in vitro*” para dificultar o crescimento (proliferação) microbiano.

Tabela 2.6 - Alvos Bacterianos de acordo com Maillard (2002)

Sítio ativo	Alvo bacteriano	Biocida
Camadas externas		
Parede celular	Cross-linking	GTA, OPA, FMA(?)
*Membrana externa	Aumento da permeabilidade	CHA, QACs, CRAs, sais de mercúrio (II), PHE
Membrana citoplasmática	Aumento da permeabilidade	ACD, álcoois, anilides, CHA, QACs, PHE, HCP
	Potencial de membrana e cadeia de transporte de elétrons	ACD, anilides, QACs, PHE, HCP
	Síntese de adenosina trifosfato	CHA, sais de cobre (II), ETO
	Inibição da atividade enzimática	CHA, QACs, PHE
Constituintes citoplasmáticos	Coagulação geral	CHA, QACs, GTA, HCP, sais metálicos, PHE
	Ácidos nucleicos	ACD, ACR, ETO, FMA, GTA, CRAs, POP
	Ribossomas	HOP, sais de mercúrio (II) e organomercúrios
Interação com grupos específicos	Grupos tiol	BOP, ETO, GTA, HOP, CRAs, IOD, POP, sais metálicos, IST
	Grupos amino	ETO, FMA, GTA, OPA,
	Grupos sulfidríla	BOP, ETO, GTA, HOP, CRAs, sais metálicos, IST
Atividade autocida induzida por biocida	Acúmulo de radicais livres	BOP, IST, HOP, **agentes ativos na membrana

ACD, ácidos orgânicos e parabenos; ACR, acridinas; BOP, bronopol; CHA, clorexidina; CRAs, agentes de liberação de cloro; ETO, óxido de etileno; FMA, formaldeído; GTA, glutaraldeído; HCP, hexachlorophane; HOP, peróxido de hidrogênio; IOD, iodo e iodoóforos; IST, isotiazolonas; OPA, ortoftalaldeído; PHE, fenólicos; POP, b-propiolactona; QAC, compostos de amônio quaternário.

*Bactéria Gram-negativa.

Sais de cobre (II), Sais de mercúrio (II) e organomercúrios, Sais de Prata (I).

**Agentes que causam danos à membrana citoplasmática.

Contudo, a carga de microrganismos no FC pode ser agravada quando o biocida é simplesmente adicionado ao sistema, sem considerar o modo de aplicação mais adequado para cada sistema (CAPELLETTI, 2006). Portanto, o modo de aplicação do biocida, respeitando inclusive a melhor concentração de uso, é tão importante quanto a seleção. O biocida pode ser adicionado ao fluido de forma continuada, em baixas, porém efetivas concentrações, com o intuito de prevenir ou inibir a formação inicial do biofilme (WILLIS; BOTT, 1999). Outra forma ocorre através de aplicações de choque, realizadas em intervalos de tempo regulares, em altas concentrações, de acordo com a detecção de três situações: presença de biofilme espesso; sistema de circulação do FC com altos níveis de contaminação; e, quando as condições do sistema de circulação do FC promovem rápida recontaminação (LUTEY, 1995; CAPELLETTI, 2006).

A resistência bacteriana a esses biocidas deve ser considerada, quando do controle efetivo da contaminação bacteriana (SELVARAJU, KHAN, YADAV, 2011). Eles podem contribuir para seleção de bactérias resistentes, destacando-se sobretudo as micobactérias (VAN DER GAST et al., 2003; WATT, 2003). Esta maior resistência desse grupo de microrganismos é atribuída a sua capacidade de formar biofilmes no interior da tubulação da máquina-ferramenta, através da adesão a superfícies e produção posterior de uma matriz polimérica extracelular (MPE), responsável pela proteção e desempenhando um importante

papel na morfologia, estrutura, integridade operacional e coesão ao biofilme (FLEMMING; WINDENGER, 1999).

Outros métodos para controlar a contaminação microbiana, tais como luz ultravioleta (BIANCHI et al., 2008; SAHA; DONOFRIO, 2012) e radiação gama demonstraram que representam alto investimento e/ou baixa eficiência antimicrobiana (DREWS et al., 2005 apud BRINKSMEIER et al., 2015; PASSMAN, 1992 apud BRINKSMEIER et al., 2015; ROSSMOORE; BRAZIN, 1968 apud BRINKSMEIER et al., 2015); a redução térmica por meio de serpentina mergulhada em gelo pelo qual circula o fluido também é uma opção (GOMES et al., 2007).

2.10.6 Biodegradação dos componentes

Os óleos base, lubrificantes, emulsionantes, sabões, e outros materiais orgânicos fornecem carbono e outras fontes de energia para os microrganismos, que devido a disponibilidade de água, contaminam o FC em número e em variedade de bactérias e fungos. Essa biodegradação, que não é simultânea, ocorre tanto no óleo base quanto nos aditivos, sucessivamente, com prioridade para os mais facilmente biodegradáveis. Esses componentes, quando reduzidos/consumidos por microrganismos, sofrerão alterações importantes, afetando gravemente o desempenho das propriedades do FC, resultando em aumento no desgaste de ferramentas e particularmente nos custos. Os aditivos de inibição da corrosão, quando consumidos, resulta em redução desta proteção. Dessa forma a queda da eficiência do processo de usinagem terá como consequência a perda em produtividade (HILL; TARIK, 1979; LONON; ABANTO; FINDLAY, 1999; RAKIC; RAKIC, 2002; THEAKER; THOMPSON, 2010; RAVE; JOKSCH, 2012; BRINKSMEIER et al., 2015; AMORIM FINZI, 2015).

Quando ocorre o crescimento microbiológico no fluido de corte em uso, os microrganismos tem o seguinte efeito sobre o fluido refrigerante diluído em água: i.) degradação dos componentes orgânicos (aditivos, emulsionantes); ii.) formação de produtos de decomposição de ácido; iii.) redução no valor do pH; iv.) formação de nitrito a partir de nitrato; v.) redução da proteção contra corrosão; vi.) aumento da condutividade e vii.) instabilidade da emulsão. As consequências desses efeitos para o processo de usinagem incluem: i.) sedimentação de óleo; ii.) problemas de filtração (descarga de biofilmes); iii.) bloqueio de gasodutos; iv.) problemas de limpeza (resíduos pegajosos nas máquinas); v.)

ocorrência de espuma; vi.) interrupção do trabalho; vii.) danos aos sistemas de filtragem ou a máquinas (RAVE; JOKSCH, 2012).

A grande variedade de microrganismos contaminando o fluido conduz a uma situação que torna quase impossível identificar aditivos adequados, que não sejam metabolizados pelas bactérias e ou fungos. Como uma consequência do metabolismo, a concentração dos componentes do FC diminuem ao longo de sua vida útil, enquanto os produtos dos processos metabólicos dos microrganismos acumulam (BRINKSMEIER et al., 2015).

A proliferação microbiana pode baixar o pH, liberando subprodutos ácidos, e alguns microrganismos anaeróbios, tais como os redutores de sulfato, geram produtos sulfurados tais como sulfureto de hidrogênio (BURGESS, 1995; NIOSH, 1998). Decréscimo na viscosidade e na resistência térmica, com subsequente aumento da corrosão em ferramentas também podem ocorrer (GILBERT; VEILLETTE; DUCHAINE, 2010).

2.10.7 Corrosão microbiologicamente induzida

As reações de corrosão podem ser induzidas ou acentuadas pela atividade microbiana (FORD; MITCHELL, 1990). A deterioração de um material, geralmente um metal, por processos que ocorrem, direta ou indiretamente, como resultado da atividade bacteriana pode ser definida como a corrosão microbiologicamente induzida (CMI) (De BRUYN 1992; IVERSON, 1987). Esse tipo de corrosão também é conhecido como corrosão biológica, corrosão induzida biologicamente e bio corrosão (BORENSTEIN, 1994).

A CMI pode ser causada por duas classes distintas de microrganismos: grupos aeróbios e anaeróbios com reações de corrosão distintamente diferentes (von HOLY, 1985) (Figura 2.27). A reação clássica de corrosão é eletroquímica e permanece válida para CMI (FORD; MITCHELL, 1990; De BRUYN 1992). No entanto, o envolvimento de microrganismos neste processo tem sido difícil de avaliar (FORD; MITCHELL, 1990). Devido ao fato de que os processos de corrosão são quase sempre complexos, envolvendo várias reações possíveis, existem dificuldades práticas associadas à identificação inequívoca de CMI em muitas situações de campo (HAMILTON, 1985). Uma variedade de fatores ambientais, dificultam o estudo dos mecanismos de corrosão (LEE et al., 1995) cujas reações podem ocorrer em conjunto, não se excluindo mutuamente (COETSER; CLOETE, 2005).

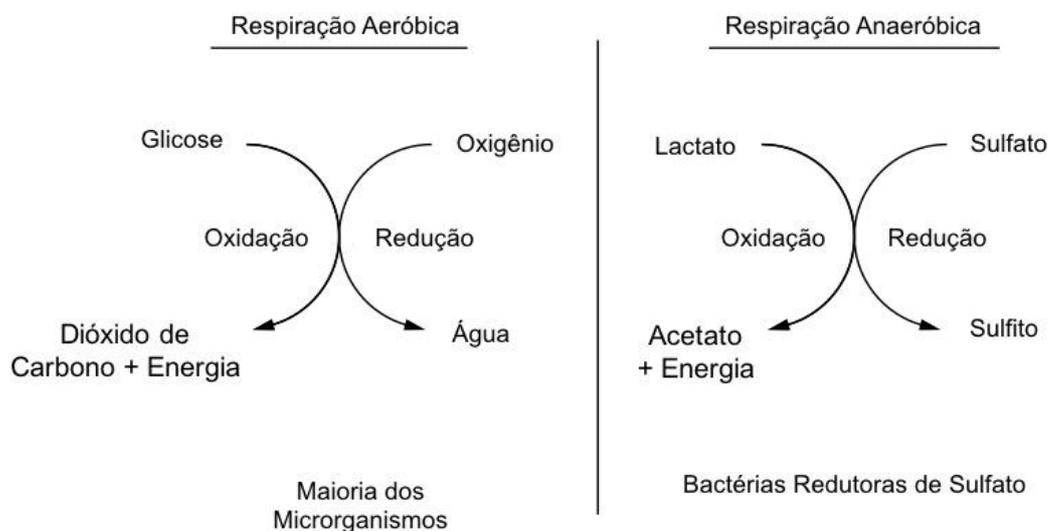


Figura 2.27. _ - Respiração dos microrganismos envolvidos na corrosão microbiologicamente induzida (CMI) (HOLLY, 1985)

As superfícies metálicas mergulhadas em meio contaminado por bactérias e fungos são submetidas a uma sequência de alterações biológicas e inorgânicas, simultaneamente após o contato, que alteram a estrutura da interface metal/solução, e a isso é associado o comportamento à corrosão. A primeira das alterações biológicas é a formação de uma película fina que altera principalmente a carga electrostática e molhabilidade da superfície do metal (DEXTER, 1976 apud ORTIZ, GUIAMET, VIDELA, 1990; VENZLAFF et al., 2013), o que facilita a adesão bacteriana. A segunda fase, causada pela colonização microbiana, resulta no desenvolvimento de um biofilme formado por células bacterianas e as suas substâncias poliméricas extracelulares (EPS). A estrutura do biofilme consiste em grande parte de água, e cria uma barreira de difusão para a troca de elementos entre o metal e a solução (CHARACKLIS, 1981 apud ORTIZ, GUIAMET, VIDELA, 1990; VENZLAFF et al., 2013).

Por outro lado, as alterações inorgânicas correspondem a uma outra sequência de eventos que ocorrem simultaneamente com a formação de biofilme. Esta sequência está relacionada principalmente à dissolução de metal (corrosão) e formação de produtos de corrosão na superfície do metal (passivação). Em alguns casos, a interação entre o biofilme e camadas passivas inorgânicas resultam numa despassivação da superfície do metal com um aumento da marca de corrosão naquelas áreas localizadas “biologicamente condicionadas” (ORTIZ, GUIAMET, VIDELA, 1990).

2.10.8 Formação de biofilmes

O problema de formação de biofilmes em FCs ainda não foi estudado em detalhe. Apenas alguns artigos publicados até agora têm descrito a propensão de microrganismos recuperados de FCs em formar biofilmes (MATTSBY-BALZER et al., 1989; FALKINHAM, 2009; LUCCHESI et al., 2012; SAHA; DONOFRIO, 2012; TRAFNY, 2013). Relatos relativos a biofilmes em máquinas-ferramentas de indústrias, descrevendo como, quando e onde estes são formados ainda não foram publicados (TRAFNY et al., 2015).

Os estudos sobre biofilmes em FCs são prejudicados pela falta de metodologia relativamente simples para o desenvolvimento e avaliação do biofilme. Recentemente, dois métodos para avaliar o tamanho de uma população microbiana em um biofilme foram introduzidas na área de pesquisa de FCs, sendo eles: ensaio de bioluminescência de ATP (KAPOOR; YADAV, 2010) e um ensaio de MTT realizada em formato de placa de microtitulação (TRAFNY et al., 2013). Esses métodos funcionam em uma faixa semelhante de densidades bacterianas e permitem controlar a viabilidade dos microrganismos que se desenvolvem em biofilmes gerados em FCs (TRAFNY et al., 2015).

Os biofilmes em fluidos de corte são geralmente compostos por mais de uma espécie de microrganismos (THEAKER; THOMPSON, 2010; ELIAS; BANIN, 2012). *Pseudomonas* sp, *Alcaligenes* sp, *Comamonas testosteroni* e até mesmo bactérias entéricas, em conjunto com micobactérias não tuberculosas foram isolados a partir FCs contaminados (GILBERT; VEILLETTE; DUCHAINE, 2010; KAPOOR; YADAV, 2012). Por causa da estrutura específica das suas paredes celulares, as micobactérias não tuberculosas são naturalmente resistentes a diversos agentes antimicrobianos além de facilmente gerarem biofilmes em ambientes que contêm água, se tornando assim de difícil remoção tanto do FC quanto dos sistemas nos os fluidos de corte circulam (BRENNAN, NIKAIDO, 1995; MULLIS; FALKINHAM, 2013; TRAFNY et al., 2015).

Os biofilmes são a forma preferida de vida da maioria dos microorganismos, tais como bactérias e fungos (ORTIZ, GUIAMET, VIDELA, 1990; TRAFNY et al., 2015). Eles consistem de células vivas cercadas de substâncias chamadas de matriz polimérica extracelular. Esta matriz é produzida ativamente pelos microrganismos e provém várias vantagens para as células: proteção contra biocidas, a troca de nutrientes com outras células, a formação de uma comunidade sinérgica de diferentes espécies, dentre outras. Efeitos visíveis de biofilmes em FCs são, por exemplo biofilmes macroscópicos nos tanques contendo o fluido (Fig. 2.28A), o entupimento das tubulações e filtros (Fig. 2.28B), corrosão

microbiologicamente induzida de máquinas-ferramenta e componentes e odor característico ao FC (PALMOWSKI et al., 2014).

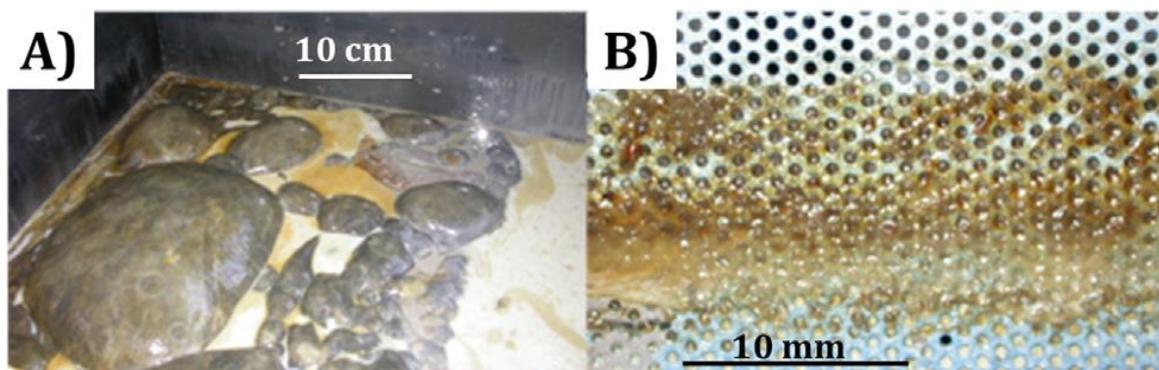


Figura 2.28- (A) Biofilme macroscópico em um tanque contendo fluido de corte e (B) filtro coberto por biofilme (MEYER, 2011)

2.10.9 Saúde do operador

Quase todas as etapas de transformação dos metais envolvem FC ou seus derivados, tornando-os onipresente em todos os tipos de indústrias dedicadas ao corte de metais, bem como com ampla utilização nas indústrias automotiva e aeroespacial (MIRER, 2003; GILBERT; VEILLETTE; DUCHAINE, 2010; FRIESEN et al., 2011). A composição química desses fluidos, incluindo uma sobreposição de vários componentes, aditivos e contaminantes (Figura 2.29) implica um risco potencial para a saúde e para o meio ambiente, visto que uma grande parte das doenças ocupacionais na indústria metal-mecânica é causada pelo contato com os fluidos de corte (BARTH, 2003; MIRER, 2003; FRIESEN et al., 2011). Com destaque para os riscos associados a contaminação microbiológica (DILGER; FLURI; SONNTAG, 2005; CYPROWSKI et al., 2007)

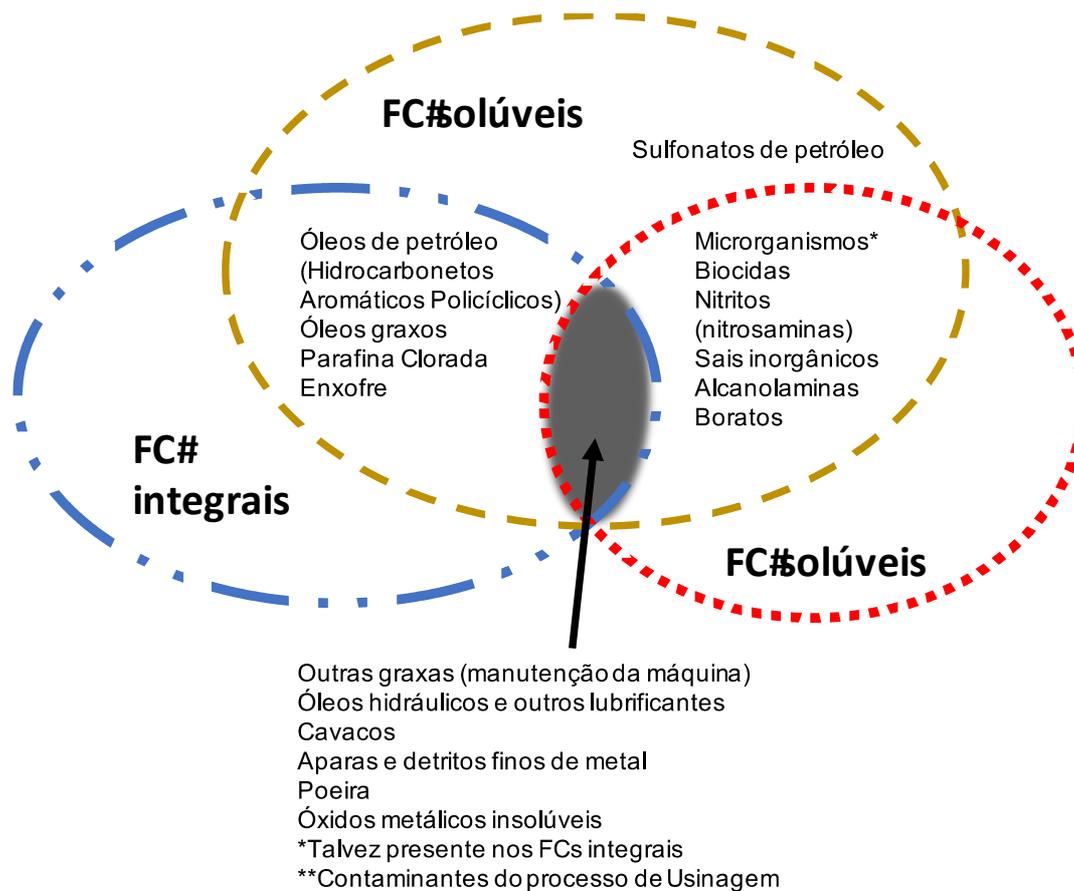


Figura 2.29 - Constituintes e contaminantes dos fluidos de corte integrais e à base de água (adaptado de MIRER, 2003; FRIESEN et al., 2011)

Vários problemas de saúde relacionados ao contato direto com FCs (componentes, aditivos e contaminantes), tais como dermatite de contato, erupções da pele (GRATTAN et al 1989; GOH, GAN 1994; SHVEDOVA et al 2001) e câncer (NIOSH, 1998) foram relatados ao longo das últimas décadas. Vários de seus componentes: biocidas (MACKERER, 1989), compostos de enxofre (FRANK-STROMBORG, 1989; FRASER et al., 1989), particulado metálico (NEUGET; WYLIE, 1987; MAGNANI et al., 1987; GUSTAVSSON; GUSTAVSSON; HOGSTED, 1988; FRANK-STROMBORG, 1989), são suspeitos ou conhecidos como carcinogênicos, incluindo os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP), com 3-7 anéis como o benzopireno, benzantraceno e chrysene (COSMACINI et al., 1988), em óleos integrais (GUSTAVSSON; GUSTAVSSON; HOGSTED, 1988; MACKERER, 1989) e nitrosaminas (FRANK-STROMBORG, 1989; FRASER et al., 1989), formadas pela reação das etanolaminas e agentes N-nitrificantes naqueles à base de água (IARC, 1987; 2000). Na maioria dos estudos epidemiológicos de câncer, por exemplo, a

exposição aos FCs tem sido tratada como o único causador, sem levar em conta o tipo de fluido, os constituintes, ou ainda, a concentração (FRIESEN et al., 2011).

A análise microbiológica de FCs pode evidenciar altos níveis de contaminação, que variam de 10^4 a 10^{10} Unidades Formadoras de Colônia por mililitro de fluido (UFC/mL) (MATTSBY-BALTZER et al., 1989; SLOYER, NOVITSKY, NUGENT, 2002; VAN DER GAST et al., 2003; SAHA; DONOFRIO, 2012). Uma grande variedade de bactérias são usualmente detectadas, tais como: *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, bactérias redutoras de sulfato (BRS) e as conhecidas como *Acinetobacter* (MATTSBY-BALTZER et al., 1989; SANDIN; MATTSBY-BALTZER; EDEBO, 1991; VIRJI et al., 2000; VAN DER GAST et al., 2003; PERKINS; ANGENENT, 2010), além de patógenos oportunistas tais como: *Legionella* spp., *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa*, e *Escherichia coli* (BAKALOVA et al., 2007; ELSMORE, 2003; LUCCHESI; EGUCHI; MORAES, 2012). Há pouco tempo, uma nova espécie de *Mycobacterium* (*Mycobacterium immunogenum*) foi isolada a partir de FCs e associada à doença pulmonar, denominada “MOL” – “*machine operator's lung*” (“pulmão do operador da máquina” – POM) (MOORE et al., 2000; WALLACE et al., 2002; RHODES et al. 2011).

Os problemas respiratórios e dermatológicos, relacionados com a contaminação microbiológica dos FCs, como pneumonite por hipersensibilidade (PH) e dermatites, aumentaram significativamente ao longo das últimas décadas (HODGSON et al. 2001; UENO; SHIOMI; YOKOTA, 2002; DILGER; FLURI; SONNTAG, 2005; CYPROWSKI et al., 2007; PARK et al., 2008; THOMPSON; VAN DER GAST 2010; SAHA; DONOFRIO; BAGLEY, 2011). Os diversos componentes do fluido, mesmo aqueles contendo biocidas, dão suporte ao crescimento de uma grande variedade de microrganismos, incluindo patógenos oportunistas como *Mycobacterium* sp., *Escherichia coli*, *Legionella* sp. e as bactérias pertencentes ao gênero *Pseudomonas* e suas endotoxinas (BERNSTEIN et al., 1995; KREISS, COX GANSER, 1997; ROSENMAN, 2009; SAHA; DONOFRIO; BAGLEY, 2011), alguns produtores de biofilmes, tornando-os resistentes ao tratamento (ROSENMAN, 2009)

Acredita-se que os trabalhadores ou manipuladores de FCs são expostos a esses microrganismos, como *Mycobacterium*, através da aerossolização do fluido no ambiente durante o uso (LIU et al., 2010; GILBERT; VEILLETTE; DUCHAINE, 2010; SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012), contendo além das gotículas de fluidos, vapores, fumos, gases, partículas metálicas finas e bioaerossóis (LIU et al., 2010). O efeito desses aerossóis contendo fluidos de corte sobre a saúde dos trabalhadores não está limitada à doenças pulmonares, mas

podem também aumentar o risco de cânceres de esôfago, estômago, pâncreas, próstata, cólon e reto (SHOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012).

Muitos dos microrganismos são espécies comuns frequentemente encontrados em solo e águas superficiais e não são considerados patogênicos, exceto como oportunistas (HILL; TARIK, 1979). Infecções desencadeadas em adultos saudáveis por estas espécies são raras. No entanto, os operadores de máquinas ferramentas enfrentam forte exposição a esses fluidos e, conseqüentemente, a grandes quantidades de material biológico, ou seja, microrganismos (vivos e mortos), incluindo os resíduos metabólicos, endotoxinas proteolíticas, enzimas lipolíticas, fragmentos de células (HOLDOM, 1976; HILL; TARIK, 1979; ROSSMOORE 1986; LONON; ABANTO; FINDLAY, 1999) e gases como o sulfureto de hidrogênio (BURGESS, 1995; NIOSH, 1998), conhecido como um composto tóxico, e que está sendo investigado quanto ao risco da exposição diária à baixas concentrações pelo fato de ligar-se selectivamente às enzimas envolvidas na respiração (COSTIGAN, 2003).

Com efeito, a presença de *Mycobacterium chelonae* e *Mycobacterium immunogenum* foi detectada em surtos de Pneumonite por Hipersensibilidade em FCs (SHELTON et al., 1999; HODGSON et al., 2001; WILSON et al., 2001; WALLACE et al., 2002). Além de *Mycobacterium*, impactos do contato contínuo e maciço com outros microrganismos, tais como *Pseudomonas*, foram pouco estudadas. FCs representam uma fonte de nutrientes para muitos microrganismos que encontram no equipamento de processamento as condições necessárias ao seu crescimento, elevando o risco de exposição contínua dos operadores de máquinas a altas concentrações de microrganismos (GILBERT; VEILLETTE; DUCHAINE, 2010).

2.10.10 Meio Ambiente

A utilização de fluidos de corte no processo de usinagem faz da indústria metal-mecânica uma potencial agressora ao meio ambiente. São vários os problemas decorrentes desta utilização, que vão desde a geração de efeitos nocivos ao ambiente de trabalho, conseqüentemente ao operador, até a agressão ao próprio meio ambiente. Ao avaliar os impactos gerados pela utilização dos fluidos de corte, deve-se considerar pelo menos dois efeitos principais: efeitos nocivos à atmosfera (interna e externa) e degradação do solo e recursos hídricos (OLIVEIRA; ALVES, 2007).

A aplicação dos fluidos de corte nos processos de usinagem gera vapores, sobretudo, no contato do refrigerante com superfícies aquecidas e em movimento da peça trabalhada, da

ferramenta, ou do cavaco, comprometendo o ar do local de trabalho. A pressão e o aquecimento do fluido de corte também exercem influência no grau de evaporação. Este comprometimento do ar, em decorrência do uso de aerossóis e dos vapores de agentes refrigerantes, varia em função, por exemplo, das propriedades físico-químicas do fluido de corte, da velocidade de rotação das peças que estão sendo usinadas e do aquecimento das superfícies (OLIVEIRA; ALVES, 2007).

Outro fato que deve ser levado em consideração quanto aos danos ambientes causados pela utilização de fluidos de corte está relacionado a sua manutenção. Quando esta é efetiva e eficiente, não só reduz o impacto ambiental, como também aumenta a rentabilidade da produção. Por isso, é muito importante que as medidas de manutenção realizadas sejam prontamente executadas, visando a redução de resíduos e a qualidade da peça fabricada (WHALTER, 2012).

Os FCs mudam sua composição durante a usinagem, ocasionando também uma mudança nos riscos oferecidos ao meio ambiente (OLIVEIRA; ALVES, 2007; KURAM; OZCELIK; DEMIRBAS, 2013). Quando se torna contaminado por microrganismos como bactérias e fungos, torna-se menos eficiente na execução de suas propriedades. Além das modificações sofridas na composição durante o uso, sofre ainda uma gradativa perda de suas propriedades, resultando em perda da qualidade técnica desempenhada, exigindo ainda o seu descarte. Além dos altos custos envolvidos na eliminação dos resíduos de FCs há o efeito negativo de seu descarte para o meio ambiente. A mudança de paradigmas em relação a sustentabilidade ambiental dos fluidos de corte em uso, o foco passou de biodegradabilidade para renovabilidade ao longo dos anos (CARLSON, 2006). Renovabilidade representa a quantidade relativa do produto em qualquer dado de matérias-primas que podem ser recultivadas, reciclados ou re-utilizados (NORRBY, 2003).

Vários aspectos de um lubrificante ambientalmente adaptados são como se segue (PETTERSSON, 2007; NORRBY, 2003; WAKABAYASHI et al., 2003; KURAM; OZCELIK; DEMIRBAS, 2013): i.) Biodegradabilidade (degradação pela ação de microrganismos); ii.) Toxicidade; iii.) Renovação; iv.) bioacumulação (acumulação de substância dentro do organismo) e bio magnificação aumento na cadeia alimentar da concentração da substância acumulada); v.) Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e vi.) poupança de energia e de economia de combustível.

As preocupações ambientais, pressões do mercado e as exigências legais fazem imperativa a busca por novas soluções que minimizem o impacto ambiental adverso associado

à utilização dos fluidos de corte, como por exemplo, a remoção de componentes nocivos a partir de sua formulação (DAVIM et al., 2006; KURAM; OZCELIK; DEMIRBAS, 2013).

A utilização de volumes menores, a redução de perdas de FC por arraste nos cavacos e ou armazenamento, transporte e preparo, bem como a substituição daqueles de base mineral pelos de base vegetal são outras maneiras eficazes de minimizar esses efeitos. Dessa forma são impedidas as contaminações tanto do lençol freático quanto da rede de coleta de esgoto. A solubilidade dos resíduos dos FCs descartados em água também é um problema a ser considerado (KURAM; OZCELIK; DEMIRBAS, 2013).

2.10.11 Estratégias de gestão dos FC

Para permitir alta produtividade e trabalhar com alta eficiência de recursos, o usuário final precisa garantir uma longa vida útil dos FCs à base de água e à base de óleo, o que implica no conhecimento necessário sobre as propriedades microbiológicas e químicas dos mesmos. Até hoje, os métodos de controle descritos anteriormente são as únicas ferramentas estabelecidas para um controle regular das condições dos FCs, muitas vezes demoradas, propensas a desvios (devido aos efeitos inter-observadores), e de pouca precisão (BRINKSMEIER et al., 2015). Contudo, é preciso ressaltar que poucos usuários têm ciência e ou acesso a esse tipo de monitoramento/controle ou se preocupa em obtê-lo (AMORIM FINZI, 2015), consequência, possivelmente, de uma fiscalização amena.

O controle da qualidade da água e a correta limpeza das máquinas são importantes prolongadores da vida útil do FC. No FC integral (não miscível em água) a contaminação se dá apenas por agentes externos, o que não ocorre às emulsões, que entram em contato com microrganismos, trazidos especialmente pela água de preparação (BERNSTEIN et al., 1995; AWOSIKA-OLUMO; TRANGLE; FALLON, 2003; BECKET et al., 2005; BIERMANN, 2008; MARCHAND, 2010).

De acordo com Burgess (1995), quando os programas de controle são aplicados de forma excepcional, a contaminação microbiológica pode ser reduzida a 10^4 UFC/mL. Contudo, quando se trata de um programa de controle menos agressivo a contaminação se estabiliza em 10^6 UFC/mL. Porém, se não é feito o controle da contaminação microbiana, a carga pode chegar a 10^9 UFC/mL (GILBERT; VEILLETTE; DUCHAINE, 2010).

2.10.11.1 Sistema tradicional de controle/manutenção

A gestão adequada dos FCs prolonga sua vida útil por estender sua recirculação (fluidos integrais) e reduzir o descarte daqueles à base de água. Uma variedade de práticas pode ser realizada para monitorar os FCs no sentido de prevenir, corrigir e o tratar antes do seu descarte (ASM HANDBOOK, 1992). Todas elas devem se adequar aos tipos de fluido e às necessidades das operações de usinagem e assim contemplar de maneira eficaz a redução da geração de resíduos.

Diversos são os contaminantes do FC durante sua recirculação na máquina-ferramenta: óleos procedentes de fugas de sistemas hidráulicos e de lubrificação de peças e máquinas; partículas sólidas metálicas oriundas do processo (carepas, limalhas, cavacos); resíduos (panos, plásticos); deposição de microrganismos presentes no ambiente (bactérias e os fungos). Estas contaminações exigem cuidados especiais para garantir a qualidade do produto durante toda sua vida útil. Por outro lado, há a possibilidade de afetar o meio ambiente, quando, por exemplo, ocorre o arraste de FC presente nos cavacos e derrames acidentais (Ministério do Meio Ambiente, 2008). Por este motivo, a gestão que deve sofrer, precisa ser criteriosa e detalhista no sentido de prolongar a utilização do FC e minimizar seus danos ao meio ambiente, ao operador e às peças metálicas em contato (ASM HANDBOOK, 1992).

A utilização de centrífugas pode acelerar o processo de remoção de detritos mais grosseiros e a filtração remove detritos finos em duas etapas: na primeira fase utilizando papel ou tecido (remoção de detritos maiores) e na segunda através de um filtro especial (remoção de detritos mais finos) (ASM HANDBOOK, 1992).

A inalação e exposição cutânea do operador aos aerossóis contendo gotículas de fluidos, vapores, fumos, gases, partículas metálicas finas e bioaerossóis também devem ser evitadas. Além disso, medidas de controle de engenharia, tais como ventilação, guardas de proteção instaladas nas máquinas de usinagem, bem como sistemas de exaustão afetam a distribuição (tamanho de partículas e quantidade) dos aerossóis liberados na zona de respiração do trabalhador (LIU et al., 2010). Para cada parâmetro de contaminação referido algumas medidas de controle são adotadas (Tabela 2.7):

Tabela 2.7 - Medidas de controle adotadas de acordo com o parâmetro envolvido.

PARÂMETRO	MEDIDA
Óleos contaminantes de fugas de sistemas hidráulicos	Implantação de plano de manutenção do sistema Manutenção preventiva e emprego de juntas adequadas que reduzam fugas Emprego do mesmo óleo base para a formulação de fluidos de usinagem, sistemas hidráulicos e engraxe Instalação de decantadores ou centrífugas para a separação dos óleos contaminantes
Partículas sólidas metálicas oriundas do processo (carepas, limalhas, cavacos)	Instalação de sistema de filtração eficiente (filtros: não-tecido de polipropileno, papel; peneiras) Decantação Centrífugas Separadores magnéticos
Resíduos contaminados (panos, plásticos)	Capacitação dos funcionários
Monitoramento da qualidade dos fluidos de corte	Medida de pH: deve manter-se alcalino (conforme orientação do fornecedor) Óleos estranhos: é necessário detectá-los para evitar um aumento na velocidade de degradação do fluido Teste de corrosão: permite levantar o poder corrosivo do fluido Cloretos: este ensaio controla o poder corrosivo e instabilidade da emulsão Sólidos em suspensão: controla o nível de sólidos para proteger a ferramenta e não interferir no acabamento da peça e danos ao sistema (desgaste abrasivo)
Parâmetros de controle dos fluidos aquosos	Dureza: um certo grau de dureza evita a formação de espumas. Uma água com uma dureza muito alta pode desestabilizar a emulsão Sais dissolvidos: controle de sulfatos e cloretos Sólidos: devem ser menores que 500 mg/L Microrganismos: para evitar a proliferação de fungos e bactérias, não devem exceder a 10 UFC/mL Monitoramento da eficiência de aditivos anticorrosivos Água de reposição: água deionizada para evitar a contínua acumulação de íons de cálcio, cloretos, nitratos e metais pesados, que incidem negativamente na estabilidade dos fluidos. Utilização de água com baixo grau de dureza
Contaminação por microrganismos (bactérias, fungos)	Limpeza geral, desinfecção do sistema e a utilização de biocidas (prevenção e/ou controle) Sistema eficiente de filtragem e de aeração do fluido (repouso) Cultivo de amostras de FC para detecção da contaminação microbiológica Monitoramento/Controle da formação de biofilmes Controle da temperatura externa
Arrastes de fluidos de usinagem por cavacos	Otimizar as dimensões da peça a ser usinada para que a quantidade de material a ser retirada seja mínima (<i>near net shape</i>) Implantar sistema de drenagem de fluido aderido aos cavacos
Aerossolização do fluido de corte e de seus contaminantes	ventilação, guardas de proteção instaladas nas máquinas de usinagem, bem como sistemas de exaustão afetam a a distribuição (tamanho de partículas e quantidade) dos aerossóis liberados na zona de respiração do trabalhador
Derrames	Plano Informativo para operadores de máquinas-ferramenta Formação de pessoal e conscientização através de palestras e cursos Derramamentos e respingos produzidos no processo de usinagem podem ser eliminados mediante instalação de uma tela protetora

Fonte adaptado de: ASM Handbook, 1992; LIU et al., 2010; MARCHAND, 2010

Alguns potenciais problemas podem ser detectados de acordo com valores medidos de alguns parâmetros, em monitoramentos de rotina, tais como: a concentração do fluido, a concentração de outros óleos contaminantes do fluido, valores de pH, dentre outros. As medidas de controle para esses problemas são apresentadas na Tab. 2.8.

Tabela 2.8 – Recomendações dos limites de vários parâmetros

Valor medido	Potenciais problemas associados	Medidas de controle
Concentração: < 3%	Contaminação microbiológica, odores ruins, problemas de processamento, corrosão e problemas de filtragem causados por fungos	Adicionar FC concentrado e se necessário, um biocida
Concentração: > 10%	Irritação na pele, problemas de espuma, problemas de processamento, custo elevado do líquido de arrefecimento	Adicione água até que a concentração recomendado seja alcançada
Óleo do cárter > Concentração	Contaminação microbiológica, poluição do FC, irritação da pele, problemas de processamento	Remoção de óleo mecânico (sucção, desnatação, separação)
valor pH > 9,3	Irritação na pele	EPI
valor pH < 8,7	Contaminação microbiológica, odores, problemas de processamento, corrosão	Adicionar FC concentrado, parcial ou a troca completa, utilização de aditivos possíveis
Condutividade > 6 mS/cm	Problemas de processamento, corrosão, depósitos de sal, lavagem imperfeita	Parte ou mudança completa, adicione a água macia
Dureza > 40° (Alemã)	Corrosão, depósitos de sais, limpeza ineficaz, pouca atividade de limpeza	Parte ou mudança completa, adicione a água macia
Dureza < 10° (Alemã)	Problemas de espuma	Adicionar água de dureza superior ou aumentar a dureza com um aditivo
Cloreto > 100 mg/L	É possível que ocorra corrosão	

Fonte: (RAVE, JOKSCH, 2012)

EPI, equipamento de proteção individual

2.10.11.2 Sistema de controle automatizado:

Uma abordagem para automatizar uma demanda orientada de controle dos FC foi apresentada por Palmowski e colaboradores (2014), com objetivo de desenvolver um controle on-line de circuito fechado e manutenção orientada, que permitisse a combinação sistemática de sensores (convencionais e avançados) com métodos de manutenção sem interferência do usuário (ex.: ajuste da concentração de aditivos, incluindo biocidas), como é apresentado na Fig. 2.30, que ilustra a ideia de controle on-line de circuito fechado, apresentada por Brinksmeier e colaboradores (2015), para orientação da manutenção e controle de FCs

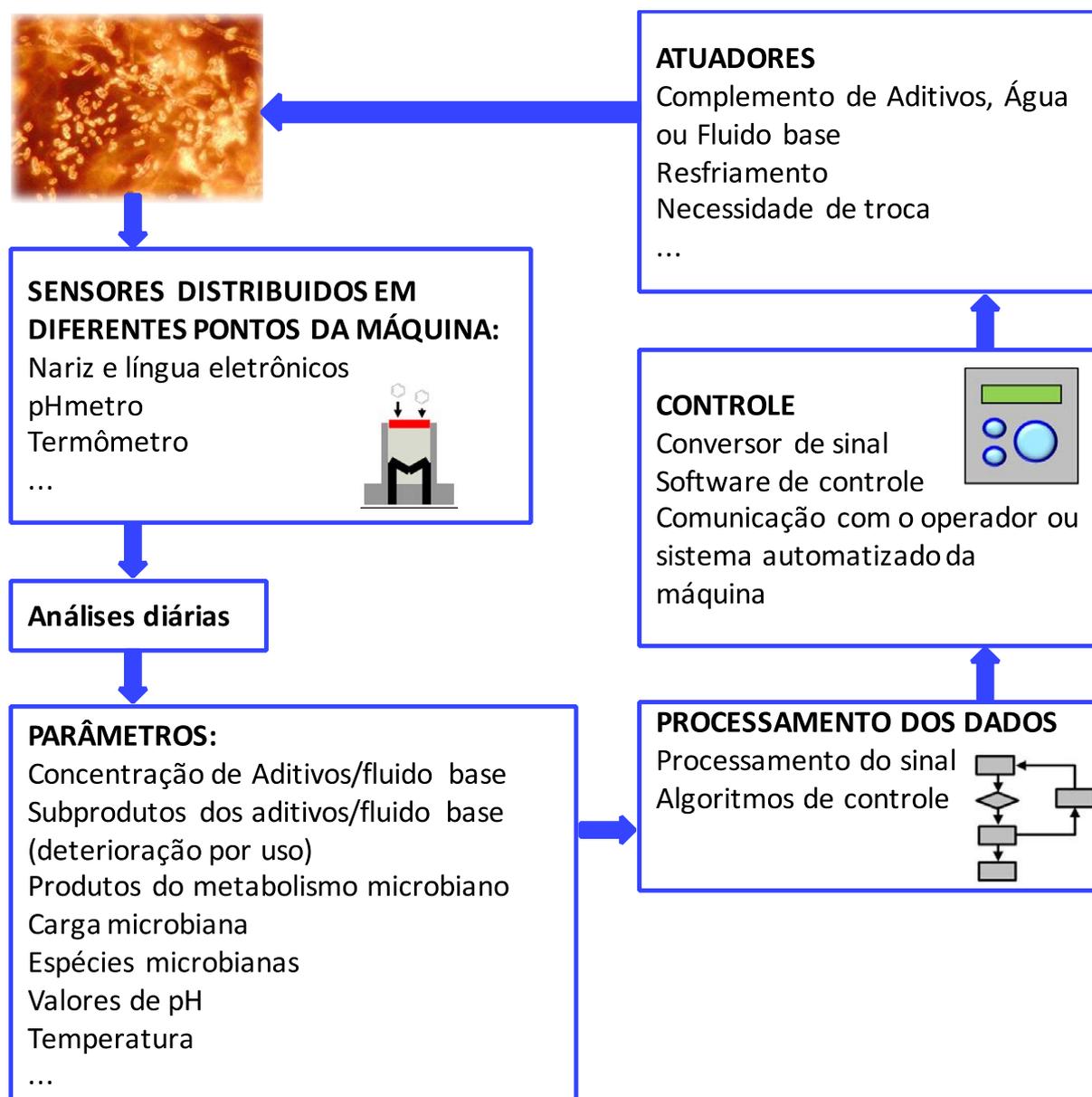


Figura 2.30 - Abordagem para a linha de controle de circuito fechado de FCs usando sensores avançados, como um nariz eletrônico. Adaptado de Meyer (2014) e Brinksmeier et al. (2015).

Uma possibilidade para permitir a medição on-line das características químicas e microbiológicas dos FCs são os narizes (detecção de vapores) e ou línguas eletrônicas (detecção de líquidos e sólidos) (KOCH et al., 2006; RÖCK; BARSAN; WEIMAR, 2008). Importante ressaltar a necessidade de calibração desses sensores (RABENSTEIN et al., 2009; WEINHOLD et al., 2012). A cromatografia gasosa com detecção por espectrometria de massa (CG-EM) é uma ferramenta importante neste sentido pois pode identificar substâncias adequadamente marcadas. A aplicação de sensores correspondentes pode permitir a detecção

on-line de mudanças na composição do FC, melhorando e facilitando seu monitoramento e manutenção (PALMOWSKI et al., 2014).

2.10.11.3 Métodos de tratamento e de minimização de resíduos

A seleção dos aditivos que comporão a formulação de um fluido de corte é um problema afetado pela eliminação de seus resíduos quando do descarte do fluido. Os parâmetros utilizados para minimizar esses resíduos obedecem a três critérios: tratabilidade; ii.) estabilidade em água dura, e iii.) bioestabilidade. O aumento dos custos de produção com a eliminação sustentável dos resíduos desses aditivos exige que sejam tratáveis e reduzidos, além de estáveis na presença de sais de água dura, bem como, resistam a biodegradação microbiológica. Esses fatores irão garantir longa vida útil ao FC no reservatório, resultando em descarte menos frequente (CHILDERS, 2006).

Em geral, os aditivos aniônicos, que apresentam carga negativa, geram resíduos mais fáceis de tratar, através de remoção química, que pode ocorrer tanto por acidificação quanto por reação com coagulantes catiônicos. Aditivos sem carga são difíceis de tratar, pois os métodos de tratamento químicos são ineficazes. A solubilidade relativa do aditivo em água também afeta a tratabilidade de seus resíduos relativos. Um aditivo mais solúvel em óleo, mais provavelmente será removido da corrente de resíduos. Por exemplo, um fluido emulsionável cuja base seja de óleo, emulsionante e uma parafina clorada será fácil de tratar, desde que o emulsionante seja aniônico. O óleo e parafina clorada, não sendo solúveis em água, serão parcialmente removidos com o emulsionante solúvel em água. Este fenômeno explica porque óleos emulsionáveis são mais fáceis de tratar do que fluidos semissintéticos, que são mais fáceis de tratar do que os fluidos sintéticos (Tab. 2.9) (CHILDERS, 2006).

Tabela 2.9- Tratabilidade de resíduos de aditivos

Aditivos	TRATABILIDADE		
	Fácil	Moderado	Difícil
Emulsificantes	Sulfonatos, sabões, ésteres de sorbitano, monooleato de glicerol, alcanolamidas, octilfenoletoxilato (HLB 10,4)	base de sulfonato	de Etoxilato de nonilfenol (HLB 13,4)
Inibidores de corrosão	Sulfonato de cálcio, boratos de amina anfotéricos	Triethanolamine	Dicarboxilato de amina
Lubrificantes		Óleo sulfatado, ésteres de fosfato	Polialquilenoglicóis, ésteres PEG 600, polímeros de bloco, imidazolininas

Fonte: CHILDERS, 2006.

Os fluidos sintéticos (soluções) em fim de vida não são tratáveis por métodos convencionais pois não são biodegradáveis. No entanto, estes fluidos se esgotam, principalmente devido à contaminação por óleos, transformando a solução original em emulsão, cuja fase oleosa pode ser separada e reciclada (BIERMANN, 2008).

Mesmo após a implantação de todas as medidas preventivas, restará, ainda, uma parte do fluido em fim de vida que deverá ser eliminada mediante procedimentos que reduzam qualquer impacto negativo sobre o meio ambiente. Cabe ao gerador garantir o correto armazenamento deste fluido residual, armazenando em tambores ou pequenos depósitos, convenientemente etiquetados, até o momento de sua retirada, de maneira que não ocorra a mistura com restos de óleos usados ou outros tipos de produtos (BIERMANN, 2008).

2.10.12 Novas tecnologias de controle e Inversão de paradigmas

2.10.12.1 Biocontrole

Fluidos de corte contendo o biocontrole são adicionados de suspensões de microrganismos, como exemplo, a espécie *Pseudomonas oleovorans*, em número significativo para prevenir o crescimento de outras bactérias contaminantes, por mecanismo de antagonismo bacteriano. Há a possibilidade de mais de 300 espécies diferentes presentes em FCs contaminados. FCs contendo um microrganismo biocontrolador específico, muito bem adaptado aos componentes do fluido no qual é inserido, bem como as condições nutricionais disponíveis, irá restringir o crescimento de outros microrganismos sob as condições operacionais de utilização do fluido normais. Isso pode resultar em menor risco à saúde e de menor biodegradação do fluido de corte (DILGER; FLURI; SONNTAG, 2005). Trata-se, portanto, de um mecanismo que atua a partir do biocontrole.

O microrganismo inserido como agente de controle biológico pode utilizar um substrato essencial de forma mais eficiente que outros agentes patogênicos. Estirpes de *Pseudomonas*, utilizadas como biocontrole, têm sido intensamente estudadas com intuito de revelar seus determinantes moleculares responsáveis pela metabolização de antifúngico (van ELSAS et al., 2006).

2.10.12.2 Bioestabilidade/bioresistência

A bioresistência de um aditivo é a capacidade de retardar o crescimento de microrganismos no fluido. O aditivo, essencialmente, não atua como uma fonte nutritiva para as bactérias ou fungos, ou ainda pode interferir com outras fontes de nutrientes. Um estudo foi realizado para avaliar a bioestabilidade dos principais aditivos em FC metalúrgicos solúveis em água, e consistia da utilização de aditivos em circulação contínua através de seus FCs típicos. Neles foram inoculados bactérias e fungos, leveduriformes e filiformes, cujos crescimentos foram monitorados para determinar quais dos aditivos davam suporte ao crescimento, quais eram bioestáveis (nem suporte, nem resistência), ou bio resistentes (CHILDERS, 2006).

Nos anos antecedentes a década de 1980, emulsões bio estáveis foram desenvolvidas, visando limitar o número de microrganismos contaminantes (10^6 - 10^7 UFC/mL) (LINGMANN et al., 1980) e nessa mesma década, para permitir práticas de fabricação mais adequadas, passou-se a utilização de fluidos de corte com pH superior a 8,5, numa prática que minimizou a concentração de nutrientes tais como fosfatos, emulsionantes e inibidores de corrosão para os microrganismos contaminantes (HOWES et al., 1991).

Aditivos químicos bio resistentes são aqueles que: contêm boro, podem ser cíclicos ou saturados, ácidos graxos ramificados de cadeia linear ou compostos à base de aminas. Estes incluem boratos de aminas, ácidos graxos de resina (“rosin”), fenóis etoxilados, ácido neodecanóico e monoetanolamina. Aditivos químicos que dão suporte ou são biodegradáveis são tipicamente ácidos graxos, gorduras e óleos naturais, aniônicos, aditivos de cadeia linear, ou aditivos contendo fósforo. Estes incluem sabões, carboxilatos de aminas, bases de sulfonato, óleo de banha e ésteres de fosfato (CHILDERS, 2006).

Contudo, em pH extremos, como o alcalino proporcionado por alguns aditivos, os microrganismos despendem de maior energia para manter o pH interno em condições ótimas aos seus processos metabólicos, evitando assim a desnaturação das suas enzimas (VOET et al., 2002). Os microrganismos (bactérias e fungos) devem manter um pH citoplasmático compatível com a integridade funcional e estrutural ótima das suas proteínas citoplasmáticas que dão suporte ao seu crescimento. A maioria das bactérias não extremófilas crescem ao longo de uma ampla faixa de valores de pH externo (entre 5,5 – 9,0), mantendo seu pH interno, em uma faixa estreita de valores (7,4 – 7,8) (PADAN; ZILBERSTEIN; ROTTENBERG, 1976; PADAN, ZILBERSTEIN, SCHULDINER, 1981; SLONCZEWSKI et al., 1981; BOOTH, 1985; MCLAGGAN; STEPHEN; BOOTH, 1998; VOET et al., 2002).

2.10.12.3 Microrganismos como aditivo de lubrificação pela produção de EPS

Uma inversão do paradigma de que a atividade microbiana em FCs pode causar efeitos negativos foi investigado por Brinksmeier e colaboradores (REDETZKY et al., 2014; 2015). Numa abordagem interdisciplinar, o potencial de bactérias e / ou produtos microbianos atuando como FCs ou substituindo um de seus componentes foi apresentado. As estruturas de ambos é mostrada comparativamente na Fig. 2.31. A capacidade de lubrificação de células bacterianas foi superior à de FCs disponíveis comercialmente sob certas circunstâncias (REDETZKY et al., 2014; 2015). Esta abordagem vai além do conceito de um fabricante europeu de FCs, que adiciona uma espécie de bactéria a emulsões, com o propósito de biocontrole para espécies mais indesejáveis (BRINKSMEIER et al., 2015).

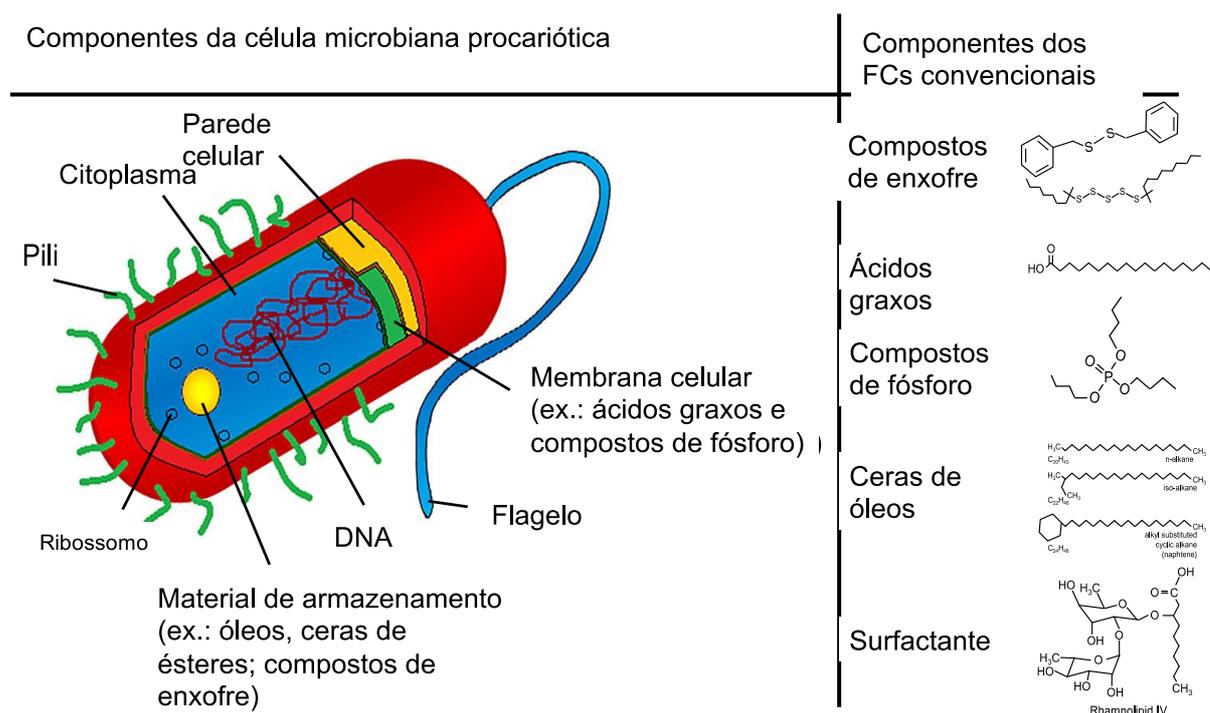


Figura 2.31 – Estruturas e componentes de microrganismos e de fluidos de corte comparativamente (REDETZKY, 2014)

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

3.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados todos os detalhes necessários empregados na metodologia utilizada para determinar o desempenho de dois fluidos de corte (um de base mineral semissintético e um de base vegetal emulsionável) biodegradados em comparação aos fluidos novos/recém diluídos. Um fluxograma apresentado na Fig. 3.1 mostra os níveis de biodegradação de acordo com o tempo de submissão à ação microbiológica. A caracterização das amostras testadas e os ensaios de desempenho realizados são apresentados considerando-se: i.) o tratamento dedicado aos fluidos; ii.) a caracterização dos mesmos e iii.) seus comportamentos após contaminação microbiológica. Os ensaios de usinagem foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem - LEPU e os ensaios tribológicos foram realizados no Laboratório de Tribologia e Materiais - LTM, ambos da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU. Os fluidos foram preparados nos Laboratórios de Microbiologia Molecular e de Parasitologia ambos pertencentes ao ICBIM/UFU.

O detalhamento da metodologia utilizada para determinar o desempenho dos FCs é apresentado na Fig. 3.1. e Tab. 3.1.

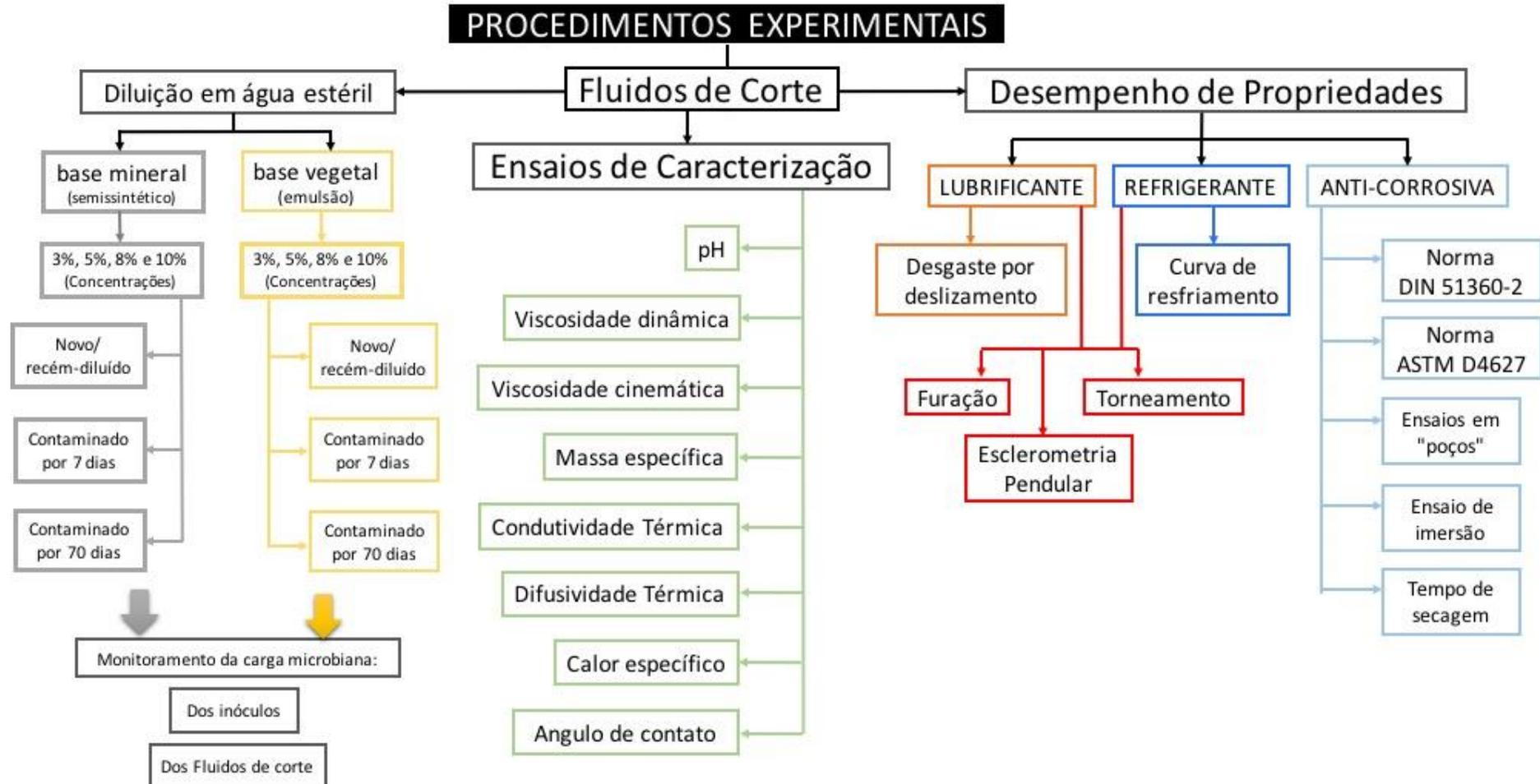


Figura 3.1 – Detalhamento da metodologia utilizada nas etapas experimentais realizadas (Fonte: autora)

Tabela 3.1. Relação de ensaios realizados em função das condições de contaminação microbiológica e das concentrações utilizadas para os dois FCs investigados.

Ensaio		Concentração dos FCs utilizados (Base Vegetal (emulsão) e Base Mineral (semissintético))		
		Novo	7 dias*	70 dias*
Contaminação microbiológica “ <i>in vitro</i> ”	Inoculação de microrganismos previamente cultivados por 72hs em caldo nutritivo	-		
	Monitoramento de microrganismos viáveis pré inoculação nos fluidos de corte			
	Monitoramento de microrganismos viáveis no fluido de corte 48 horas após procedimento de inoculação			
Propriedades Físico-químicas	pH			
	Viscosidade cinemática		3,0%,	3,0%,
	Viscosidade dinâmica	3,0%,	5,0%,	5,0%,
	Massa específica	5,0%,	8,0%	8,0%
	Difusividade térmica	8,0%	10,0%	10,0%
	Condutividade térmica			
	Calor específico	10,0%		
Desempenho de Propriedades	Angulo de contato			
	Lubrificante – Desgaste por deslizamento			
	Lubri-refrigerante – Furação (AISI 1045)			
	Refrigerante – Curva de Resfriamento			
	Lubri-refrigerante – Esclerometria pendular (V304UF)			
	Lubri-refrigerante – Esclerometria pendular (Alumínio)			
	Anti-corrosiva – DIN11360-2			
	Anti-corrosiva – ASTM D4627			
	Anti-corrosiva – Ensaio em “poços” (ABNT 1020)	8,0%	8,0%	8,0%
	Anti-corrosiva – Ensaio de imersão (ABNT 1020)			
	Anti-corrosiva – Tempo de secagem (ABNT 1020)			
Lubri-refrigerante – Torneamento (V304 UF)				

*Condições de teste nas quais os Fluidos de Corte foram contaminados por microrganismos por sete e setenta dias.

3.2. Caracterização dos materiais utilizados

3.2.1 Materiais de corpos de prova

Para os testes e ensaios realizados nesta investigação foram fabricados corpos de prova utilizando barras de: i.) *aço inoxidável austenítico V304UF* (não solubilizado) fabricado e fornecido pela Villares Metals S.A., forma cilíndrica, com dimensões de 98 mm de diâmetro por 480 mm de comprimento; ii.) *alumínio comercialmente puro*, seção transversal quadrada, com dimensões de 15 mm x 15 mm x 1000 mm; e os aços iii.) *aço ABNT 12L14* e iv.) *aço ABNT 1045*, forma cilíndrica, com dimensões (diâmetro x comprimento) de 25,40 mm x 500 mm e 50,80 mm x 1000 mm, respectivamente. As composições químicas e durezas dos materiais utilizados são apresentados na Tab. 3.2.

Tabela 3.2 - Composição química (% em massa) e dureza dos materiais utilizados.

Materiais	Dureza (HB)	Resistência tração (MPa)	Elementos (%)									
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Bal.
V304UF	149	515	0,08	1,00	2,00	0,04	0,03	18,00 - 20,00	-	8,00 - 12,00	-	Fe
12L14	127	427,5	0,078	0,03	1,25	0,05	0,27	0,18	0,03	0,17	0,17	Fe
1045	152	560	0,52	0,24	0,75	0,13	0,22	0,15	0,03	0,11	0,08	Fe
Alumínio	60	69 - 95	-	0,10	0,10			0,01		0,03	0,05	Al

3.2.2 Ensaio Metalográfico

Para identificação da microestrutura, preparou-se amostras metalográficas da seção transversal de cada material, como apresentadas na Fig.3.2. Essas passaram por um lixamento, com lixas d'água de 320, 400, 600 e 1200 grana; polimento com óxido de cromo, pasta diamantada de 6µm, 3µm, 1µm e sílica coloidal (0,06 µm); ataque eletrolítico com ácido específico a cada material e tempo de reação de 30 segundos a um minuto. Na análise, utilizou-se os microscópios ópticos: i.) Amplivial, da marca *Carlzeiss-Jena*, com luz polarizada e aumento de 12,5x e ii.) Olympus modelo BX51M em diferentes aumentos. As imagens foram geradas em microscópio Olympus com aumento de 200x e 500x para os materiais a, b e c. Para imagem d, utilizou-se o microscópio óptico Amplivial.

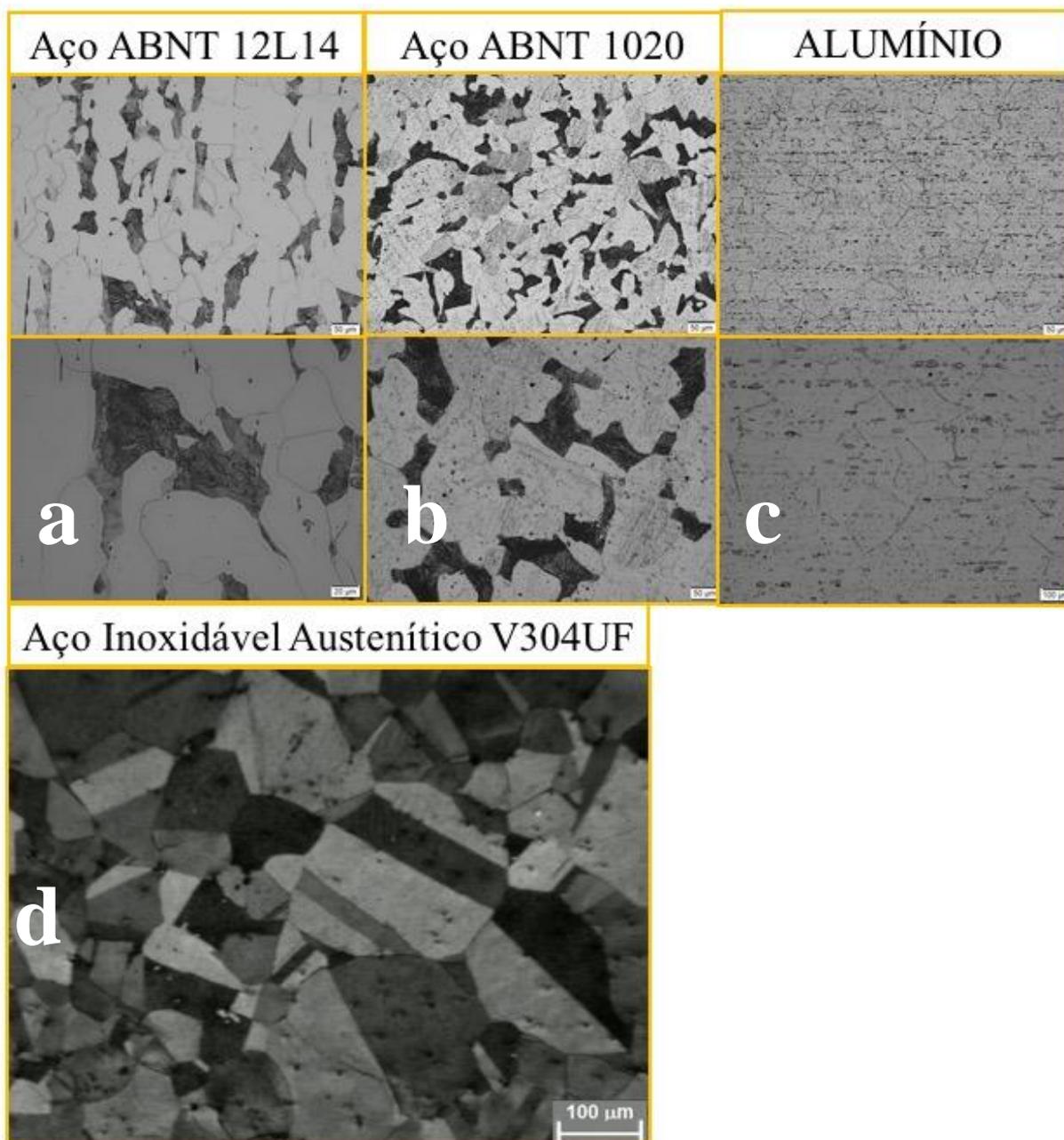


Figura 3.2 - Microestrutura dos materiais utilizados no estudo. Em a.) aço de livre corte ABNT 12L14; em b) aço ABNT 1045.); em c.) alumínio comercialmente puro e em d.) aço inoxidável austenítico V304UF.

3.3. Preparo dos Fluidos de corte e limpeza da máquina para os ensaios de torneamento

As características dos dois FCs investigados são apresentadas na Tab. 3.3. Os valores das características dos fluidos de corte fornecidas pelos fabricantes foram consideradas como de referencia para os valores obtidos nos resultados dos testes/ensaios. O preparo dos fluidos foi realizado em quatro concentrações (3,0%, 5,0%, 8,0% e 10,0%), utilizando-se água

destilada estéril (água macia), conferidas por refractômetro digital (modelo PDR50B, com taxa de medição de 0 a 50% BRIX e precisão de $\pm 0,1\%$ BRIX).

Tabela 3.3. Características dos dois FCs utilizados.

Base	Tipo	pH (uso)	Densidade (20 °C)	Ponto fulgor	Viscosidade (40 °C)	Concentração recomendada (v.v ⁻¹)
Vegetal	Emulsão	8,7 – 9,2	0,95 g/cm ³	192 °C	55 mm ² /s	Usinagem FGD* 5-8%
Mineral	Semissintético	8,5 – 9,2	1,07 g/cm ³	180 °C	56 mm ² /s	Usinagem FGD* Retificação 3-5%

Fonte: dados obtidos dos fabricantes; *Usinagem FGD = Usinagem utilizando ferramentas com geometria definida

Para a maior parte dos ensaios utilizando fluidos de corte novos/recém diluídos, esses foram preparados no mesmo momento em que foram feitos os ensaios com os fluidos submetidos a contaminação microbiológica por setenta dias. Os fluidos de corte após sete dias de contaminação microbiológica foram estocados/congelados até esse mesmo momento de realização dos ensaios.

Antes da realização dos ensaios no Torno foi realizada a desinfecção mecânica e química do reservatório, superfícies e tubulações. Também foi utilizado o próprio fluido em uma concentração menor antes de iniciar os ensaios. A ausência de microrganismos na máquina após esses procedimentos foi comprovada realizando coleta de amostras de diferentes pontos da máquina nas superfícies por meio de esfregaço, com “swabs” estéreis. Essas amostras foram cultivadas em meios de cultura e temperaturas apropriados e incubadas por até cinco dias.

3.3.2. Microrganismos contaminantes

Os seguintes microrganismos mais frequentemente recuperados em estudo realizado por Amorim-Finzi (2015) foram utilizados na contaminação artificial “*in vitro*”: *Burkholderia cepacia*, *Stenotrophomonas maltophilia*, *Pseudomonas* spp., *Acinetobacter lwoffii*, *Klebsiela oxytoca*, *Aeromonas* spp., *Brevundimonas diminuta*, *Citrobacter freundii* e fungos leveduriformes. Eles foram cultivados em caldo BHI (Himédia) acrescido de 15% de glicerol e estocados a temperatura de -20°C. A reativação das suspensões de cada amostra é descrita

no próximo subitem. Essa suspensão foi preparada para contaminação dos FC, correspondente a capacidade em litros necessária para a realização dos ensaios.

3.3.3. Contaminação microbiológica dos FCs

A contaminação foi realizada no laboratório de microbiologia de acordo com a norma ASTM E2275 (2013), com modificações (Fig. 3.3.a). As diversas suspensões microbianas foram reativadas do estoque e cultivadas em volume total de 200 mL (por microrganismo) de meio de cultura (BHI) por 72 hs (bactérias) e 120 hs em temperatura ambiente (fungos leveduriformes) no laboratório de Microbiologia Molecular. Posteriormente, foram centrifugadas a 10.000 rpm, a temperatura de 4 °C por 10 minutos no laboratório de Parasitologia/ICBIM UFU. Os “*pellets*” resultantes da centrifugação foram lavados 2 vezes com solução salina (completa remoção do meio de cultura) e ressuspensos em solução isotônica (20 mL), numa concentração de $2,0 \times 10^{22}$ Unidades Formadoras de Colônias por mililitro (UFC/mL). Em seguida esse inóculo foi transportado para o Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), sob refrigeração em tubo falcon de 50 mL, até o reservatório da máquina-ferramenta CNC (modelo Multiplic 35D ROMI), onde era inserido no fluido. Os FCs foram mantidos em repouso por dois dias para cada cinco dias de circulação contínua na máquina-ferramenta.

Essa contaminação artificial “*in vitro*” foi monitorada, utilizando-se a técnica de diluição seriada (Fig. 3.3.b), durante todo o período de contaminação dos fluidos (setenta dias), quanto as seguintes características: formação de anel oleoso na superfície do reservatório, coalescência (separação de fases óleo e água), produção de produtos químicos orgânicos voláteis malcheirosos, viscosidade, cor e pH (PASSMAN, 1988; MANG; FREILER; HÖRN, 2007; KOCH, 2008). Adicionalmente, volumes de 100 µL dos FCs diluídos (10^{-3} a 10^{-7}) foram analisados microbiologicamente, qualitativa e quantitativamente, a cada 48 hs, antes de receber novo inóculo, através de subcultivo nos seguintes meios: Mueller-Hinton e Sabouraud, as temperaturas de 37°C e ambiente, por 48hs e cinco dias respectivamente, para quantificação de bactérias e fungos.

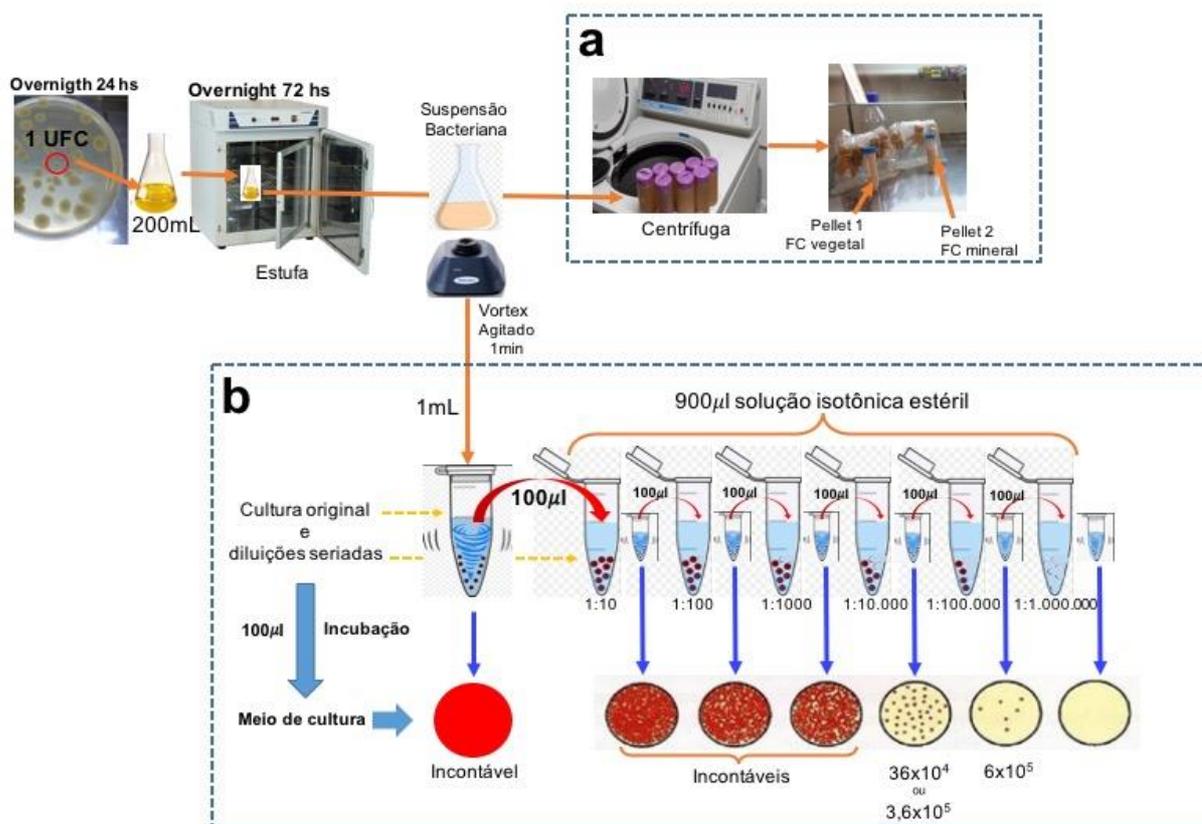


Figura 3.3. – Reativação de microrganismos a partir do estoque em cultura overnight (24hs) e cultivo para a) obtenção dos pellets contaminantes do fluidos de corte de base vegetal e mineral e em b) determinação e monitoramento da carga microbiana de viáveis utilizada para realizar os inóculos (contaminação “in vitro”) nos fluidos de corte envelhecidos (7 e 70 dias).

3.4. Caracterização dos fluidos de corte

3.4.1. pH

O pH (potencial Hidrogeniônico) dos FCs investigados foram medidos com o pHmetro portátil digital da marca ION modelo PH-500 (faixa de leituras de 2,00 até 16,00 pH e precisão de $\pm 0,01$ pH). As medições foram realizados no LEPU/FEMEC/UFU, em temperatura ambiente média de 29,8 °C e sempre após calibração do aparelho de acordo com o manual do fabricante. Foi considerada a média de três medidas.

3.4.2. Viscosidades dinâmica, viscosidade cinemática e massa específica

As medidas de viscosidade (dinâmica e cinemática) e de massa específica foram realizadas empregando uma tensão de cisalhamento constante, através do Viscosímetro Anton

Paar modelo SVMTM 3000 do Laboratório de nanofluidos/FEMEC/UFU (Fig. 3.4.). O equipamento combina a precisão exigida pela norma ASTM D7042, que é equivalente à norma ASTM D445/ISO 12185, e medição do índice de viscosidade de acordo com ASTM D2270 em um dispositivo de bancada.

Os ensaios foram realizados à temperatura de 40°C através da injeção de alíquotas de FC de 2,5 mL utilizando seringas estéreis (5 mL). O equipamento realizou quatro medições de cada amostra de FC que resultaram nos valores médios de viscosidade dinâmica cinemática e



de massa específica apresentada nos resultados.

Figura 3.4. Viscosímetro utilizado para caracterizar os FC investigados

3.4.3. Difusividade Térmica, condutividade térmica e calor específico

As medidas de difusividade e condutividade térmica, bem como de calor específico foram realizadas no equipamento Transiente Hot Bridge, modelo Linseis (Fig. 3.5.), com alta precisão (melhor que 1%) e acuracidade (melhor que 5%). O equipamento apresenta faixa de medição para condutividade térmica de 0,01 a 1 W/(m.K), para difusividade térmica de 0,05 a 10 mm²/s e calor específico de 100 a 5000 kJ/(m³K). Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente utilizando um becker com capacidade de 60 mL que possibilitou a inserção completa da sonda no FC testado. Cada amostra de FC foi verificada através de 10 medições pela sonda.



Figura. 3.5. Condutivímetro utilizado na caracterização dos FCs

3.4.4. Medição do Ângulo de contato

A chamada molhabilidade de FCs é outro aspecto a ser considerado para se determinar a eficiência de um fluido. Uma abordagem para descrever a capacidade de umedecimento de FCs em superfícies de metal é a análise da energia livre de superfície e a tensão superficial através da medição do ângulo de contato θ (Fig. 2.10.a.). A energia livre de superfície específica e a tensão superficial entre as fases em contato são usadas para explicar processos de molhamento na teoria da adesão termodinâmica (BENITO et al., 2010; BRINKSMEIER et al., 2015).

Para depositar a gotícula sobre a superfície do substrato (aço inoxidável austenítico) previamente preparada (lixada e polida) foi utilizado uma micropipeta com capacidade de 10 μL , contendo um volume fixado (3 μL). A micropipeta utilizada para essa medição foi fixada de forma que as gotas fossem depositadas em igual posicionamento, com precisão e foco da câmara. Cada ponteira foi utilizada uma única vez. Para o posicionamento exato da gota do líquido molhante sobre a superfície do substrato, apenas o substrato era removido para: i.) limpeza superficial (embebido em acetona P.A. e submetido a vibração ultrassônica por 5 minutos); ii.) troca de ponteira da micropipeta e iii.) abastecimento da ponteira com CF. Tanto

a mesa de apoio do substrato quanto a micropipeta foram mantidos fixos na mesma posição durante todos os ensaios.

De um modo geral, a diminuição do ângulo de contato (entre a fase líquida e sólida), demonstra melhoramento da capacidade molhante do fluido. Neste caso, a adesão de substâncias químicas presentes no líquido em contato com a superfície sólida é facilitada (GLEICH, 2004), o que leva a uma melhor lubrificação no trabalho de metais com base em interações entre aditivos e a superfície metálica (CAMBIELLA et al., 2007; BRINKSMEIER et al., 2015).

3.5 Ensaios de desempenho das propriedades dos fluidos

3.5.1. Anti-corrosiva

Para determinar as propriedades anticorrosivas dos dois FCs investigados foram realizados cinco diferentes ensaios. Em dois deles a eficiência anticorrosiva dos FCs contaminados por sete e setenta dias foram submetidos as normas ASTM D4627-92 e DIN 51360-2, para as quais, o grau de corrosão promovido foi analisado após 24 e 72 horas respectivamente, sendo visualizada indiretamente em papeis filtro. As duas normas, dessa forma, foram avaliadas comparativamente quanto a eficiência na determinação da propriedade anticorrosiva dos fluidos investigados.

Nos outros três ensaios os resultados foram visualizados diretamente no metal, em dois deles, detectando a presença da corrosão no sítio de exposição do metal ao fluido e o quinto e último ensaio determinou a capacidade do fluido de permanecer na superfície metálica, inibindo as reações de oxi-redução com a atmosfera (tempo de secagem). Todos esses ensaios foram complementares na determinação da perda da proteção anticorrosiva proporcionada pelos fluidos contaminados por sete e setenta dias.

3.5.1.1. Norma DIN 51360-2

Nesta norma o resultado do ensaio de corrosão foi visualizado através de manchas deixadas em um papel filtro que se mantiveram em contato com o FC e com cavacos de ferro fundido, alojados em uma placa de Petri fechada, por um determinado período de tempo (2 horas). Essas manchas deixadas no papel foram contadas, e o resultado da ação anti-corrosiva dos FCs testados foi comparado ao apresentado na Tab. 3.4. e na Fig. 3.6.

Tabela 3.4. Classificação do ensaio de corrosão

Grau de corrosão	Significado	Superfície do papel
0	Ausência	Sem alteração
1	Traços de corrosão	No máximo três sinais de corrosão com diâmetro < 1mm
2	Leve corrosão	Até 1% da superfície descolorida, porém sinais de corrosão em maior número e mais fortes que no grau 1
3	Média corrosão	Superfície descolorida entre 1% e 5%
4	Forte corrosão	Descoloração de mais de 5% da superfície

Fonte: DIN 51360-2 e IP 287/87 – Petrobrás

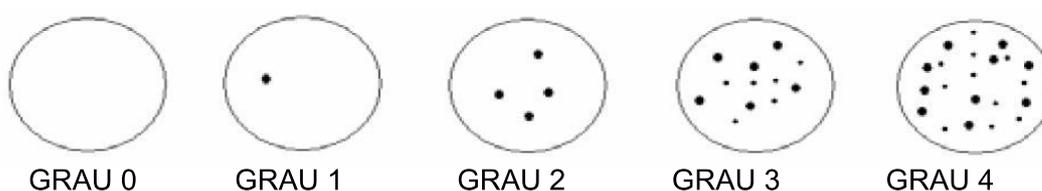


Figura 3.6. Classificação do papel filtro quanto ao grau de corrosão por análise do aspecto do papel após ensaio.
Fonte: DIN 51360-2 e IP 287/87 – Petrobrás

Volumes de 2 mL de cada FC testado foram pipetados em placas de Petri de 35 mm de diâmetro já contendo o papel filtro e 2 g de cavaco de ferro fundido cinzento, umedecendo os cavacos de maneira uniforme. Os cavacos foram espalhados na superfície do papel filtro utilizando-se uma espátula. A placa foi tampada e deixada em repouso, em temperatura ambiente por duas horas. Após esse período de tempo os cavacos foram descartados e os papéis filtro foram mergulhados rapidamente em acetona e colocados para secar sobre a própria placa de Petri em temperatura ambiente. Os ensaios foram realizados em réplica.

3.5.1.2. Norma ASTM D4627

Como no ensaio anterior o tempo de exposição do papel filtro aos fluidos de corte investigados foi de apenas 2 horas foi utilizado também essa norma para verificar a eficácia do método anterior na determinação da perda da propriedade anticorrosiva pelos fluidos contaminados por sete e setenta dias. Para este ensaio foi realizada uma versão modificada da norma ASTM D4627-92. Resumidamente, 4 g de cavaco de ferro fundido, recém gerados no processo de torneamento a seco, foram inseridos em cada uma das seis placas de Petri (35

mm) contendo papel filtro com fibra de vidro. Os cavacos foram uniformemente espalhados em torno do papel filtro. Na sequência, volumes de 2 mL de FC, na concentração de 8%, nas condições de novo e após sete e setenta dias de contaminação, foram pipetados e as placas tampadas e deixadas em repouso por 24 horas. Bolhas de ar presas sob o filtro de papel foram removidas. Decorrido este intervalo de tempo, o FC foi drenado de cada placa e os cavacos foram descartados. O papel filtro foi rapidamente mergulhado em acetona (5 segundos) e deixado para secar na própria placa de Petri, em temperatura ambiente por 24 horas. Na sequência o papel filtro foi fotografado e analisado quanto ao percentual de área na qual foi detectado manchamento por corrosão.

3.5.1.3. Ensaios de corrosão em poços

Foi selecionado o aço de livre corte (ABNT 12L14), bastante reativo em contato com a água e atmosfera para verificar o nível de preservação da propriedade anti-corrosiva dos FCs investigados, quando em contato direto com a superfície do material.

Para realização do ensaio foram fabricados corpos de prova (CP) com dimensões de 50,5 mm de diâmetro e 10,0 mm de altura, bem como 6 furos em cada face desses CPs, com 10,0 mm de diâmetro por 3,0 mm de altura, conforme é apresentado na Fig. 3.7.

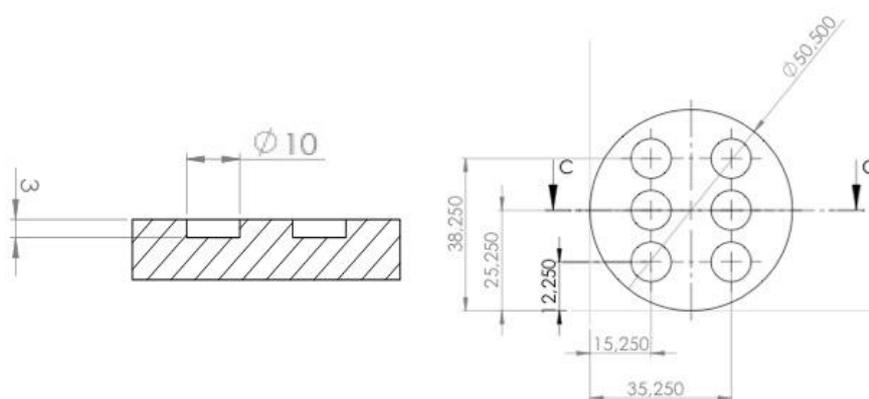


Figura 3.7. Corpos de prova fabricados para o teste de corrosão

Os FCs de base vegetal e mineral à 8% foram testados nas três condições em triplicata (Fig. 3.8). Cada furo (poço) recebeu uma alíquota de FC correspondente a 0,235 mL. Durante a realização do procedimento experimental também foram medidos: a variação de temperatura dos CPs e dos fluidos, os valores de pH, a temperatura ambiente e o tempo de secagem do FC. Foram realizados controles positivo (três superfícies de poços foram

deixados em contato com a água e ar) e também negativo (poço preenchido com o FC não diluído em água).

Os CPs foram deixados em repouso e a verificação das superfícies foi realizada no microscópio eletrônico de varredura. O teste foi interrompido em três momentos (após 8 horas, 24 horas e interrupção final após 72 horas do início) para que as superfícies fossem verificadas.

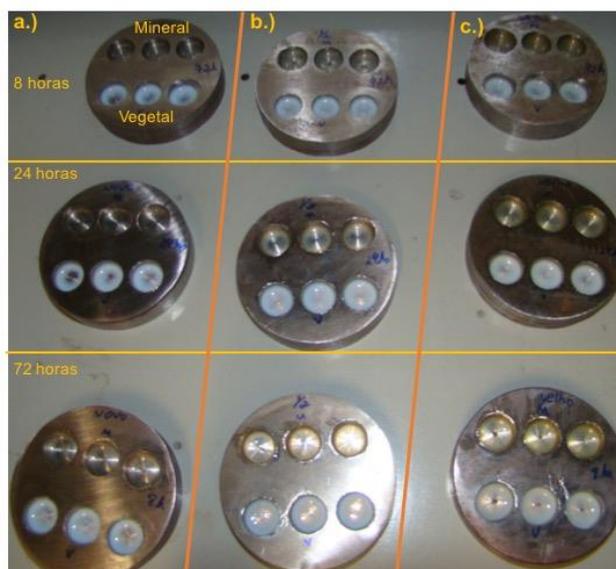


Fig. 3.8. – Ensaio de corrosão em poços (aço ABNT 12L14). A interrupção dos ensaios ocorreu: i.) após 8 horas; ii.) após 24 horas e iii.) após 72 horas do início do teste. Cada poço recebeu alíquota de 275 microlitros, de: a.) FCs novos (recém diluídos), b.) FCs após 7 e c.) 70 dias de contaminação microbiológica artificial “*in vitro*”.

3.5.1.4 Ensaio de corrosão em CPs imersos em fluidos contaminados

Concomitante a este teste, outros seis corpos de prova com dimensões de 15 x 10 x 8 mm³ foram submetidos ao ensaio de corrosão por mergulhamento. Uma das faces de corpo de prova foi preparada utilizando-se as lixas d’água de granas 240 a 1200 e polimento com óxido de cromo. Na sequência foram deixados imersos por sete dias em tubos falcon contendo 50 mL de cada um dos FC investigados, todos eles na concentração de 8,0%.

Decorrido o tempo estipulado para o ensaio os CPs foram lavados em acetona sob agitação ultra-sônica por 5 minutos e levados ao microscópio eletrônico de varredura para análise das imagens.

3.5.1.5 Tempo de secagem do FC

Adicionalmente, foi proposto outro ensaio para determinar o tempo de secagem dos FCs em contato com a superfície do material. O tempo de permanência do FC sobre essa superfície (tempo gasto para evaporação) é um importante parâmetro de proteção conferida pelo fluido pois impede que ocorra reações com gases atmosféricos. Uma superfície de 50 mm de diâmetro de aço de livre corte (ABNT 12L14) foi preparada para o ensaio. Foram inseridas na superfície do metal, logo após limpeza da superfície com acetona (mesma metodologia descrita para limpeza dos corpos de prova submetidos aos ensaios de esclerometria), três gotas (10 microlitros) de cada condição investigada dos FCs foram pipetadas na superfície metálica. O teste foi monitorado a cada 20 min.

3.5.2. Propriedade lubrificante – Desgaste por deslizamento (“*Reciprocating*”)

O método de desgaste por deslizamento tipo “*starving*” foi utilizado para verificar a capacidade lubrificante dos FCs. O método consiste na aplicação de uma gota do lubrificante a ser analisado que é colocado na região de contato entre o corpo e o contra-corpo, que na sequência inicia o deslizamento alternativo.

Os ensaios foram realizados utilizando um tribômetro universal Plint[®], modelo TE 67 *Plint & Partners* LDT no modo alternativo, com amplitude de 5 mm e frequência de 2 Hz. O tribômetro é composto de uma célula de carga para medir a força de atrito e um sistema de medição com potenciômetro de contato, viabilizando a percepção da formação ou não de isolamento entre o corpo e o contra-corpo durante o ensaio. O sistema possui ainda um sensor LVDT (Transformador Diferencial Variável Linear), que permite medir a posição do corpo em relação ao contra-corpo em cada ciclo do ensaio (Fig. 3.9.).

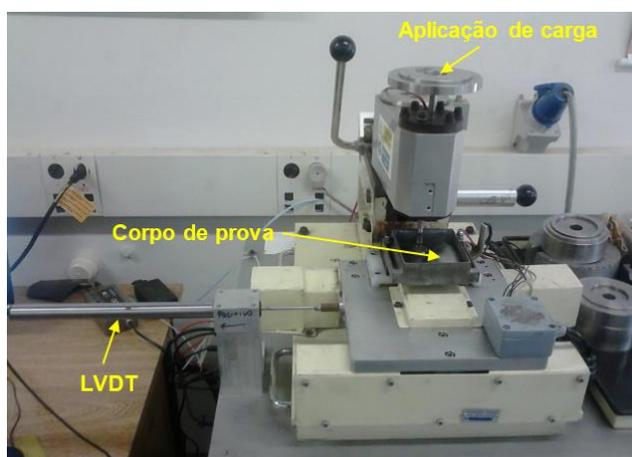


Figura 3.9. Tribômetro Plint TE 67 utilizado nos ensaios de desgaste por deslizamento

Foram utilizados corpos de prova de aço inoxidável 304VP e para o contra-corpo esferas de aço AISI 52100 com diâmetro de 5 mm. Uma gota de 0,5 µl de fluido de corte foi aplicada sobre a superfície do corpo de prova que na sequência, foi riscado pela esfera, cujo sistema recebia periodicamente (a cada 10 min.) uma carga incremental de 6,867 N (de MELLO; BINDER, 2006). Os dados foram adquiridos utilizando placa de aquisição ligada a um microcomputador com o software LabVIEW, assim como também foi utilizado um programa para compilação dos sinais adquiridos pela placa referentes aos ensaios. A análise dos dados foi feita de acordo com metodologia utilizada por Oliveira Junior (2013).

3.5.3. Propriedade Lubri-refrigerante - Esclerometria Pendular

Este método consiste em produzir um risco em uma amostra com geometria definida através da oscilação em movimento único de um pêndulo, no qual é fixado um penetrador de geometria conhecida e ponta truncada, com dureza superior ao material da amostra. O movimento do pêndulo se inicia a partir de uma altura conhecida e ao tocar no corpo de prova remove material (cavaco) gerando um risco na amostra concordante com a direção de sua trajetória. Ao atingir um ângulo de contato com a amostra de 90°, o pêndulo empurra um ponteiro, cujo percurso varre uma escala (que varia de 0 a 154°) na qual é registrada a energia consumida para realizar o risco, de acordo com a altura máxima que o pêndulo alcança ao fim do único movimento de oscilação que realiza após liberação. Desta forma é possível determinar a resistência ao cisalhamento do sistema testado (corpo de prova, fluido de corte e penetrador), através do cálculo da energia específica necessária para promover o risco, obtida através do registro dessa energia e do diferencial de massa perdida, utilizando a Eq. 3.1 (FRANCO, 1989).

$$e = \frac{E}{\Delta m} (J / mg) \quad 3.1$$

Sendo:

e – Energia específica de riscamento (J/mg)

E – Energia consumida na produção do risco (J)

Δm – diferencial de massa perdida (mg)

A metodologia utilizada por Franco foi adaptada considerando-se também metodologia de Sales e colaboradores (1999). Resumidamente, as amostras, após fixadas no porta amostras da mesa do esclerômetro pendular, passaram pelo ajuste micrométrico de altura para que a origem fosse estabelecida entre o penetrador e a superfície do corpo de prova. Após o procedimento de referenciamento, a altura da mesa foi ajustada de acordo com a profundidade desejada, em relação a base truncada na ponta do penetrador e a superfície do material, totalizando sete alturas nominais (24, 48, 72, 96, 120, 144 e 168 micrometros) testadas. A profundidade do risco sofreu variação por meio de um parafuso com passo de rosca micrométrico existente na máquina. O risco foi produzido a partir da liberação do pêndulo, com massa de 0,877 kg, posicionado inicialmente a um ângulo de 154°, com energia de 4,24 J e velocidade de percussão de 4,9 m/s (FRANCO, 1989). A máquina foi re-referenciada a cada novo risco.

O Equipamento (Fig. 3.10.) do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Universidade Federal de Uberlândia, foi desenvolvido e avaliado por Franco (1989).

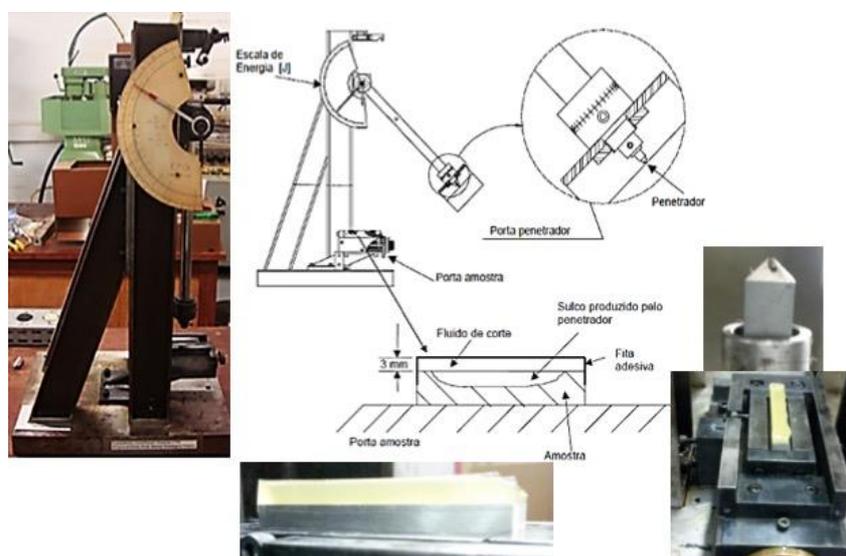


Figura 3.10. Esclerometro Pendular desenvolvido por Franco (1989) utilizado nos ensaios

O penetrador utilizado foi confeccionado de metal duro (WC-Co) com ângulo de ataque de 43,5° e base quadrada de 0,48 mm. Após cada risco, a face de ataque do penetrador foi analisada com uma lupa, com capacidade de ampliação de 25 vezes. Quando da detecção de material aderido, ou pequeno desgaste na ponta do penetrador o mesmo era substituído.

Quando do riscamento em ambiente úmido, a superfície do corpo de prova foi submerso em uma camada de 3 mm de FC (1,2 mL) retida por fita adesiva formando um pequeno reservatório de FC. Após cada ensaio, o corpo de prova testado foi limpo em água e depois imerso em acetona e vibrado durante 5 minutos em um equipamento Mini-som ultrassônico. Na sequência foram secados com jato de ar e pesados (antes e após o risco) por meio de uma balança Sartorius, modelo MC210P, com resolução de 10^{-5} kg.

Os corpos de prova foram fabricados a partir do aço inoxidável U304UF e alumínio comercial puro, em formato de paralelepípedos, com dimensões de 9 mm x 9 mm x 45 mm. Foram retificados em uma retificadora tangencial com rebolo de alumina com grana 46, apresentando uma rugosidade média Ra de $0,15 \mu\text{m}$.

3.5.4. Propriedade refrigerante – Curva de resfriamento

O calor específico de um fluido pode determinar a sua capacidade de troca de calor. O método de medição mais difundido é o calorimétrico, porém trata-se de um método que não leva em consideração o aspecto dinâmico envolvido na usinagem. Uma metodologia desenvolvida por Sales (1999) considerando a dinâmica dos processos de usinagem para a medição desta capacidade refrigerante foi adotada, aproximando-se ao máximo das condições reais de fabricação.

Preparo dos corpos de prova - Foram fabricados corpos de prova (CPs) cilíndricos a partir de uma barra de aço ABNT 1045, com dimensões de 40 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento, preparados ainda com um furo central em uma das extremidades, medindo 35 mm de profundidade e 25,4 mm de diâmetro (Fig. 3.11.). Os testes foram realizados em réplica e tréplica, utilizando um corpo de prova para cada teste. Dois FCs (um de base mineral semissintético e um de base vegetal emulsionável) foram testados em três condições de contaminação: i.) recém diluído/não contaminado; ii.) Após 7 dias de biodegradação e iii.) após 70 dias de biodegradação.

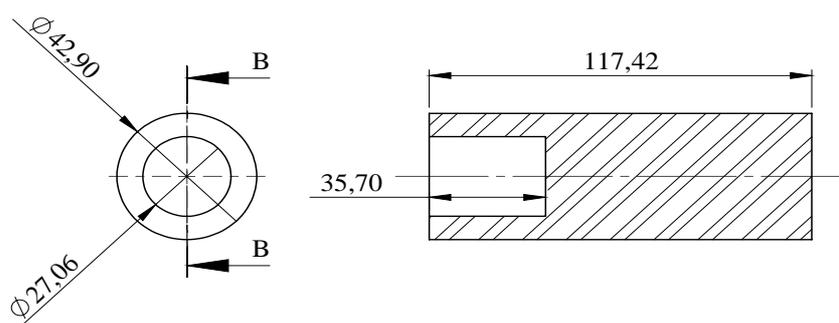


Figura 3.11. _Dimensões (mm) dos corpos de prova utilizados nos ensaios de capacidade refrigerantes dos FCs.

Os CPs foram colocados em um forno elétrico do tipo Mufla Digital Microprocessado, apresentando dimensões internas de 200 x 150 x 150 mm, capacidade de aquecimento de até 1200°C modelo Magnu's. Os CPS foram deixados no forno com temperatura ajustada de 350°C e permaneceram nesta temperatura por 1 hora para estabilização e homogeneização. Após esse tempo o CP foi transferido/fixado na placa do torno e submetido a uma rotação de 180 rpm, para então receber o jorro de fluido de corte ajustado em uma vazão de 9 L/min, direcionado na região central do CP, tangenciando o mesmo.

Para registrar o diferencial de temperatura no interior do furo central do CP durante a realização de cada teste, réplica ou tréplica foi utilizada uma câmera infravermelha modelo FLIR A325, do tipo microbolometer, cuja análise ocorreu em faixa de espectro de 7,5 a 13,0 μm . Esta câmera possui uma resolução de 320 x 240 pixels, com taxa de aquisição de até 60 Hz e acurácia de $\pm 2^\circ\text{C}$. Para as medições foi selecionado o nível de temperatura de 0°C a 350°C e utilizado o software Thermocam Research 2.9 no qual foram inseridos os parâmetros necessários (distância da câmera/peça; temperatura ambiente; umidade do ar; transmitância, etc.) para análise das temperaturas obtidas durante os testes. Cada fluido de corte forneceu uma curva de resfriamento do corpo de prova no tempo.

A capacidade refrigerante dos FCs também foi quantificada através do cálculo do coeficiente de troca de calor por convecção (h), com o auxílio do número de Biot (adimensional, menor 0,1) cuja margem de erro para essa obtenção é de aproximadamente 5,0% (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2000). O módulo de Biot foi determinado pela Equação 3.2 e 3.3 e o h pela equação 3.4.

$$\theta_t/\theta_i = e^{(-4Bi \alpha t)/r^2} \quad \text{Eq. 3.2}$$

$$Bi = \frac{\ln \frac{10}{264} r^2}{-4\alpha t} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Onde $\theta_t = T_t - T_\infty$ (convertido em Kelvin -) e $\theta_i = T_i - T_\infty$ (convertido em Kelvin).

T_t = temperatura final do corpo de prova (41°C);

T_∞ = temperatura ambiente (31 °C);

T_i = temperatura inicial de aquisição (296 °C);

Bi = módulo adimensional de Biot;

α = difusividade térmica do material (aço ABNT 1020 = $1,36 \times 10^{-5}$);

r = raio do diâmetro interno do corpo de prova (contendo superfície utilizada nas medições de temperatura = 0,0135 m);

t = tempo total de aquisição (variável para cada ensaio em segundos);

$$Bi = \frac{r \cdot h}{2 \cdot K} \quad \text{Eq. 3.4}$$

Onde:

k = condutividade térmica do aço (aço ABNT 1020 = 17,7 W/mk)

h = coeficiente de troca de calor por convecção (W/(m²K))

3.5.5. Propriedades Lubri-refrigerantes - Furação com força constante

Uma vez que o processo de fabricação onde se tem a remoção de cavaco é uma das definições de usinagem (MACHADO et al., 2015), entende-se que a usinagem é um processo que confere à peça forma, dimensões e acabamento através da remoção de material sobressalente na forma de cavacos (FERRARESI, 2006; MACHADO et al., 2015). E por cavaco entende-se como uma porção de material, com geometria irregular, removida da peça de trabalho pela ferramenta de corte (MACHADO et al., 2015).

Nas operações realizadas por uma furadeira, a ferramenta de corte gira e realiza o movimento de avanço que pode ser manual ou automático. É um processo que promove a qualidade de trabalho normalmente inferior a IT11 (MACHADO et al., 2015).

A furação apresenta algumas particularidades em relação aos demais processos de usinagem, relacionadas à intensa geração de calor no interior do furo, uma região de difícil acesso do fluido (operação ocorre internamente na peça). Mesmo nos demais processos, como o torneamento, o fluido também tem dificuldades de acesso na interface cavaco-ferramenta. O acesso do FC à região que necessita de lubri-refrigeração é bastante dificultada no processo de furação. Principalmente no caso de furos profundos, para alcance da região de formação de cavaco, na qual retira calor, contribui na redução do coeficiente de atrito e, conseqüentemente, na redução das forças de usinagem. Fluidos com boa lubrificidade e elevada viscosidade, podem ter essa capacidade reduzida e comprometer o seu desempenho.

Utilizando-se força de avanço constante no processo de furação, a usinabilidade de materiais, ferramentas e fluidos de corte foi averiguada com praticidade e rapidez (MILLS; REDFORD, 1983). Nesse método, (Fig. 3.12.) uma furadeira de bancada foi adaptada

(utilizando roldana, cabo de aço, prato e pesos) para promover uma força de avanço constante na broca, quando da usinagem da peça. Enquanto o tempo fixado era decorrido, era registrado por um dispositivo LVDT a profundidade atingida pela broca, sendo este o parâmetro utilizado para comparação de desempenho, nas diversas condições lubri-refrigerantes de interesse. Pode-se ainda fixar uma profundidade do furo e medir o tempo para esta operação. Neste caso o tempo será o parâmetro de comparação. Neste trabalho utilizou-se a primeira opção.

Foram preparadas bolachas de aço inoxidável V304UF, de dimensões 100 mm de diâmetro x 30 mm de comprimento. O furo nas peças foi realizado utilizando-se brocas Dormer HSS, revestidas com TiN, de 8 mm de diâmetro, com rotação de 1770 rpm ($v_c=44,48$ m/min), submetidas ao esforço correspondente a 19,90 N. O tempo de furação das placas foi fixado em 20 s, sendo acompanhado, através de um dispositivo LVDT, a profundidade alcançada pelos furos. Os FCs eram aplicados externamente, a uma vazão de 9 L/min. Nestes testes os resultados foram as médias de três cronometragens distintas (um teste e duas réplicas).



Figura 3.12 Sistema utilizado para ensaio de furação (adaptado de SOUZA, 2015)

3.5.6. Propriedades Lubri-refrigerantes - Torneamento

3.5.6.1. Equipamentos Utilizados nos Ensaio de Usinagem

Para os ensaios de torneamento foram realizados em um torno CNC modelo Multiplic 35D, Romi S.A, com 11 Kw de potência, rotação variável de eixo árvore de 3 a 3000 rpm, e comando numérico GE FANUC Series 21i – TB.

3.5.6.2. Ferramentas e suporte

As ferramentas utilizadas foram insertos quadrados (revestidos com TiN, ângulo de folga igual a 0° e quebra-cavacos integrado), em metal duro, classe M (Sandvik do Brasil S.A.) ISO SNMG120408-MF. A faixa do valor da velocidade de corte (v_c) indicado pelo fabricante para o aço inoxidável AISI 304 é de 90 a 115 m/min. Foi utilizado o suporte para as ferramentas ISO DSBNR/L 2525 M12 (Sandvik do Brasil S.A.) (Fig. 3.13.d), cuja geometria é mostrada na Fig. 3.13.c. e as dimensões na Tab. 3.5.

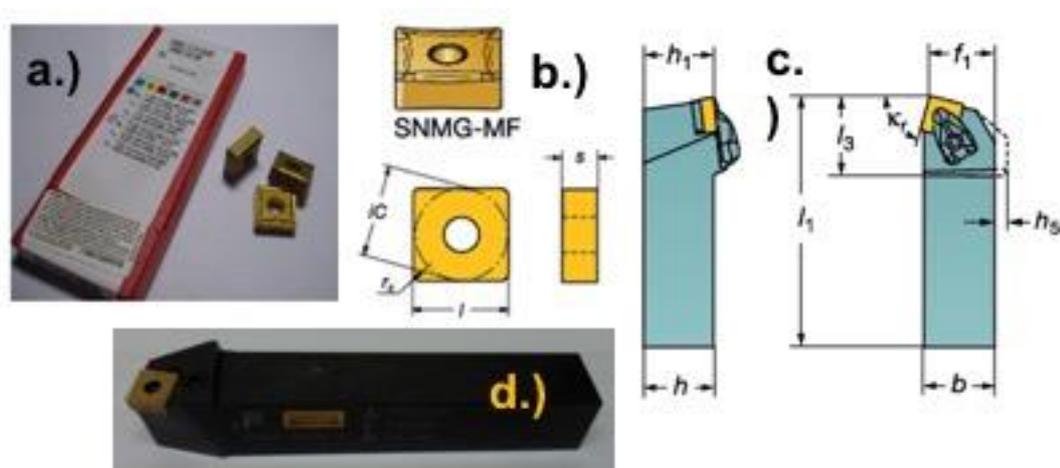


Figura 3.13 - Insertos utilizados nos ensaios de torneamento. a) insertos, b) geometria do inserto ($iC = l = 15,7$ mm, $s = 4,76$, $r_e = 0,8$ mm) (SANDVIK, 2012)

Tabela 3.5 – Dimensões do suporte de ferramenta conforme Fig. 3.9.d. (SANDVIK, 2012)

Dimensões (mm)									
B	f_1	h	h_1	h_{5r}	l_1	l_3	\square^\square	\square^\square	\square
25	22	25	25	2,5	150	37,3	-6°	-6°	75°

3.5.6.3. Equipamentos para os Ensaios de Forças de Usinagem e Acabamento Superficial

As forças de corte (F_c) e de avanço (F_f) do processo foram medidas com os seguintes equipamentos e software:

Dinamômetro piezoelétrico: modelo 9265-B (Kistler Instrument). Este instrumento mede os esforços aplicados sobre a ferramenta usando um circuito composto por anéis piezoelétricos ligado a um amplificador da marca Kistler, modelo 5019A. Os valores dos ganhos utilizados no amplificador foram de 250 N/V para o canal da força de corte e 100 N/V para os canais das forças de avanço. O dinamômetro foi fixado na mesa principal do torno CNC e o

suporte da ferramenta acoplado com um comprimento em balanço de 50 mm, de acordo com o recomendado pelo manual do equipamento.

Placa de aquisição de sinais: Os sinais amplificados eram enviados a uma placa de conversão análogo-digital da PowerDAQ, modelo *National Instruments* USB DAQPad-6251 Pinout 1.25 MS/s. Os sinais foram adquiridos usando uma taxa de aquisição de 6kHz.

Software LabviewTM 7.6: programada para gerenciamento dos sinais adquiridos (National Instruments).

Rugosímetro portátil (MITUTOYO): modelo SurfTest SJ-201, *cut-off* 0,8 mm. O parâmetro escolhido para quantificação da rugosidade foi o desvio aritmético médio (R_a), por ser o parâmetro mais utilizado no meio industrial.

Estéreo Microscópio (SZ6145TR – OLYMPUS): com aumento de 45x, devidamente calibrado para a análise das imagens e monitoramento do desgaste da ferramenta. A medição do desgaste foi feita com o *software* analisador de imagens *Image Pro-express*, sistema de captura e análise de imagens.

Microscópio Eletrônico de Varredura (Hitachi TM 3000): para identificação dos mecanismos de desgaste da ferramenta e elementos aderidos na aresta corte com ampliação de 25 – 30.000x, Acoplado com o EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) da marca SwiftED3000, ambos ligados em um computador com programas específicos.

3.5.6.4. Parâmetros de usinagem

Os ensaios de torneamento envolveram três variáveis de entrada (duas velocidades de corte, dois tipos de FC (mineral e vegetal) em três condições (novo, após sete e após setenta dias de contaminação microbiológica artificial “*in vitro*”), que resultaram em três variáveis de saída (forças de usinagem (F_c e F_f), acabamento superficial (R_a) e vida útil da ferramenta).

Quanto a fixação dos corpos de prova (Fig. 3.14) foram realizados pré-testes até que condições de rigidez (centragem, batimento e pressão dos elementos de fixação) satisfatórias fossem atingidas. Após montar o dinamômetro piezoelétrico (Kistler) no torno Romi CNC, o *software* Labview foi programado com uma frequência de aquisição de dados igual a 6 kHz durante 6 segundos de usinagem obtendo-se assim 36000 sinais de força das duas principais componentes de forças de usinagem (Força de corte - F_c e força de avanço - F_f).

Os ensaios foram realizados com duas velocidades de corte, iguais a 125 m/min (baixa) e 250 m/min (alta), (fora da faixa de formação de APC). Mantendo a velocidade de corte constante em cada trecho, foram coletados os sinais de forças de usinagem variando seis

avanços entre 0,10 a 0,40 mm/volta. Para todos os testes a profundidade de corte e a concentração dos FCs foram mantidas constante igual a 1 mm e 8% v.v⁻¹, respectivamente. Os fluidos de corte foram aplicados na forma tradicional (abundância) na região de corte sob a ferramenta com vazão média (z) de 13,6 L/min. A Tab. 3.6 mostra os parâmetros de usinagem estabelecidos nesses ensaios.

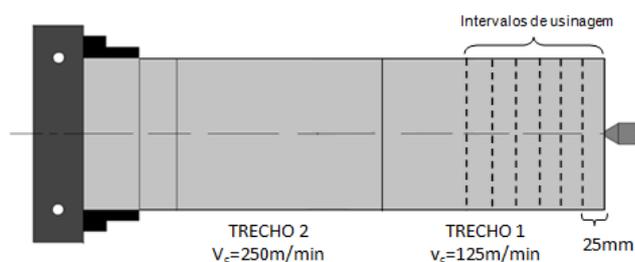


Figura 3.14. Representação da fixação do corpo de prova dividido em dois trechos e intervalos de usinagem

Tabela 3.6. Parâmetros de usinagem utilizados nos ensaios de torneamento para aquisição de forças e medição da rugosidade superficial

Fluido de corte (8% v.v ⁻¹)		Parâmetros de Usinagem			
Base	Condição para ensaio	v_c (m/min)	a_p (mm)	L (mm)	f (mm/volta)
	Novo (recém diluído)	125	1	25	0,10; 0,16; 0,22; 0,28; 0,34; 0,40;
Vegetal	Após sete e setenta dias de contaminação microbiológica	250	1	25	0,10; 0,16; 0,22; 0,28; 0,34; 0,40;
	Novo (recém diluído)	125	1	25	0,10; 0,16; 0,22; 0,28; 0,34; 0,40;
Mineral	Após sete e setenta dias de contaminação microbiológica	250	1	25	0,10; 0,16; 0,22; 0,28; 0,34; 0,40;

Para garantir que o desgaste da ferramenta não influenciasse nos resultados das forças de usinagem, o processo foi monitorado com paradas programadas, para medir o desgaste de flanco a cada 25 mm de usinagem. Quando o desgaste de flanco (VB_B) chegava próximo a 0,1 mm trocava-se a aresta de corte por outra nova.

Após cada teste de força, avaliou-se o acabamento superficial medindo os valores das rugosidades (R_a) em três pontos distintos nos percursos usinados com avanço de 0,10

mm/volta e 0,16 mm/volta em alta e baixa velocidade de corte (125 e 250 m/min). Utilizou-se apenas esses dois valores de avanço por apresentarem os melhores acabamentos nos pré-testes. Esse procedimento foi realizado com o rugosímetro MITUTOYO modelo Surftest SJ-201 (Fig 3.16), utilizando o comprimento de amostragem (l_r) (*cut-off*) igual a 0,8 mm e comprimento de avaliação (l_n) igual a 4 mm (ISO 4288, 1996).

3.5.6.5. Ensaios de Vida da Ferramenta

Os ensaios de vida da ferramenta foram feitos com duas velocidades de corte (125 m/min e 250 m/min), utilizando os fluidos de corte em abundância (jorro), aplicados a uma distância de 50 mm, aproximadamente. Os parâmetros de corte tais como avanço (f), profundidade de corte (a_p), vazão média (z) e a concentração dos fluidos de corte, foram mantidos constantes ao longo dos testes, com valores respectivamente iguais a 0,2 mm/volta; 1,0 mm; 13,6 L/min e 8% v.v⁻¹.

A vida da ferramenta foi monitorada em função do tempo de usinagem. O critério de fim de vida para os ensaios com alta velocidade de corte (250 m/min) foi quando o desgaste de flanco médio (VB_B) atingiu o valor de 0,4 mm. Já nos testes com baixa velocidade de corte (125 m/min), onde a taxa de desgaste era muito baixa, para economia de tempo e material, utilizou o critério de parada quando a ferramenta atingiu tempo de usinagem fixo, igual a 34,5 min. Neste caso os valores do desgaste de flanco médio das ferramentas após este tempo de usinagem foram os parâmetros de resposta considerados para comparação.

3.5.6.6. Ferramentas Estatísticas

A análise estatística dos resultados dos ensaios de vida das ferramentas foram feitos através do teste de hipótese. Para a realização desse teste, deve-se assumir uma hipótese de nulidade (H_0) e uma hipótese alternativa (H_1) (BARROZO, 2006). Assim, para esses testes consideraram-se as seguintes hipóteses:

H_0 : O desgaste médio das ferramentas no processo de usinagem utilizando FCs novos é igual ao desgaste utilizando os FCs contaminados por sete e setenta dias.

H_1 : O desgaste médio das ferramentas no processo de usinagem utilizando FCs novos é menor que o desgaste utilizando os FCs contaminados por sete e setenta dias.

Ressalta-se que devido o pequeno número de amostras ($n < 30$) utilizou-se uma distribuição normal *t-Student*.

CAPÍTULO IV

4. Resultados e Discussões

4.1. Contaminação artificial “in vitro”

As características dos dois FCs (uma emulsão de base vegetal e um semissintético de base mineral) em três condições de investigação: i.) novos/ recém diluídos e ii.) após sete dias de contaminação microbiológica e iii.) após setenta dias de contaminação microbiológica são apresentadas na Tab. 4.1.

Tabela 4.1. Características dos FCs após procedimento de contaminação microbiológica e novos em relação a concentração/índice Brix e óleo base.

FC base (% v.v ⁻¹)	Tempo de contaminação microbiológica (dias)	Número de inóculos	Carga microbiana total inoculada* (\bar{x} =UFC/mL)	Média de microrganismos viáveis** (\bar{x} =UFC/mL)
Vegetal (3, 5, 8 e 10)	0	0	0,0	0,0
	7	3	$6,0 \times 10^{22}$	$1,1 \times 10^5$
	70	29	$5,8 \times 10^{23}$	$2,6 \times 10^4$
Mineral (3, 5, 8 e 10)	0	0	0,0	0,0
	7	3	$6,0 \times 10^{22}$	$4,5 \times 10^5$
	70	29	$5,8 \times 10^{23}$	$1,3 \times 10^4$

*Carga microbiológica por inóculo: $2,0 \times 10^{22}$ Unidades Formadoras de Colônias por mililitro (UFC/mL).

**Carga de microrganismos que apresentem capacidade de desenvolvimento e multiplicação quando em condições favoráveis.

Carga determinada após o período de contaminação de sete e setenta dias.

As quatro concentrações (3,0%, 5,0%, 8,0% e 10,0%) de cada um dos dois fluidos, foram submetidas a contaminação microbiológica periódica recebendo um “*pool*” de microrganismos, totalizando 8 amostras de fluidos contaminados por sete dias, 8 amostras de fluidos contaminados por setenta dias e 8 amostras de fluidos novos.

Os inóculos microbianos foram preparados da mesma forma para os dois FCs. A carga aproximada por inóculo foi de $2,0 \times 10^{22}$ UFC/mL. O “*cut off*” no tempo de inoculação desses fluidos foi de sete dias (após o qual foi possível recuperar dos fluidos uma carga média de $1,1 \times 10^5$ UFC/mL de microrganismos viáveis (aptos ao desenvolvimento e multiplicação quando em condições favoráveis) e setenta dias (quando foi constatada uma queda e estabilização na curva de crescimento desses microrganismos dentro do fluido. Durante o processo de contaminação as propriedades físico-químicas dos FCs foram monitoradas (dados não apresentados) e quando necessário, foi realizado ajuste da concentração com água destilada estéril.

4.1.1. Considerações sobre a contaminação dos FCs

A manutenção dos microrganismos em condição de viáveis dentro dos FCs possibilita afirmar que tenham sofrido adaptação aos nutrientes disponíveis dentro dos fluidos, promovendo dessa forma sua ação biodegradadora. Dessa forma seria interessante discutir o que esperar desse fluido na condição de biodegradado (HARITASH; KAUSHIK, 2009; KADRI et al., 2016). Adicionalmente, nesse estudo, foi possível observar que a oscilação de carga microbiana ao longo do período de contaminação microbiológica (monitorada pela determinação do número de microrganismos viáveis) esteve submetida as alterações sofridas pelos fluidos de corte, dos seus fatores físico-químicos (como pH, viscosidade, tipo/qualidade de nutriente disponível, água, oxigênio).

Uma série de fatores pode interferir na biodegradação do fluido, como o tipo e espécie de microrganismo envolvido, os nutrientes disponíveis em cada fluido de corte, fatores físico-químicos do fluido como pH, viscosidade, temperatura, etc. As propriedades do microclima determinam a atividade de seu microbioma que é responsável pela degradação de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) (HARITASH; KAUSHIK, 2009; KADRI et al., 2016). Neste estudo foram utilizados dois “*pools*” de microrganismos para contaminar os dois tipos de FC investigados. Para cada um deles uma diferente curva de crescimento microbiano foi gerada (dados não mostrados), assim como também para ambos, a queda no número de viáveis na fase de declínio da curva de crescimento, correspondeu ao tempo de

setenta dias de contaminação microbiológica, período de morte celular. Nesta última fase da curva de crescimento microbiano o número de células mortas excede o de células viáveis .

A biodegradação de hidrocarbonetos por exemplo é descrita na literatura quando realizada por bactérias (CYBULSKI et al., 2003, ARULAZHAGAN; VASUDEVAN, 2011; MAO et al., 2012; HAMAMURA et al., 2013; SUN et al., 2014; CÉBRON et al., 2015; DARMAWAN et al., 2015; SINGH et al., 2015), fungos (LI et al., 2005; ARANDA, E., 2010; HADIBARATA et al., 2009; HADIBARATA; KRISTANTI, 2014; BONUGLI-SANTOS et al., 2015; CÉBRON et al., 2015; JOVÉ et al., 2015; MARCO-URREA et al., 2015; YOUNG et al., 2015) ou algas (LUO et al., 2014; DIAZ et al., 2015).

O crescimento microbiano está relacionado aos fatores físicos (temperatura, pH e pressão osmótica) e químicos (fontes de carbono e nitrogênio, enxofre, fósforo, oligoelementos, oxigênio e fatores orgânicos de crescimento (TRABULSI; ALTERTHUM, 2005; TORTORA; FUNKE; CASE, 2008).

Cada espécie de microrganismo cresce a uma temperatura específica mínima (menor temperatura em que a espécie é capaz de crescer), ótima (temperatura de melhor crescimento) e máxima (temperatura mais alta em que ainda é possível haver crescimento) (TRABULSI; ALTERTHUM, 2005; TORTORA; FUNKE; CASE, 2008). Apesar das diferentes espécies de microrganismos inoculados nos fluidos investigados neste estudo essa característica não foi monitorada.

Em relação ao pH, a maioria das bactérias cresce melhor dentro de variações pequenas de pH, sempre perto da neutralidade (entre 6,5 e 7,5) e um pouco inferior para os fungos (entre 5 e 6), portanto, a alcalinidade, acaba por inibir o crescimento microbiano (TRABULSI; ALTERTHUM, 2005; TORTORA; FUNKE; CASE, 2008). Neste estudo, o crescimento microbiano nos fluidos de corte contaminados por sete e setenta dias foi acompanhado da queda nos índices de pH.

Como fator químico muito importante para o crescimento microbiano está o carbono, juntamente com a água. O carbono é essencial para a síntese de todos os compostos orgânicos necessários para a viabilidade celular, sendo considerado o elemento estrutural básico, podendo representar até 50% do peso seco de uma célula bacteriana (TRABULSI; ALTERTHUM, 2005; TORTORA; FUNKE; CASE, 2008).

Os fungos por exemplo, emergem como uma poderosa escolha para a degradação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. Eles têm vantagens sobre as bactérias devido à sua capacidade de crescer em um grande espectro de substratos e, ao mesmo tempo, produzem enzimas hidrolíticas extracelulares, de fácil penetração permitindo remover os

hidrocarbonetos (BALAJI; EBENEZER, 2008; MESSIAS et al., 2009; VENKATESAGOWDA et al., 2012). O nível e a taxa de biodegradação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos por enzimas fúngicas dependem de fatores de crescimento, tais como, oxigênio, acessibilidade de nutrientes e condições ótimas da enzima como pH, temperatura e produtos químicos (KADRI et al., 2016)

Dessa forma pode-se inferir que os dois fluidos investigados, nas quatro concentrações testadas não se encontravam no mesmo estágio de biodegradação devido a questões como: pH do fluido de corte, pressão osmótica devido a quantidade de água (diluições diferentes), concentração dos aditivos, bem como a presença/concentração de oligoelementos (minerais como ferro, cobre, molibdênio e zinco), quantidade de oxigênio dissolvido, etc (TRABULSI; ALTERTHUM, 2005; TORTORA; FUNKE; CASE, 2008). Cada FC se tornou mais ou menos favorável ao crescimento microbiano, com diferentes níveis de hostilidade/toxicidade ao desenvolvimento pleno dos microrganismos inoculados.

Importante ainda salientar que os microrganismos utilizados no estudo, apesar de terem sido recuperados de fluidos de corte idênticos em chão de fábrica, não estiveram submetidos ao mesmo microclima característico devido a inviabilidade de proporcionar as mesmas circunstâncias encontradas em chão de fábrica.

Outras considerações:

- ✓ Cada tipo e concentração de fluido ofereceu uma particular resistência à contaminação microbiana. No geral, o FC de base mineral, apresentou menor resistência a contaminação microbiológica quanto ao tempo necessário para atingir a carga mínima de viáveis de 10^5 UFC/mL (dados não apresentados). O FC de base vegetal, apresentou maior bioestabilidade (aproximadamente 48 horas a mais) para atingir a mesma contagem de viáveis. Contudo, fatores desestabilizadores da emulsão, como precipitação e floculação da fase óleo foram observadas primeiro neste fluido base, nas concentrações de 3,0%, 5,0% e 8,0%.
- ✓ Cada tipo de fluido de corte e concentração investigados ofereceu um microclima diferente para a carga microbiana inoculada, com diferentes concentrações de aditivos e água o que pode ter interferido na maneira como o fluido foi biodegradado/metabolizado por cada grupo de microrganismos inoculados.
- ✓ As preferencias nutricionais dos microrganismos inoculados (bacilos Gram negativos fermentadores e não fermentadores e ainda fungo leveduriforme), determinaram a velocidade, seleção e homogeneidade/velocidade do consumo de cada um dos aditivos presentes nas duas formulações (FC de base vegetal e FC de base mineral).

- ✓ Os fluidos de corte de base mineral, nas quatro concentrações testadas, mostraram mudanças expressivas principalmente na coloração (escurecimento do fluido) e piora do odor característico.
- ✓ visto que, serem esses (físico e químicos) e outros fatores responsáveis pelo crescimento conhecido.
- ✓ Nesse estudo foi periodicamente inoculado 10^{22} UFC/mL de microrganismos viáveis e a morte celular desses microrganismos desencadeou a presença física de uma quantidade ainda maior de não viáveis no fluido (células mortas e ou não cultiváveis). Os efeitos tanto da presença do “particulado microbiano” no fluido, quanto da metabolização dos componentes da fórmula dos mesmos, têm importantes interferências na execução das propriedades lubri-refrigerantes desses fluidos.
- ✓ Várias alterações físico-químicas são apresentadas a seguir nos resultados desse estudo, contudo os desdobramentos para o fluido de corte devido as alterações físico-químicos decorrentes da contaminação microbiológica devem ser melhor esclarecidos.

4.2. Caracterização dos FCs investigados

4.2.1. Monitoramento do pH

Desde a década de 1980 em países com avançado desenvolvimento industrial as emulsões bioresistentes passaram a ter um pH de uso superior a 8,5, tanto para garantir melhores práticas de fabricação, quanto para reduzir a carga microbiana nos FCs para valores entre 10^6 e 10^7 UFC/mL (LINGMANN et al., 1980). De acordo com Rave e Joksch (2012) os valores de pH encontrados em FCs em uso deveriam seguir a faixa entre 8,7 e 9,3 pois minimizaria problemas tanto de toxicidade ao operador da máquina, quanto danos ligados a corrosão de superfícies em contato e o problema da contaminação microbiológica (BYERS, 2006; MURAT et al., 2012). Contudo, há que se considerar ainda problemas relacionados a vulnerabilidade da estabilidade das emulsões em relação a queda do pH (ZHAO; TURAY; HUNDLEY, 2006). Os valores médios de pH medidos ao fim sete e setenta dias de contaminação microbiológica para os dois fluidos, e também para os FCs novos/recém diluídos são apresentados na Fig. 4.1. Observa-se uma queda dos valores médios medidos em menor proporção para o menor tempo de contaminação microbiológica “*in vitro*” (sete dias) quando comparado a redução no pH observada nos fluidos contaminados por setenta dias. As

menores concentrações (3,0% e 5,0%) de FC foram as que sofreram maiores reduções no pH (15,0 e 11,0%).

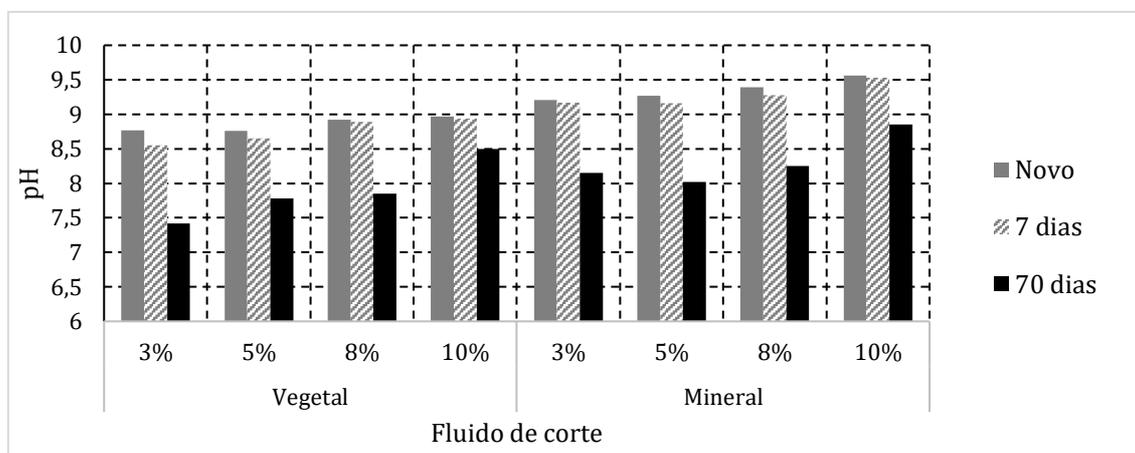


Figura 4.1. Monitoramento do pH dos dois FCs nas quatro concentrações e três condições de contaminação microbiológica investigadas.

Segundo Bennet (1972), o pH influencia no crescimento microbiano a medida em que decresce do ponto ótimo de 9,5. Acima desse valor o crescimento é praticamente nulo, e quando se encontra na faixa entre 9 a 9,5 é muito pequeno. Entretanto, assumindo valores entre 7 e 9 a tendência de proliferação microbiana é alta. Para Trabulsi (2004), os valores de pH em torno da neutralidade são os mais adequados para a absorção de nutrientes pela maior parte das espécies bacterianas, isso devido ao fato da maioria das enzimas desses microrganismos serem ativadas em pH 7. Dados semelhantes foram obtidos por Passman & Rossmore (2002) que, em trabalho com emulsão, observou um decréscimo no pH do fluido de corte quando da presença de microrganismos.

Dessa forma, algumas formulações são acrescidas de alcanolaminas tais como trietanolamina para ajudar a tamponar o pH a um nível alcalino protetivo, tanto contra a oxidação das superfícies metálicas como para sua resistência à contaminação e ação microbiológica (CHILDERS, 2006).

Observando a Fig. 4.1 pode-se dizer que há um crescimento do pH do FC a medida que a concentração aumenta e que o fluido de base mineral apresentou pH maiores que os fluidos de base vegetal.

4.2.2. Viscosidades dinâmica, viscosidade cinemática e massa específica

Os resultados dos índices de viscosidade cinemática e dinâmica e de massa específica para os dois Fluidos de Corte investigados são apresentados nas Figs. 4.2 para os FCs de base vegetal e 4.3 para os FCs de base mineral.

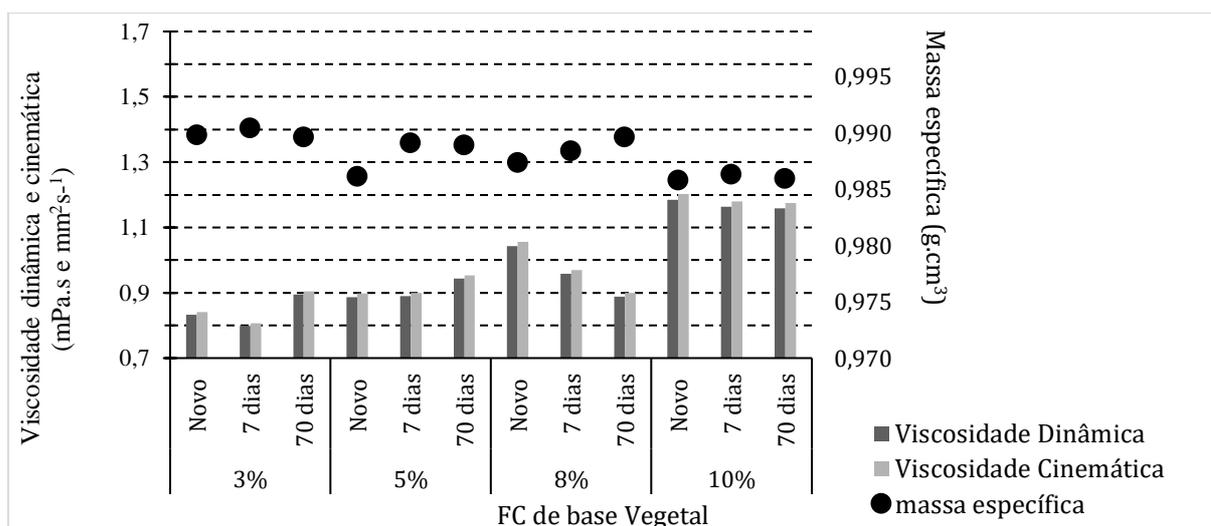


Figura 4.2. Alterações nos parâmetros de viscosidade dinâmica e cinemática e comportamento da massa específica do FC de base vegetal, nas três condições testadas e quatro concentrações de uso investigadas.

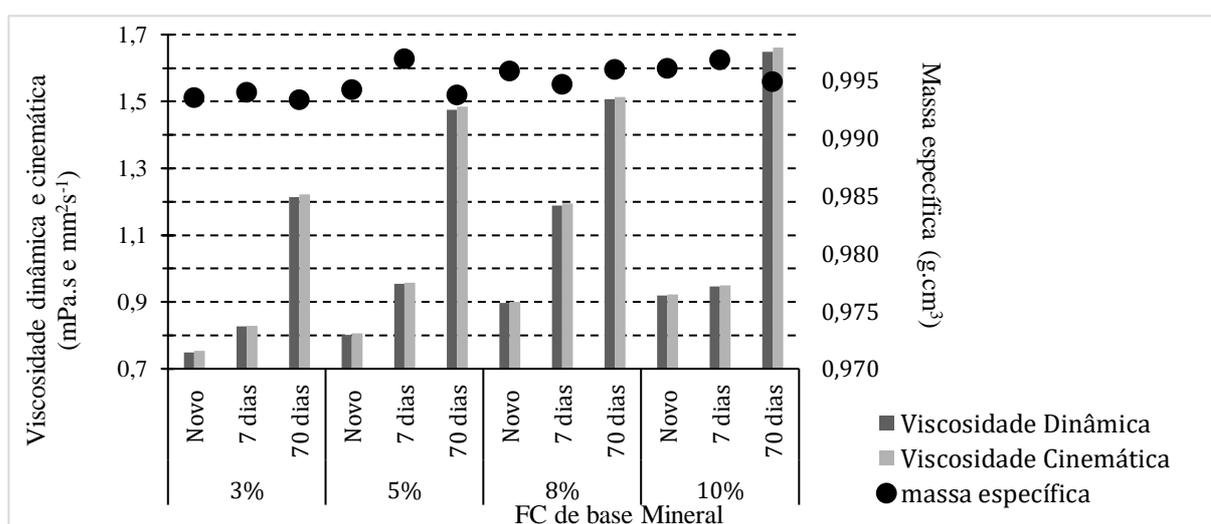


Figura 4.3. Monitoramento dos parâmetros de viscosidades dinâmica e cinemática e massa específica do FC de base mineral, nas três condições testadas e em quatro concentrações de uso investigadas.

Dentre os diversos parâmetros indicados para monitorar a qualidade do FC em uso aparece a viscosidade (PASSMAN, 1988; MANG; FREILER; HÖRN, 2007; KOCH, 2008). Um fluido miscível em água, utilizado em usinagem terá uma viscosidade próxima da

viscosidade da água, uma vez que a água é o seu componente principal (TUCKER, 2006). Contudo, a liberação de subprodutos ácidos ou até mesmo a geração de produtos sulfurados pelos microrganismos que contaminam o fluido de corte podem reduzir a viscosidade do fluido e a sua resistência térmica (BURGESS, 1995; NIOSH, 1998; GILBERT; VEILLETTE; DUCHAINE, 2010).

Para o FC de base vegetal foi observado uma redução de 4,0% 8,1% e 1,8% na viscosidade cinemática e dinâmica após sete dias de contaminação microbiológica nas concentrações de 3,0%, 8,0% e 10,0%, respectivamente. Após setenta dias de contaminação microbiológica, a redução de 14,9% foi observada no FC de base vegetal a 8,0% e de 2,2% para o FC de base vegetal a 10,0%. Na concentração de 5,0% somente o incremento de 6,4% nas viscosidades cinemática e dinâmica foi observado, após setenta dias de contaminação microbiológica “*in vitro*” (Fig. 4.2).

Entretanto, o aumento da oxidação e de subprodutos sulfatados geralmente resulta num aumento dos níveis de viscosidade e acidez do óleo, interferindo no desempenho lubrificante do FC (NEDIĆ; PERIĆ; VURUNA, 2009). Em todas as concentrações testadas, do fluido de corte de base mineral, contaminadas por sete e setenta dias, foram observados aumentos dos índices de viscosidade (cinemática e dinâmica) quando comparados aos Fluidos de corte novos (Fig. 4.3).

Após sete dias de contaminação microbiológica “*in vitro*” os fluidos de corte nas concentrações de 3,0%, 5,0%, 8,0% e 10,0% sofreram aumentos de 10,4% 19,0% 32,5% e 3,1% respectivamente, sendo que o maior incremento nas viscosidades (cinemática e dinâmica) desses fluidos foi observada após setenta dias de contaminação microbiológica “*in vitro*” variando de 62,2% na concentração de 3,0% para 80,0% na concentração de 10,0%.

Em estudo realizado por Meyer; Redetzky e Brinksmeier (2017), realizando ensaios de usinagem e tribológicos, comparando o desempenho lubrificante de fluidos de corte comerciais (várias concentrações) e fluidos de corte a base de diferentes microrganismos notaram uma diferente interação dos microrganismos no aspecto viscosidade quando as células microbianas ainda produziam a matriz extracelular (células íntegras e viáveis) e quando perdiam esta capacidade (células lisadas).

Nos dois FCs investigados (base vegetal e mineral) foram observadas alterações na viscosidade dinâmica e cinemática após sete e setenta dias de contaminação microbiológica “*in vitro*” (Fig. 4.2. e 4.3.). Um fator que pode estar fortemente associado a essa alteração foi o aumento de particulado microbiano (contendo microrganismos viáveis - produtores de matriz extracelular e inviáveis – cuja produção cessou) e seus produtos metabólicos, inseridos

nos fluidos de corte periodicamente, cujos ápices foram pre-selecionados (ponto escolhido de comparação com fluidos novos) após sete e setenta dias de contaminação microbiológica.

Os dois FCs analisados (base vegetal e base mineral) não apresentaram alterações significativas em suas massas específicas nas quatro concentrações investigadas. As variações determinadas e apresentadas nas Fig. 4.2 e 4.3 para a massa específica tanto entre as concentrações quanto após as condições de contaminação investigadas foram inexpressivas. O comportamento dos dois FCs na concentração de 5% (Figura 4.5.) após contaminação por sete e setenta dias foi semelhante ao observado quando utilizado em concentração de 3,0% (Figura 4.4.).

Uma análise mais detalhada da viscosidade cinemática, comparando-se os dois FCs base (mineral e vegetal), é apresentada nas figuras de 4.4. a 4.7 para as concentrações 3,0%, 5,0%, 8,0% e 10,0% respectivamente.

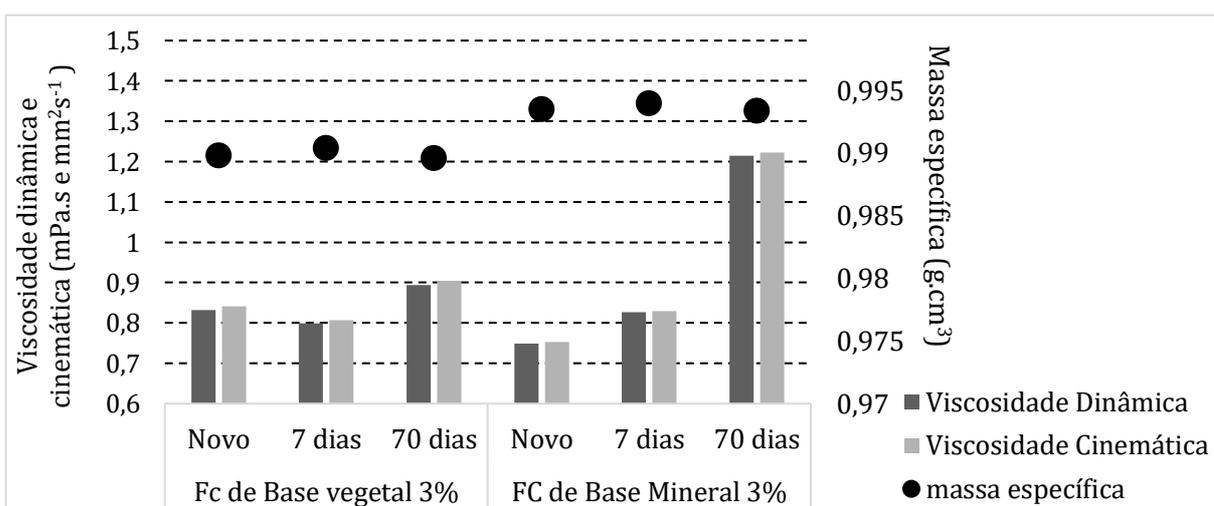


Figura 4.4. Monitoramento dos parâmetros de viscosidade dinâmica, cinemática e comportamento da massa específica para os dois FC a 3,0%, nas três condições testadas.

Na concentração de 3,0% observou-se redução (4,0%) para o FC de base vegetal e incremento (10,0%) para o de base mineral após sete dias de contaminação microbiológica. Após o período de setenta dias de contaminação ambos apresentaram aumento da viscosidade, 62,2% (base mineral) e 7,0% (FC de base vegetal) ambos aos fluidos comparados aos fluidos de corte novos. A viscosidade cinemática dos FCs de base mineral a 3,0% e 5,0%, após contaminação microbiológica por setenta dias, foram significativamente maiores ($P < 0,05$), correspondendo a incrementos de 62,6% (FC a 3,0%) e de 72,5% (FC a 5,0%) respectivamente.

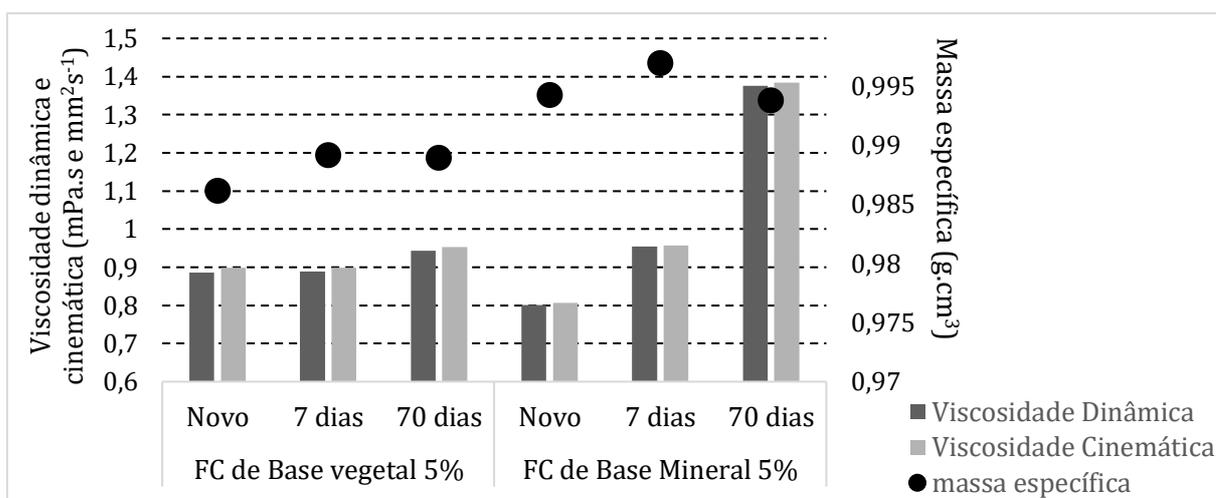


Figura 4.5. Monitoramento dos parâmetros de viscosidade dinâmica, cinemática e comportamento da massa específica para os dois FC a 5,0%, nas três condições testadas.

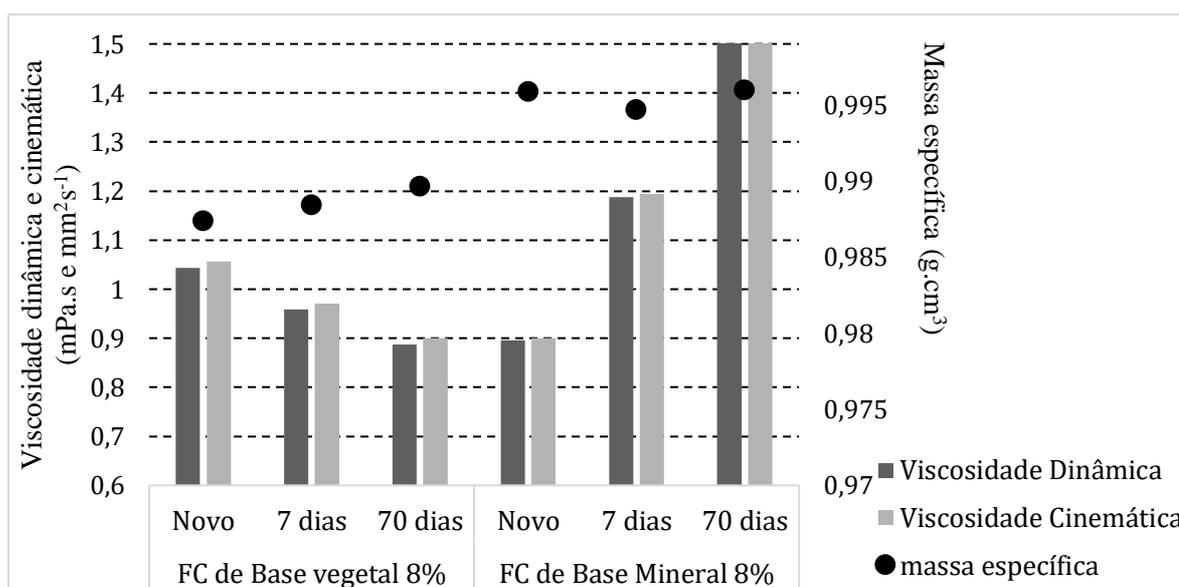


Figura 4.6. Monitoramento dos parâmetros de viscosidade dinâmica e cinemática e comportamento da massa específica para os dois FC a 8%, nas três condições testadas.

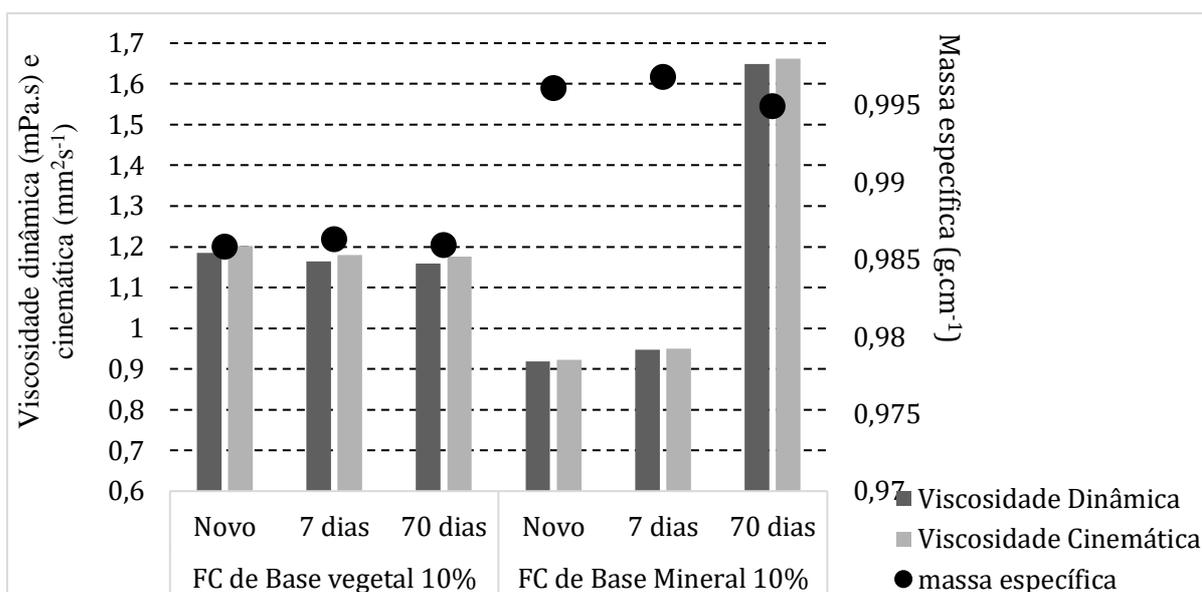


Figura 4.7. Monitoramento dos parâmetros de viscosidade dinâmica e cinemática e comportamento da massa específica para os dois FC a 10%, nas três condições testadas.

Para os dois FC na concentração de 8,0%, foram observados: i.) redução gradativa nas viscosidades para o FC de base vegetal após sete (7,6%) e setenta dias (6,7%) e incremento gradativo para o de base mineral após sete (32,2%) e setenta dias (67,8%) (Fig. 4.6). Na concentração de 10,0% para o FC de base vegetal não foram observadas oscilações significativas para mais ou para menos. Contudo, o FC de base mineral mostrou incremento (80,2%) no índice de viscosidade cinemática após setenta dias de contaminação microbiológica ($P < 0,05$) comparado a sua formulação nova/ recém diluída.

Neste estudo, dentre as duas viscosidades medidas a cinemática foi selecionada, por ser a que melhor define o comportamento do FC no sistema no qual circula, para um ranqueamento dos FCs investigados como é apresentado na Fig. 4.8. Observa-se que enquanto para o FC de base vegetal a contaminação por sete dias melhorou alguns desempenhos como do FC de base vegetal a 3,0%, o efeito oposto foi observado para o FC de base mineral nas quatro concentrações testadas quando submetidas a contaminação microbiológica por setenta dias.

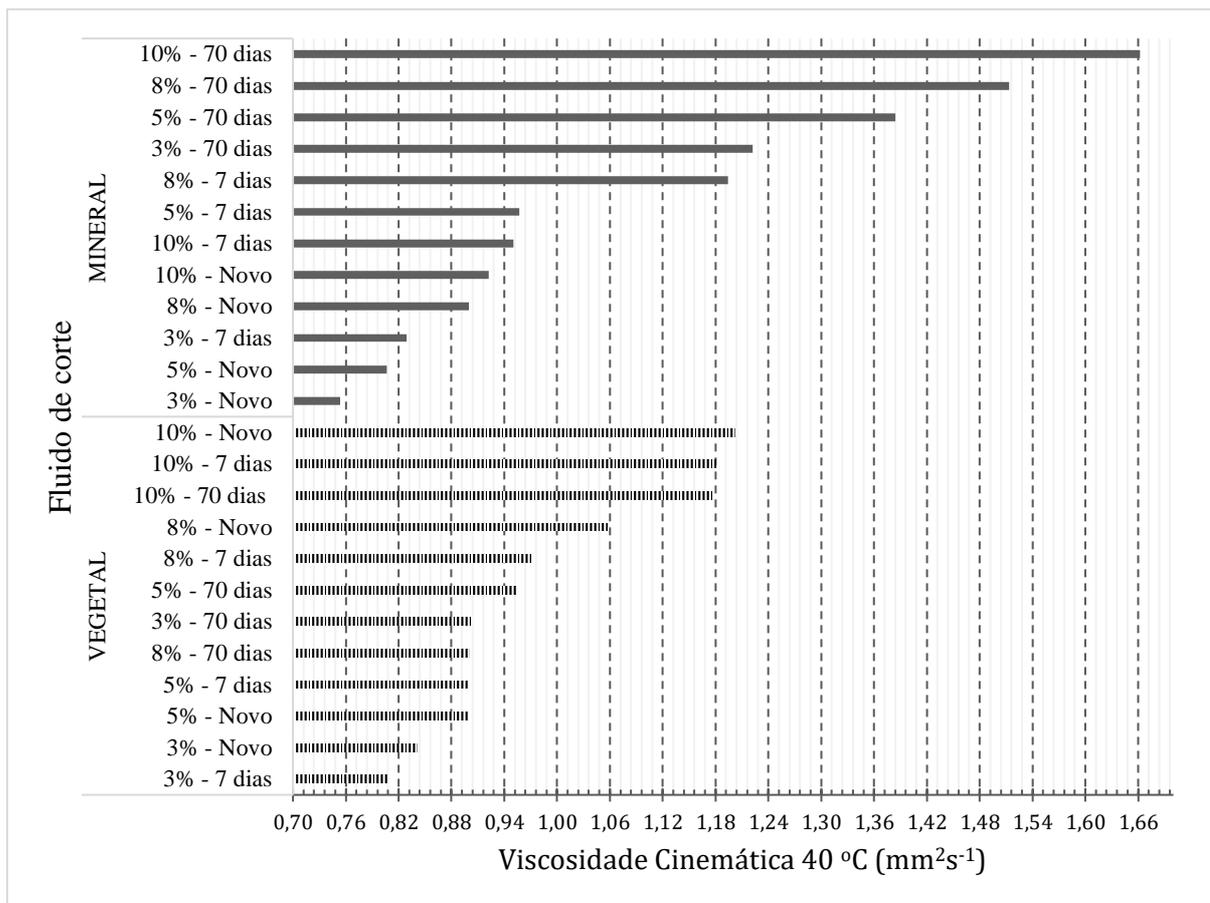


Figura 4.8. Ranqueamento dos dois fluidos de corte (base vegetal - emulsão e base mineral - semissintético) para as quatro concentrações investigadas, nas duas condições propostas de contaminação microbiológica e novos.

4.2.3. Difusividade Térmica, condutividade térmica e calor específico

A difusividade térmica de um material mede a capacidade que esse material possui para conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazenar energia térmica. Materiais com alta difusividade térmica responderão rapidamente a mudanças em seu ambiente térmico, enquanto materiais de baixa difusividade térmica responderão mais lentamente, levando mais tempo para alcançar uma nova condição de equilíbrio (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2000).

Os resultados de condutividade e difusividade térmicas e de calor específico são apresentados na Fig. 4.9a (FC de base vegetal) e 4.9b (FC de base mineral). Todos os fluidos de corte investigados apresentaram coeficiente de condutividade térmica abaixo da água (0,61) (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2000) e mantiveram-se praticamente inalterados nesse parâmetro quando novos e após a contaminação microbiológica por sete e setenta dias. O que significa dizer que o transporte de energia na forma de calor por esses fluidos, quando novos e mesmo após a contaminação microbiológica em nada se alterou.

Contudo, os valores obtidos para o parâmetro difusividade térmica dos dois FCs (base vegetal e mineral) sofreram oscilações mais acentuadas nos FCs de base vegetal quando comparados aos FCs de base mineral após o procedimento de contaminação microbiológica, ambos analisados nas quatro concentrações testadas.

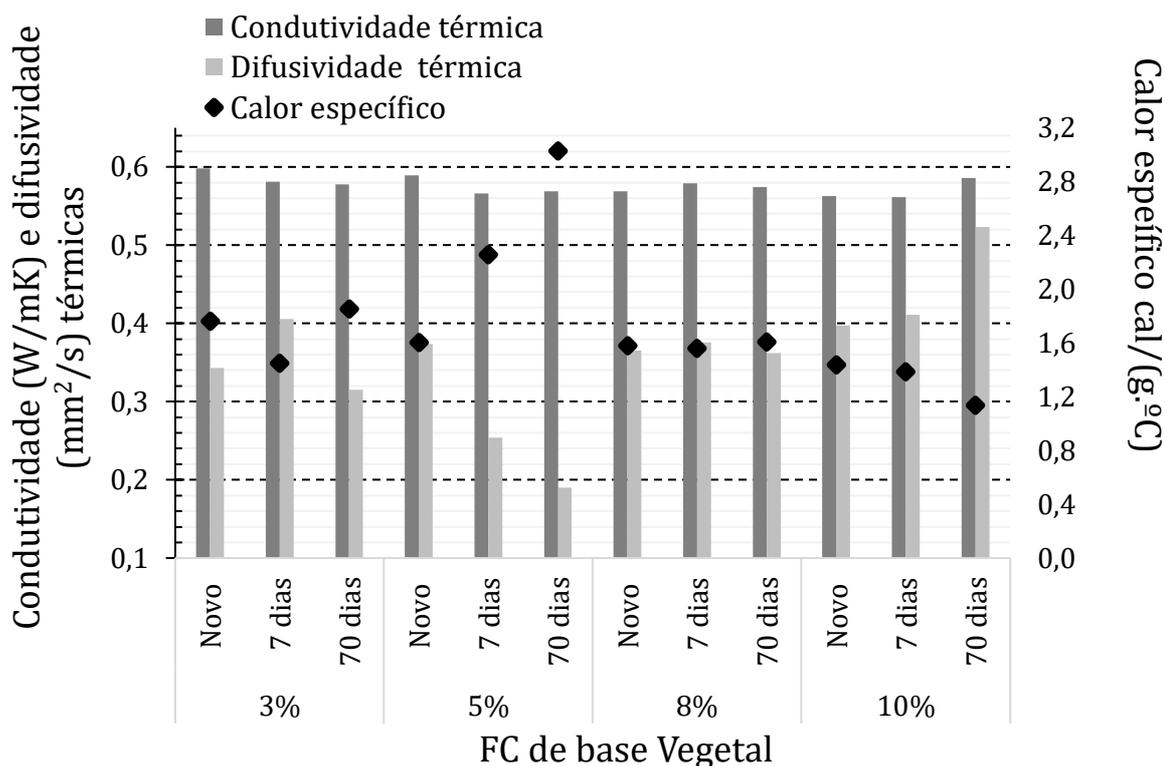


Figura 4.9a. Alterações nos parâmetros de condutividade e difusividade térmicas e do calor específico para o FC de base vegetal nas quatro concentrações e três condições testadas.

Enquanto 50,0% dos FCs de base vegetal após contaminados por sete e setenta dias, sofreram redução no coeficiente de condutividade térmica (com variação de 1,7% a 3,4%) e aumento no coeficiente de difusividade térmica (com variação de 2,7% a 48,6%), 75,0% dos fluidos de base mineral sofreram redução do coeficiente de condutividade térmica (com variação de 1,7% a 6,9%) e 62,5% deles sofreram redução do coeficiente de difusividade térmica (com variação de 2,0% a 19,3%).

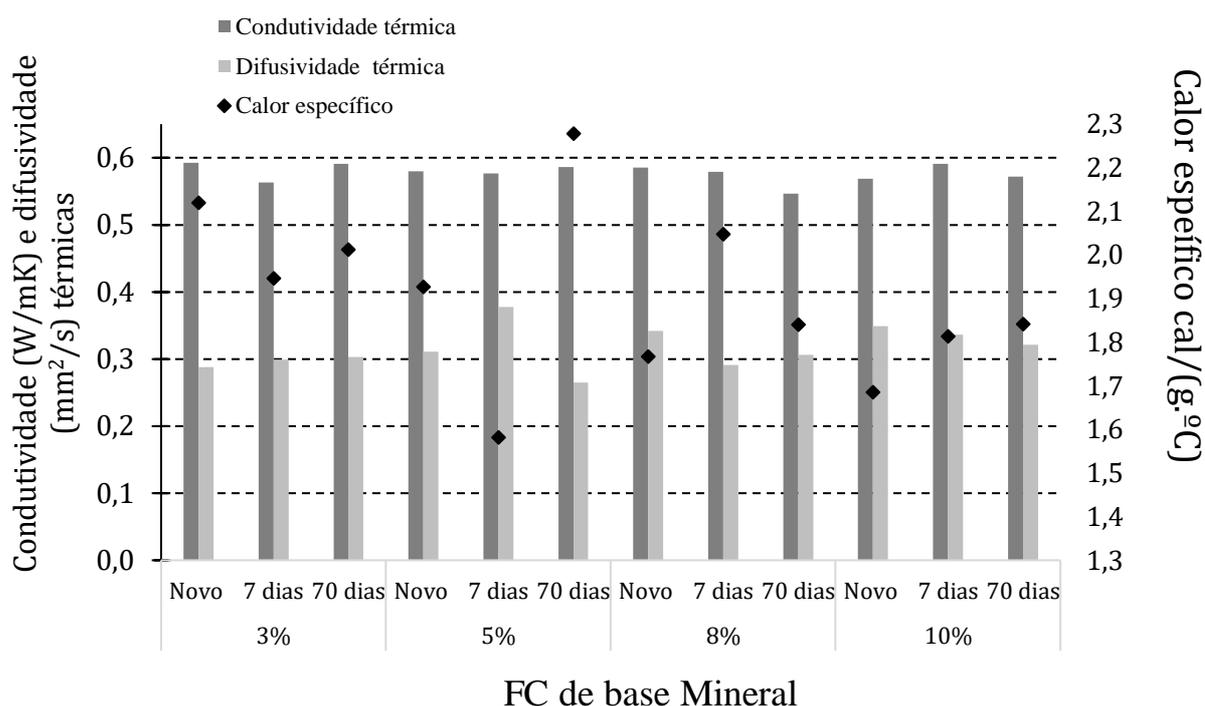


Figura 4.9.b. Alterações nos parâmetros de condutividade e difusividade térmicas e do calor específico para o FC de base vegetal nas quatro concentrações e três condições testadas.

Considerando as características de viscosidade desses dois FCs antes e após contaminação microbiológica, há que se ressaltar que as oscilações sofridas pelos fluidos resultando em aumento ou redução de sua viscosidade inicial, interferiram em seu desempenho de condutividade térmica. De acordo com Incropera (2000), uma redução da espessura do filme lubrificante reduziria a quantidade de elétrons e fónons disponíveis para o transporte do calor. A trajetória dos elétrons ou dos fónons em um filme menos espesso se torna menos eficiente do que de um filme lubrificante mais espesso e estará diretamente proporcional à densidade desse fluido (INCROPERA, 2000). Uma maior densidade do fluido de corte resultaria em uma maior condutividade térmica, e além disso, é geralmente verdade que a condutividade térmica diminui com o aumento do peso molecular.

A condutividade e difusividade térmicas e o calor específico determinados são apresentados nas Figs. 4.10 a 4.13, comparando, em cada concentração, os dois FC investigados. Nas quatro concentrações investigadas a condutividade térmica determinada para todos os fluidos sofreu apenas suaves oscilações não significantes para mais ou para menos. Entretanto, por se tratarem de grandezas inversamente proporcionais, o comportamento de redução e aumento do calor específico determinados, sempre foi acompanhado pelo aumento e redução da difusividade térmica observadas. Esses dois parâmetros também são influenciados pela massa específica dos fluidos, que também

oscilaram com aumento e redução após período de contaminação microbiológica curto (sete dias) e longo (setenta dias).

Na concentração de 3,0% foram observadas mudanças apenas para o FC de base vegetal, com incremento (17,0%) da difusividade térmica (Fig. 4.10.) acompanhada pela redução do calor específico (18,0%) após sete dias de contaminação microbiológica.

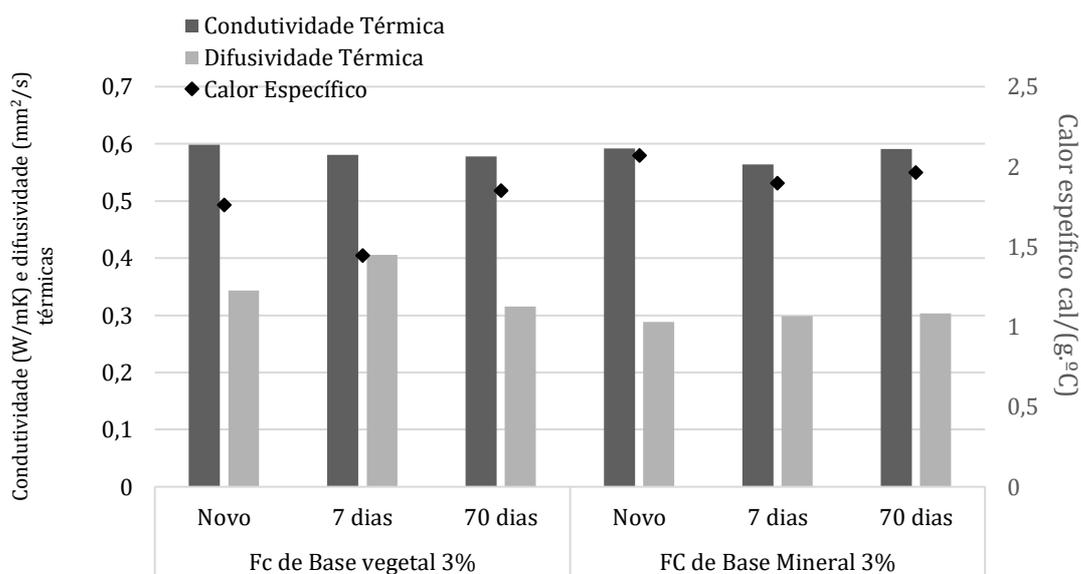


Figura 4.10. Parâmetros de condutividade e difusividade térmicas e do calor específico para os FCs de bases vegetal e mineral a 3,0%.

Entretanto, após sete e setenta dias de biodegradação, os dois FCs a 5% (Fig. 4.11), apresentaram comportamentos de aumento do calor específico com queda na difusividade térmica (base vegetal) versus redução e incremento do calor específico e incremento e redução da difusividade térmica (base mineral). Alterações suaves na condutividade térmica dos dois FCs também foram observadas. Alterações nesses dois parâmetros (difusividade térmica e calor específico) também foram observadas para o FC a 8% de base mineral (após 7 dias de contaminação microbiológica) (Fig. 4.12) e o FC a 10% de base vegetal (após setenta dias de contaminação) (Fig. 4.13).

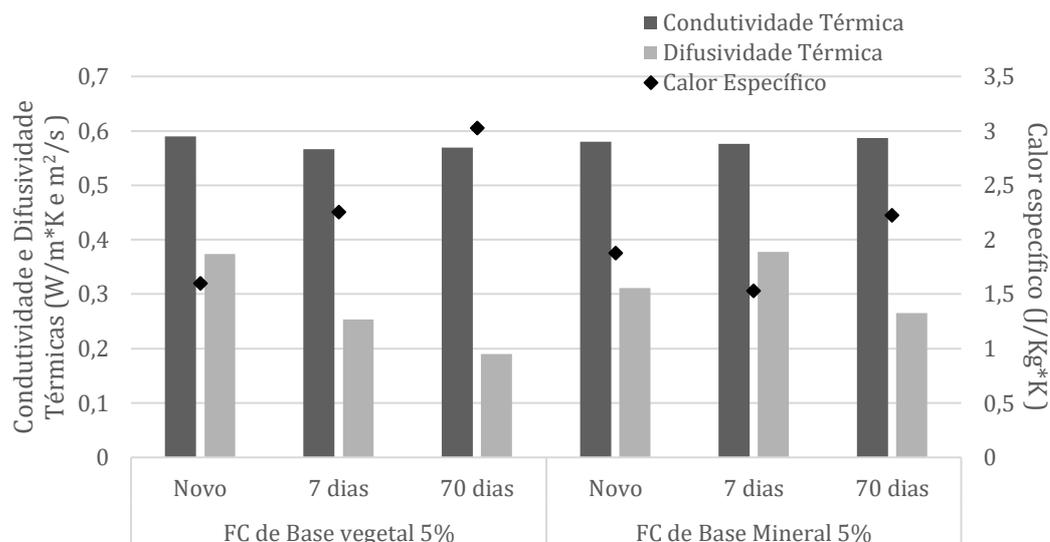


Figura 4.11. Parâmetros de condutividade e difusividade térmicas e do calor específico para os FCs de bases vegetal e mineral a 5,0%.

Na concentração de 8,0% (Fig. 4.12) o FC de base vegetal praticamente não sofreu alteração nos parâmetros de condutividade e difusividade térmicos bem como no calor específico. Contudo o FC de base mineral teve sua difusividade térmica reduzida em 14,8% após contaminação microbiológica por sete dias. Houve uma rápida recuperação dessa redução para esse FC após setenta dias de contaminação de 4,3% em relação ao FC contaminado por sete dias. Entretanto a redução em relação ao FC novo/recém diluído ficou em 10,5%.

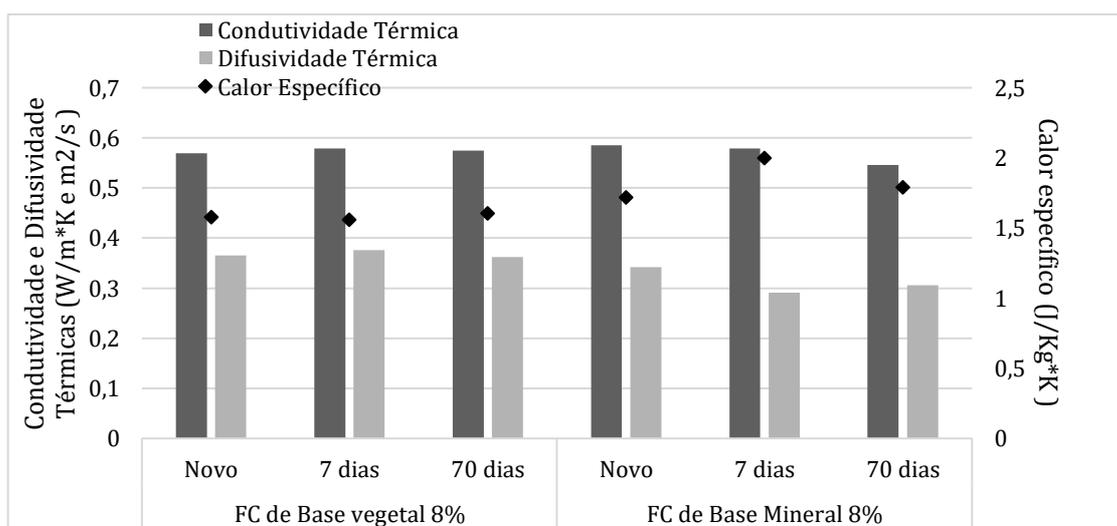


Figura 4.12. Alterações nos parâmetros de condutividade e difusividade térmicas e do calor específico para os FCs de bases vegetal e mineral a 8%.

Na concentração de 10% a oscilação dos três parâmetros foi mais intensa para o FC de base vegetal após setenta dias de contaminação microbiológica, que sofreu incremento de 31,7% em sua difusividade térmica e redução de 21,0% em seu calor específico quando comparado ao FC novo/recém diluído. As alterações (de redução) nos valores dos três parâmetros apresentados no gráfico da Fig. 4.13 para o FC de base mineral não alcançaram 6%.

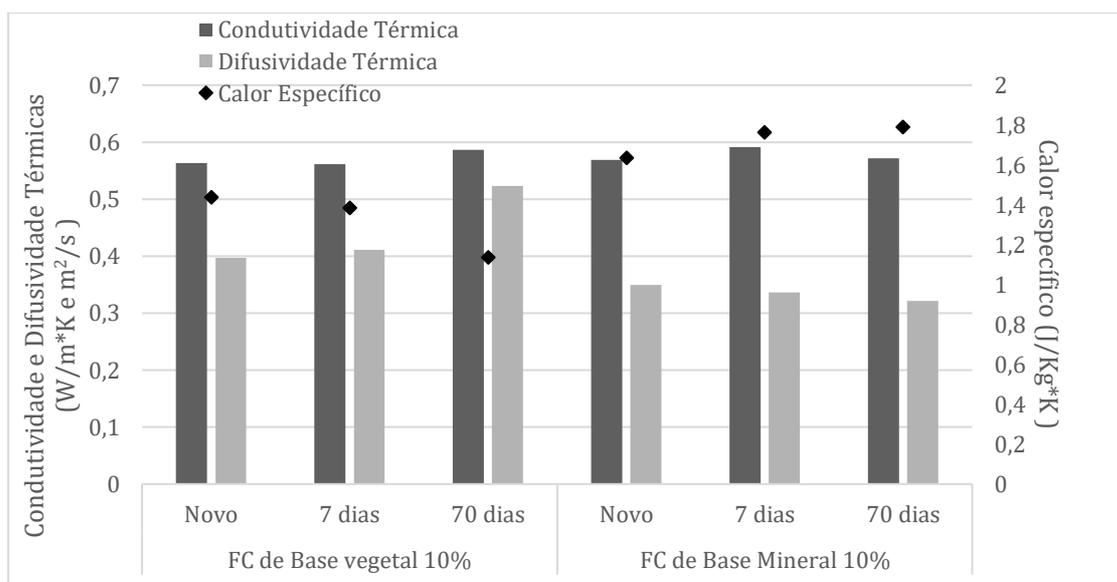


Figura 4.13. Monitoramento dos parâmetros de condutividade e difusividade térmicas e do calor específico para os dois FCs (bases vegetal e mineral) a 10,0%, nas três condições investigadas.

4.2.4. Molhabilidade dos FCs

O processo de contato entre uma superfície sólida e um líquido é referido como molhamento e a molhabilidade está relacionada à capacidade de o líquido fazer este contato, mediante a ação de forças de coesão e adesão, formando assim um ângulo de contato (MARMUR, 2009). A determinação desse ângulo de contato mostra a capacidade de molhamento do líquido. Essa molhabilidade pode ser determinada para o FC e é essencial para que suas propriedades lubri-refrigerantes sejam desempenhadas de forma eficiente (MANOJKUMAR; GHOSH, 2016).

As moléculas de um líquido expostas à superfície são puxadas para dentro pelas moléculas vizinhas criando uma pressão interna, como resultado o líquido contrai voluntariamente sua área superficial para manter a menor energia livre da superfície, sendo o formato adquirido pelas gotas e bolhas esféricas para uma geometria com a menor área de superfície para um dado volume (YUAN; LEE, 2013).

Os principais fatores que influenciam a molhabilidade são: i.) rugosidade e heterogeneidade da superfície do substrato; ii.) reações físicas ou químicas entre o líquido e o sólido; iii.) atmosfera do ensaio; iv.) tempo de contato entre o líquido e a superfície do substrato; v.) temperatura.

Uma vez que o FC sofre simultaneamente alterações biológicas e químicas após a contaminação microbiológica, mudando a estrutura da interface de contato entre as fases (sólido/líquido), principalmente através de variação na carga eletrostática, a molhabilidade do FC (fase líquida) em estreito contato com a superfície também é alterada (DEXTER, 1976 apud ORTIZ; GUIAMET; VIDELA, 1990). Tal fato também pode ser observado nos fluidos testados. Alterações no comportamento da molhabilidade foram detectados para praticamente todos os fluidos conforme os resultados apresentados na Fig. 4.14. de a) a c).

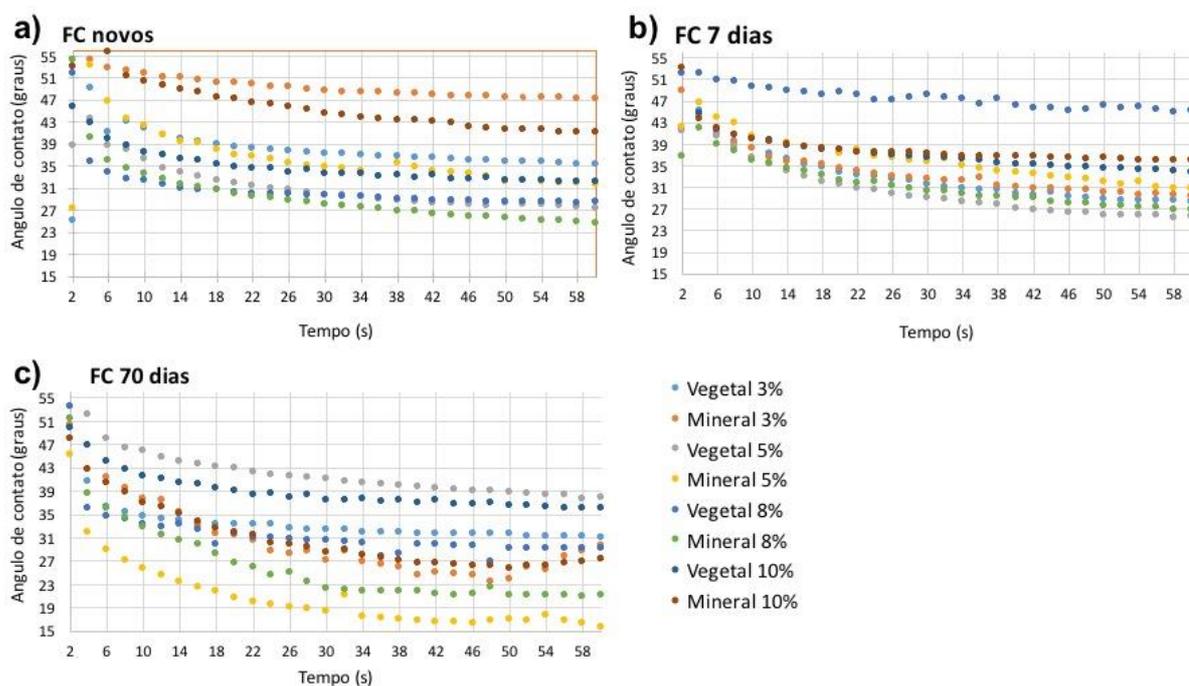


Figura 4.14. Evolução do ângulo de contato de cada fluido testado ao longo do tempo. Em a) FC novos/ recém diluídos; b) FC após sete dias de contaminação microbiológica e c) FCs após setenta dias de contaminação microbiológica.

O agrupamento dos dois FC de acordo com a condição testada (novos, após sete dias e setenta dias de contaminação microbiológica) evidencia características de molhabilidade inerentes aos fluidos em cada concentração quando novos, e a alteração maior ou menor dessa características após a contaminação (Fig. 4.14).

A determinação desses ângulos fornece detalhes sobre a capacidade de umedecimento/espalhamento desses fluidos, o que é uma importante característica que influencia positivamente em suas propriedades lubri-refrigerantes e anticorrosiva. Apesar de o molhamento inicial (nos 2 primeiros segundos) ser o que melhor define a característica da gota ao atingir a interface de corte, uma tendência de estabilização no ângulo de contato da gota foi observada para todos os FCs testados após decorridos aproximadamente 20 segundos do ensaio. Esses resultados são apresentados na Fig. 4.15.

Uma redução no ângulo de contato da gota com a superfície do substrato (corpo de prova), ou seja, entre a fase líquida e a fase sólida, representa melhora na capacidade de molhamento da fase líquida. Apesar dos diferentes valores nos ângulos de contato obtidos para os dois FCs nas imagens da Fig. 4.15. a), b), c) e d), o comportamento das curvas que correspondem ao espalhamento da gota na superfície do substrato foi semelhante para as quatro concentrações e três condições testadas, com algumas poucas exceções.

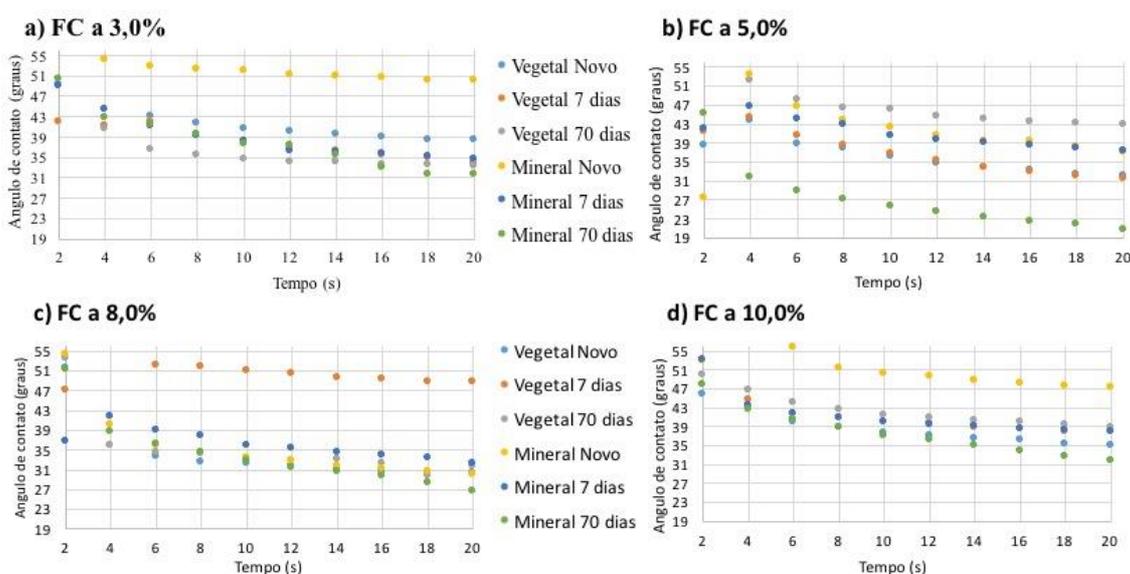


Figura 4.15. Estabilização da gota séssil na superfície do aço inoxidável nos primeiros 20 segundos de ensaio. As quatro concentrações de FC utilizadas nos ensaios são mostradas nas letras a) 3,0%, b) 5,0%, c) 8,0% e d) 10,0%.

Os instantes finais dos ensaios mostram pouca variação do ângulo de contato, indicando que já houve a acomodação da gota ou estabilização da pressão interna e das forças de coesão e adesão. Os valores do ângulo de contato dos instantes finais podem também serem usados para indicar a capacidade de molhabilidade desses fluidos, sendo que o menor valor indica maior molhabilidade. O menor ângulo de contato obtido, considerando-se a média de ângulos determinados nos 30 segundos finais do ensaio de molhabilidade, para os dois FCs base, nas quatro concentrações testadas, é apresentado na Fig. 4.16. Observa-se uma

redução mais acentuada do ângulo de contato para o FC de base mineral em comparação ao FC de base vegetal.

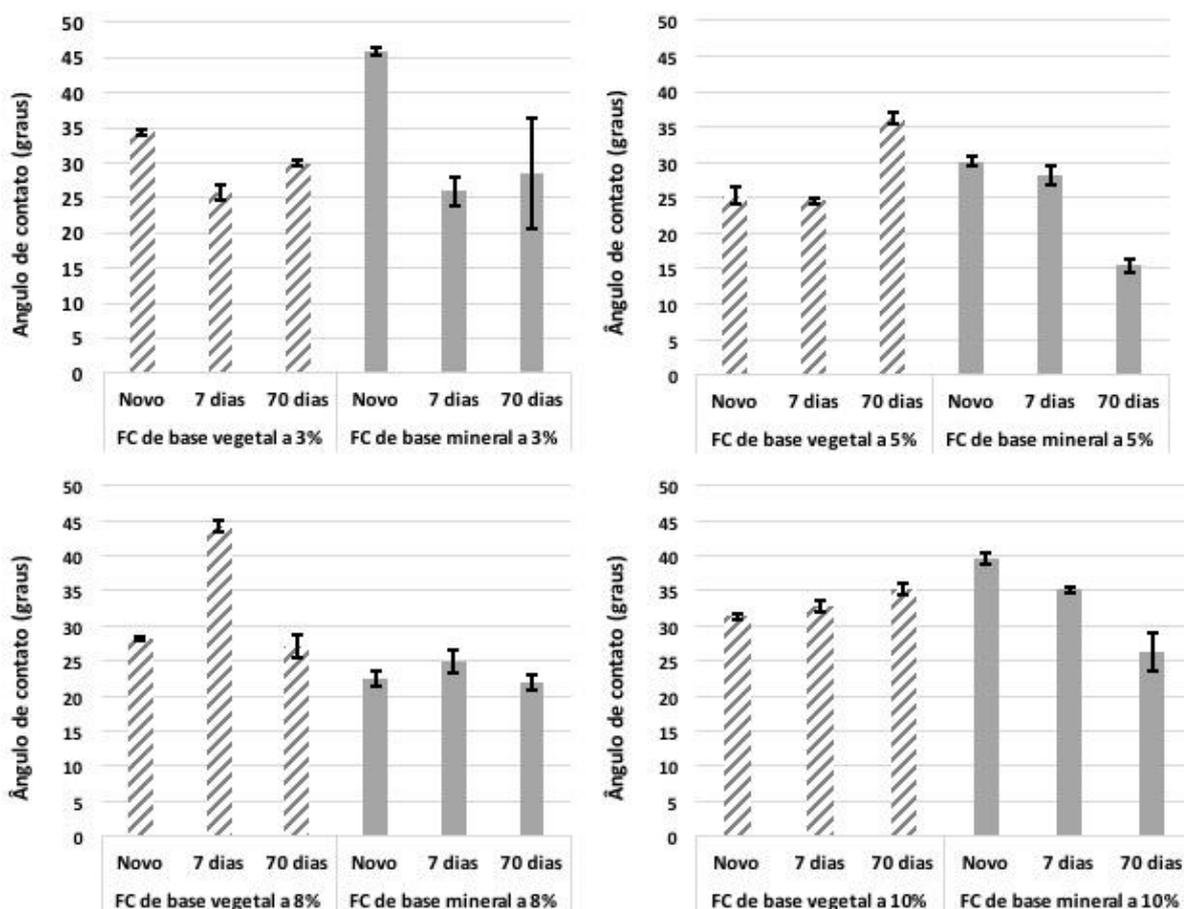


Figura 4.16. Ângulo de contato médio avaliado considerando-se os 30 segundos finais do ensaio de molhabilidade, durante segundo período de estabilização da gota séssil na superfície do aço inoxidável.

Na concentração de 3,0%, houve redução do ângulo de contato para os dois FCs base, sendo a melhora na molhabilidade (redução do ângulo de contato) mais acentuada para o de base mineral após sete dias de contaminação microbiológica (43,5%) comparado ao fluido novo. Essa redução também ocorreu para o FC de base vegetal em menor intensidade (25,3%). A molhabilidade dos fluidos também foi melhorada na condição em que ambos foram contaminados por setenta dias porem em menor redução do angulo de contato (13,0% vegetal e 37,8% mineral).

Na concentração de 5% o FC de base vegetal apresentou redução (3,0%) para a condição de sete dias de contaminação microbiológica e aumento do ângulo de contato (42,8%) após setenta dias de contaminação microbiológica. Nessa concentração o FC de base

mineral mostrou comportamento oposto, de redução no ângulo de contato (aumento da molhabilidade) após sete dias (6,6%) e setenta dias (48,6%) de contaminação microbiológica.

Na concentração de 8% o comportamento dos dois FCs foi semelhante quanto ao aumento do ângulo de contato após sete dias (57,5% para o vegetal e 10,8% para o mineral) e de redução após setenta dias (3,4% vegetal e 2,4% mineral) de contaminação microbiológica. Contudo, o FC de base vegetal em escala superior.

Os dois FCs a 10% tiveram desempenhos de molhabilidade opostos assim como na concentração de 5%, sendo que o de base vegetal apresentou aumento no ângulo de contato em 4,7% e 30,3% após contaminação microbiológica de sete e setenta dias respectivamente, e o FC de base mineral apresentou redução de 11,3% e 25,0% do ângulo de contato para essas mesmas condições.

Os ângulos de contato medidos nos dois FCs, sendo o de base vegetal (a, b, c) e o de base mineral (d, e, f) nas condições de novo (a, d), contaminado por 7 dias (b, e) e contaminado por setenta dias (c, f) são apresentados nas quatro concentrações testadas (3,0%, 5,0%, 8,0% e 10,0%) através das Figs. de 4.17. a 4.20, respectivamente. A molhabilidade dinâmica dos FCs é mostrada através da primeira imagem da gota séssil assim que adere ao substrato (1s) e se estabiliza aos 2 segundos. As evoluções das gotas quanto ao espalhamento são mostradas aos 15s. e 45s., quando as tensões entre as três fases (líquido/substrato e atmosfera) em contato tendem a se equilibrar. As imagens dos dois FC aos 45 segundos mostram a gotícula já em uma tendência ao equilíbrio estático.

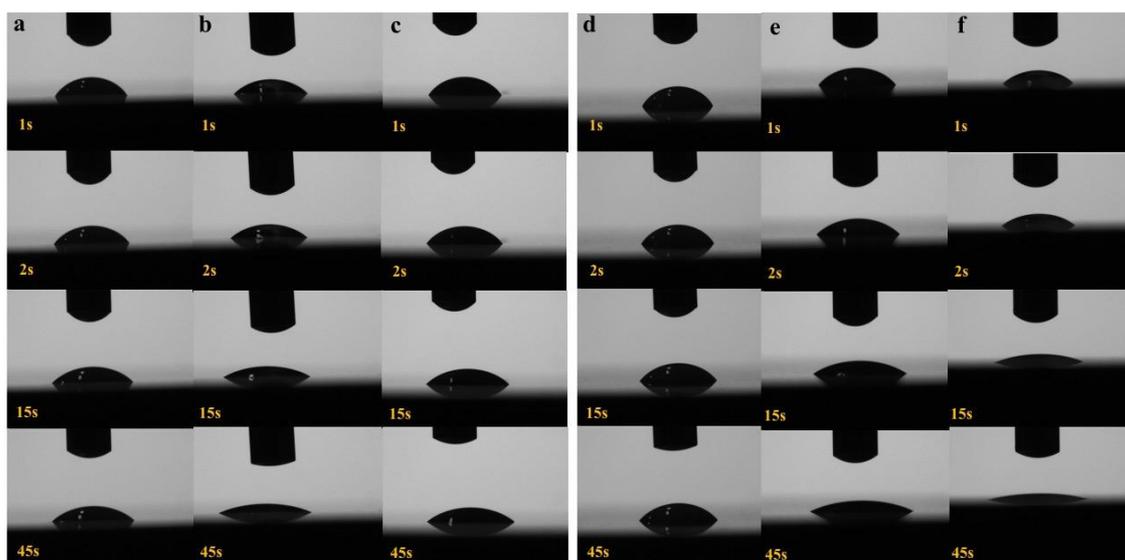


Figura 4.17. Evolução do ângulo de contato dos FCs na concentração de 3,0%, nas três condições investigadas, FC de base vegetal (a, b, c) e mineral (d, e, f) nas condições de novo (a, d), biodegradado por 7 dias (b, e) e biodegradado por setenta dias (c, f).

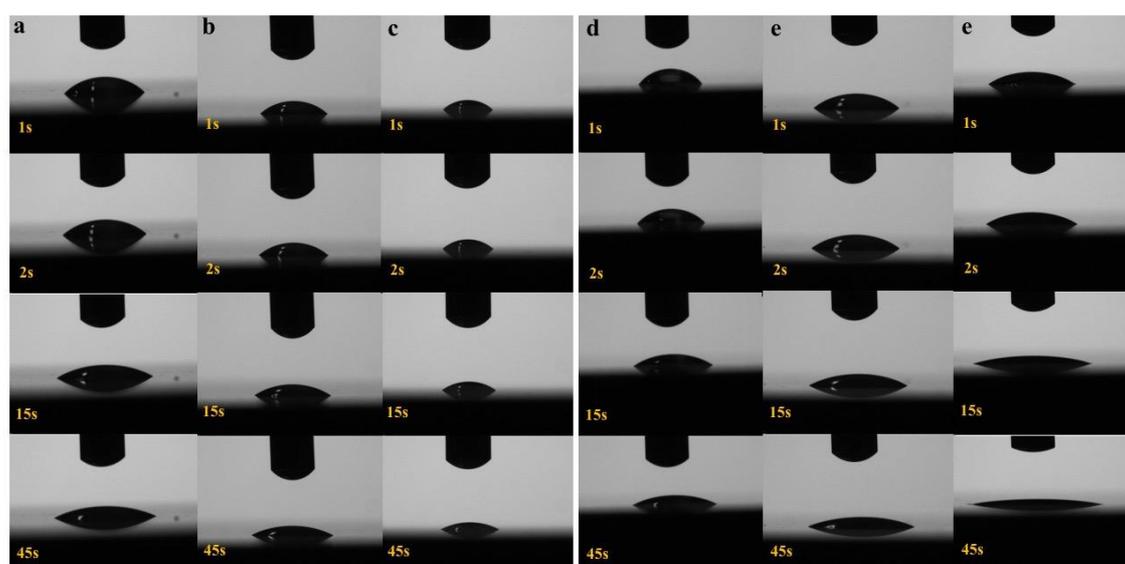


Figura 4.18. Evolução do ângulo de contato dos FCs na concentração de 5,0%, nas três condições investigadas, FC de base vegetal (a, b, c) e mineral (d, e, f) nas condições de novo (a, d), contaminado por 7 dias (b, e) e contaminado por setenta dias (c, f).

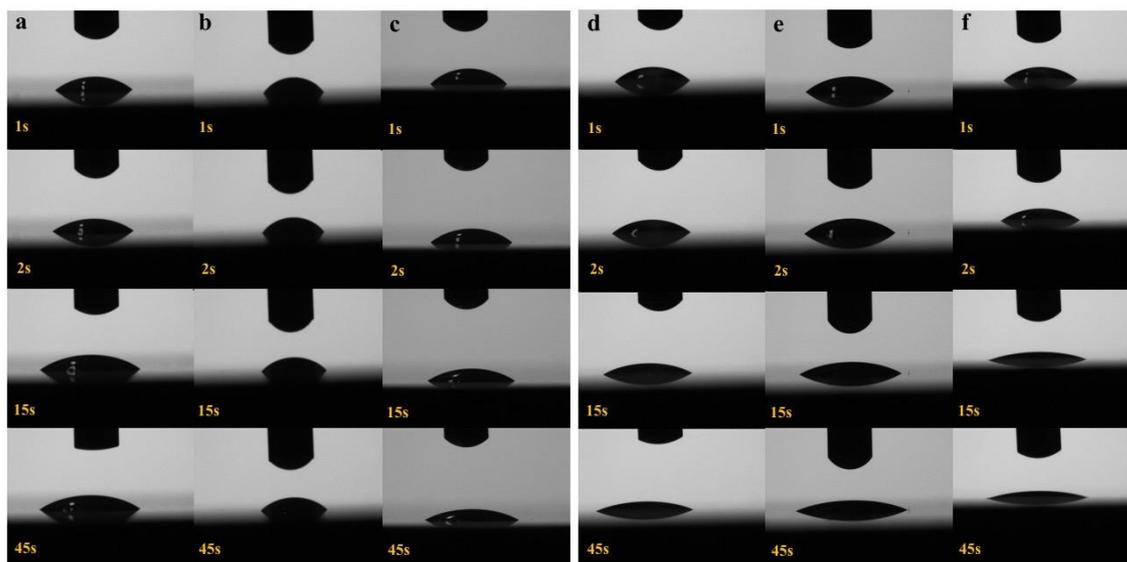


Figura 4.19. Evolução do ângulo de contato dos FCs na concentração de 8,0%, nas três condições investigadas, FC de base vegetal (a, b, c) e mineral (d, e, f) nas condições de novo (a, d), contaminado por 7 dias (b, e) e contaminado por setenta dias (c, f).

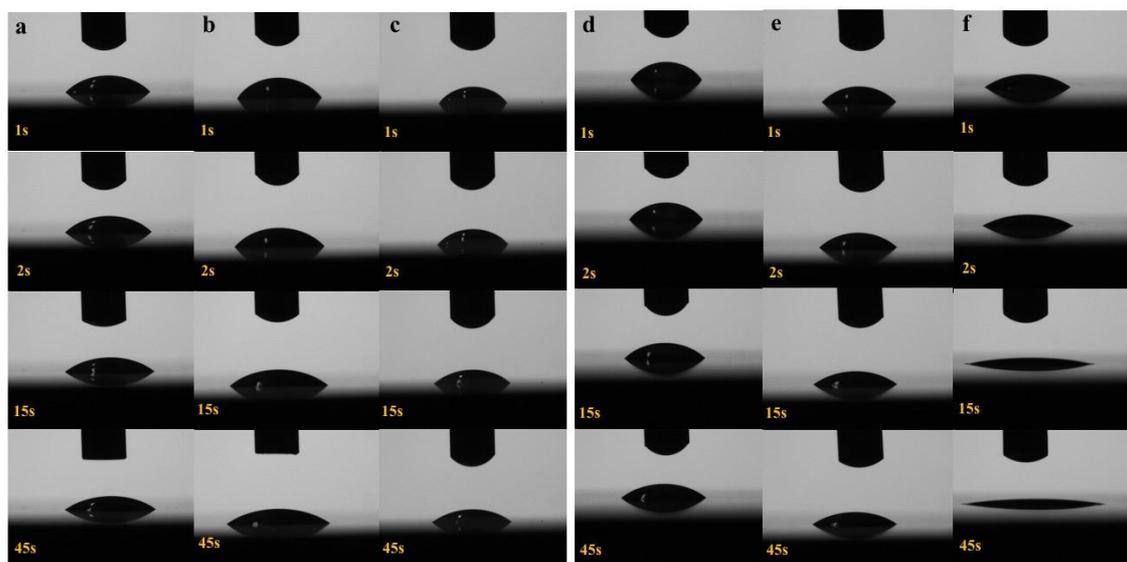


Figura 4.21. Evolução do ângulo de contato dos FCs na concentração de 10%, nas três condições investigadas, FC de base vegetal (a, b, c) e mineral (d, e, f) nas condições de novo (a, d), contaminado por 7 dias (b, e) e contaminado por setenta dias (c, f).

A molhabilidade dos FCs está estreitamente relacionada ao seu desempenho e essa capacidade de umedecimento em superfícies de metal ocorre pela análise da energia livre de superfície e a tensão superficial através da medição do ângulo de contato θ (BENITO et al., 2010). A energia livre de superfície específica e a tensão superficial entre as fases em contato

são usadas para explicar processos de molhamento na teoria da adesão termodinâmica (BENITO et al., 2010; BRINKSMEIER et al., 2015).

Boa molhabilidade de uma superfície é um pré-requisito para garantir a boa união adesiva, e esforço, portanto, considerável tem sido dispendido no desenvolvimento de testes simples para avaliar a superfície de energia / tensão antes da colagem (KINLOCH, 1987; BROUGHTON; LODEIRO, 2002; ASTM F22-02, 2007).

De um modo geral, a diminuição do ângulo de contato (entre a fase líquida e sólida), demonstra melhoramento da capacidade molhante do fluido. Neste caso, a adesão de substâncias químicas presentes no líquido em contato com a superfície sólida é facilitada (GLEICH, 2004), o que leva a uma melhor lubrificação no trabalho de metais com base em interações entre aditivos e a superfície metálica (CAMBIELLA et al., 2007; BRINKSMEIER et al., 2015).

De acordo com Byers (2006), a questão da polaridade das moléculas pode aumentar a adsorção do FC na superfície da peça. Contudo, a ação desse mecanismo mediante a contaminação microbiana precisa de maiores estudos. Considerando-se o comportamento da gota séssil nos dois primeiros segundos de adesão ao substrato, os dois FCs investigados apresentaram melhora ou piora de sua capacidade de molhamento após a contaminação microbiológica por sete e setenta dias (Fig. 4.21.). Em 50% das condições testadas houve melhora da capacidade de umedecimento do FC (base vegetal a 3,0%, base mineral a 3,0%, 5,0% e 10,0%).

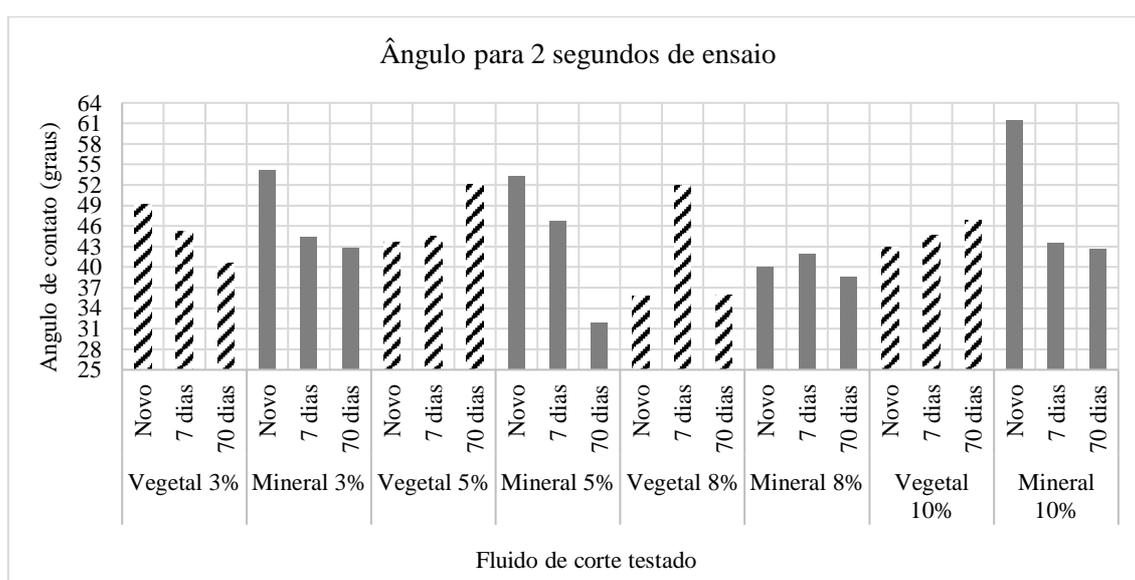


Figura 4.21. Ângulo de contato determinado após dois segundos de ensaio para os dois FCs, quatro concentrações e três condições (novo, 7 dias e 70 dias) de contaminação investigados.

Os resultados obtidos nos ensaios de viscosidade (dinâmica e cinemática) determinação de massa específica , condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico e ângulo de contato são mostrados na tabela 4.2.

Tabela 4.2. Consolidação dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização física dos FCs investigados

	Concentração	Condição	Viscosidade Dinâmica	Viscosidade Cinemática	massa específica	Condutividade e Térmica	Difusividade térmica	calor específico	ângulo de contato
FC BASE VEGETAL	3,0%	Novo	4,15%	0,841	0,990	0,598	0,343	1,762	34,44
		7 dias	-4,0%	-4,0%	0,1%	-2,9%	18,3%	-17,9%	-25,3%
	5,0%	70 dias	7,5%	7,5%	0,0%	-3,4%	-8,1%	5,1%	-13,1%
		Novo	0,886	0,899	0,986	0,589	0,373	1,601	25,35
	8,0%	7 dias	0,3%	0,0%	0,3%	-4,0%	-32,0%	40,8%	-3,1%
		70 dias	6,4%	6,1%	0,3%	-3,5%	-49,1%	89,0%	42,9%
	10,0%	Novo	1,043	1,057	0,987	0,569	0,365	1,577	28,08
		7 dias	-8,1%	-8,2%	0,1%	1,8%	2,9%	-1,2%	57,2%
		70 dias	-14,9%	-14,8%	0,2%	1,0%	-1,0%	1,8%	-3,5%
		Novo	1,185	1,202	0,986	0,563	0,397	1,437	31,36
	7 dias	-1,8%	-1,8%	0,1%	-0,2%	3,4%	-3,6%	4,7%	
	70 dias	-2,2%	-2,2%	0,0%	4,2%	31,8%	-21,0%	7,3%	
FC BASE MINERAL	3,0%	Novo	0,748	0,753	0,994	0,592	0,288	2,070	45,92
		7 dias	10,4%	10,0%	0,0%	-4,9%	3,8%	-8,4%	-43,6%
	5,0%	70 dias	62,2%	62,2%	0,0%	-0,2%	5,3%	-5,2%	-37,8%
		Novo	0,802	0,806	0,994	0,580	0,311	1,877	30,16
	8,0%	7 dias	19,0%	18,7%	0,3%	-0,6%	21,4%	-18,4%	-6,6%
		70 dias	71,5%	71,7%	0,0%	1,1%	-14,8%	18,7%	-48,6%
	10,0%	Novo	0,896	0,900	0,996	0,585	0,342	1,717	22,55
		7 dias	32,5%	32,7%	-0,1%	-1,0%	-14,8%	16,4%	11,0%
		70 dias	68,2%	68,1%	0,0%	-6,6%	-10,5%	4,3%	-2,7%
		Novo	0,919	0,922	0,996	0,569	0,349	1,636	39,62
	7 dias	3,1%	3,0%	0,1%	3,9%	-3,7%	7,8%	-11,3%	
	70 dias	79,4%	80,2%	-0,1%	0,6%	-8,0%	9,5%	-33,6%	

4.2.5. Ensaio de Corrosão

A corrosão influenciada por microrganismos (MIC) é a deterioração do metal por um processo de corrosão que pode ocorrer de forma direta ou indireta como resultado da atividade metabólica dos microrganismos (VANAEI; ESLAMI; EGBEWANDE, 2017). A MIC pode ocorrer de dois tipos: anaeróbica ou aerobiamente. As bactérias redutoras de sulfato são usualmente responsáveis pela forma ruíosa de MIC anaeróbico (XU et al., 2013).

As reações de corrosão também podem ser induzidas ou acentuadas pela atividade microbiana (FORD; MITCHELL, 1990). Em fluidos contaminados são observados, processos

de corrosão juntamente com a perda de viscosidade do FC e redução da resistência térmica, desencadeados pela liberação de subprodutos ácidos ou até mesmo pela geração de produtos sulfurados pelos microrganismos. Todos esses processos são ainda somados aos riscos que representam para os trabalhadores expostos (BURGESS, 1995; NIOSH, 1998; GILBERT; VEILLETTE; DUCHAINE, 2010). Os FCs à base de água, principalmente as emulsões são os mais propícios ao crescimento microbiano, dada a sua elevada percentagem de água disponível (BURGESS, 1995).

4.2.5.1. Ensaio utilizando as Normas ASTM D4627 e DIN 51360-2

Nesse estudo, os dois fluidos investigados (uma emulsão de base vegetal e um semissintético de base mineral) na concentração de 8,0% foram submetidos a contaminação microbiológica por sete e setenta dias e, juntamente com os fluidos na condição novos, tiveram suas propriedades anticorrosivas analisadas através de duas normas: ASTM D4627 (2012) e DIN 51360-2 (2013), ambas com modificações. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.3., 4.4., 4.5. e na Fig. 4.22. O uso da norma DIN 51360-2 é consagrado como teste rápido para detecção de perda da propriedade anticorrosiva de fluidos que possuam esse aditivo em sua fórmula. Contudo, diante da existência de uma outra norma também muito utilizada para esse fim, foi determinado nesse estudo qual delas seria mais eficiente em determinar com maior precisão a perda da propriedade anticorrosiva dos fluidos

Observa-se que em ambas as normas não foram detectados sinais de corrosão para os FCs novos e para o de base vegetal após sete dias de contaminação. Para a condição em que os FCs foram contaminados por setenta dias o de base vegetal foi classificado com leve corrosão (grau 2) tanto na norma DIN 51360-2 quanto na ASTM D4627.

Os graus 2 e 4 foram observados no FC de base mineral contaminado por setenta dias nas normas DIN 51360-2 e ASTM D4627, respectivamente. As duas normas mostraram resultados relevantes quanto a avaliação da propriedade anticorrosiva dos dois fluidos. No entanto, detalhes da técnica realizada para a norma DIN 51360-2, como menor tempo de exposição do papel filtro ao FC (4 horas), menor quantidade de cavaco (2g) e de fluido em comparação com a norma ASTM (24 horas de exposição ao fluido utilizando 4g de cavaco) são apontados como possíveis responsáveis pelos diferentes resultados e preferencia na escolha da norma quando da realização do ensaio. Apesar da atribuição de menor índice de corrosão desse fluido na norma DIN 51360-2, o menor manchamento do papel resultou em melhor leitura da área comprometida pela corrosão.

Os resultados obtidos utilizando a norma DIN 51360-2 determinaram pior manutenção das propriedades anticorrosivas para o FC de base vegetal após setenta dias de contaminação microbiológica que o de base mineral, contudo o grau de corrosão obtido através da norma ASTM D4627 foi maior pois proporcionou maior manchamento do papel filtro e em maior intensidade quando comparado ao manchamento obtido utilizando a norma DIN 51360-2. Nesse estudo as normas foram complementares para avaliação da propriedade anticorrosiva dos dois fluidos.

Tabela 4.3. Percentual de área do papel filtro comprometida pela corrosão utilizando os dois FCs nas três condições investigadas.

Norma	Amostra	FC de base vegetal			FC de base mineral		
		Novo	7 dias*	70 dias**	Novo	7 dias	70 dias
DIN 51360-2	1	-	-	1% a 5%	-	< 1%	< 1%
	2	-	-	1% a 5%	-	< 1%	< 1%
	3	-	-	1% a 5%	-	< 1%	< 1%
	Média	-	-	1% a 5%	-	< 1%	< 1%
ASTM D4627	1	-	-	< 1%	-	3%	>5%
	2	-	-	< 1%	-	4%	>5%
	3	-	-	< 1%	-	5%	>5%
	Média	-	-	< 1%	-	4%	>5%

*FC contaminado durante o período de sete dias, **FC contaminado durante o período de 70 dias

Tabela 4.4. Classificação do grau de corrosão obtido utilizando os dois FCs investigados de acordo com a norma DIN 51360-2.

	Fluido de corte base (8% vv ⁻¹) e condição de teste	Carga microbiana inoculada UFC/mL	Carga microbiana de viáveis UFC/mL	Grau de corrosão determinado	Significado
Vegetal	Novo	-	0,0	0	Ausência
	7 dias	$6,0 \times 10^{22}$	$1,0 \times 10^5$	0	Ausência
	70 dias	$5,8 \times 10^{23}$	$3,0 \times 10^3$	3	Média corrosão (1% a 5% superfície)
Mineral	Novo	-	0,0	0	Ausência
	7 dias	$6,0 \times 10^{22}$	$1,8 \times 10^5$	2	Leve corrosão (até 1% superfície)
	70 dias	$5,8 \times 10^{23}$	$1,3 \times 10^4$	2	Leve corrosão (até 1% superfície)

UFC/mL, Unidade Formadora de Colônia por mililitro de fluido de corte.

Nas Tabelas 4.5. e 4.6. são mostradas as cargas microbianas inoculadas nos dois FC ao fim de cada período proposto (sete e setenta dias) bem como a quantidade de microrganismos viáveis em cada FC. A Figura 4.22. mostra em destaque pelas setas amarelas as regiões de maior manchamento do papel filtro.

Tabela 4.5. Classificação do grau de corrosão determinado nos dois FCs testados de acordo com a norma ASTM D4627.

Fluido de corte base (8% vv ⁻¹) e condição de teste		Carga microbiana inoculada UFC/mL	Carga microbiana de viáveis UFC/mL	Grau de corrosão determinado	Significado
Vegetal	Novo	-	-	0	Ausência
	7 dias	$6,0 \times 10^{22}$	$1,0 \times 10^5$	0	Ausência
	70 dias	$5,8 \times 10^{23}$	$3,0 \times 10^3$	2	Leve corrosão (até 1% superfície)
Mineral	Novo	-	-	0	Ausência
	7 dias	$6,0 \times 10^{22}$	$1,8 \times 10^5$	3	Média corrosão (entre 1% e 5% superfície)
	70 dias	$5,8 \times 10^{23}$	$1,3 \times 10^4$	4	Forte corrosão (mais 5% superfície)

UFC/mL, Unidade Formadora de Colônia por mililitro de fluido de corte.

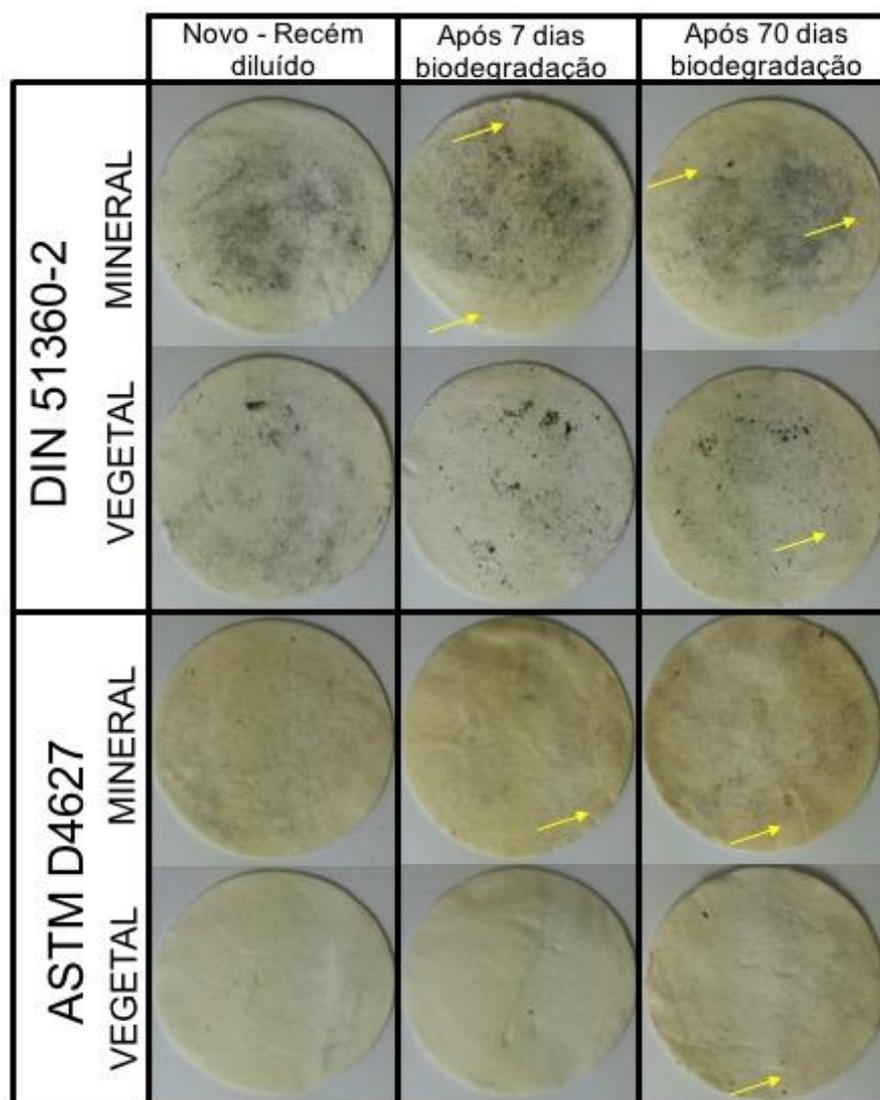


Figura 4. 22. Manchamento dos papeis filtro utilizados de acordo com o tempo de contaminação microbiológica para cada fluido de corte base.

4.2.5.2 – Outros ensaios de corrosão - Teste de corrosão em poços

Trata-se de ensaio de corrosão em sistema estático, em metodologia adaptada de Merçon e colaboradores (2011). Os resultados de desempenho anticorrosivo dos dois FCs (bases mineral e vegetal) nas três condições investigadas, na concentração de 8,0% são apresentados na Tab. 4.6. Para determinar o grau de comprometimento do fluido em sua propriedade protetora anticorrosiva foi estabelecido um ranqueamento do grau de corrosão observado, baseado na norma DIN 51360-2 (2013) anteriormente descrita (Tab. 3.4).

Os FCs novos, não diluídos em água, de base vegetal e mineral foram utilizados como controles negativos para a corrosão devido a propriedade anticorrosiva desses fluidos manter-se preservada (durante o prazo de validade do fluido). A água destilada estéril e o ar atmosférico foram utilizados como controles positivos de corrosão. Em pré-testes a ação corrosiva destes dois ambientes foi imediata quando em contato com a superfície do material logo após a última etapa de polimento.

Tabela 4.6. Resultados do ensaio de corrosão realizado em poços de superfície metálica.

Fluido de corte base, Condição de contaminação e controles	Carga microbiana inoculada (UFC/mL)*	Grau de corrosão determinado	Significado	
Vegetal	Novo*	-	0	Sem alteração
	7 dias*	$6,0 \times 10^{22}$	1	Sem alteração
	70 dias*	$5,8 \times 10^{23}$	2	Leve corrosão (< 1% superfície)
	Não diluído	-	0	Sem alteração
	Água destilada estéril	-	4	Forte corrosão (> 5% superfície)
Mineral	Atmosfera ^b	-**	4	Forte corrosão (> 5% superfície)
	Novo	-	0	Sem alteração
	7 dias	$6,0 \times 10^{22}$	1	Média corrosão (entre 1% e 5% superfície)
	70 dias	$5,8 \times 10^{23}$	4	Forte corrosão (> 5% superfície)
	Não diluído	-	0	Sem alteração

*FC a 8%, **Não medido

^aControle negativo, ^bControle positivo

Os resultados desse ensaio foram semelhantes aos resultados obtidos utilizando as normas DIN 51360-2 e ASTM D4627, com o adicional de que neste ensaio a corrosão visualizada diretamente na superfície metálica. Estes resultados ratificam os anteriores, mostrando o efeito nocivo da contaminação microbiana em ambos os fluidos (base vegetal e mineral), principalmente após setenta dias.

4.2.5.3 – Outros ensaios de corrosão - Ensaio em superfície imersa em FC

Os dois FCs na concentração de 8,0% foram também submetidos ao teste de corrosão no qual as superfícies de corpos de prova de aço ABNT 1020 ficaram mergulhadas nas três condições de estudo (FCs: novo, após sete e setenta dias de contaminação microbiológica) por sete dias, totalizando seis ensaios. Os resultados são apresentados na Fig. 4.23.

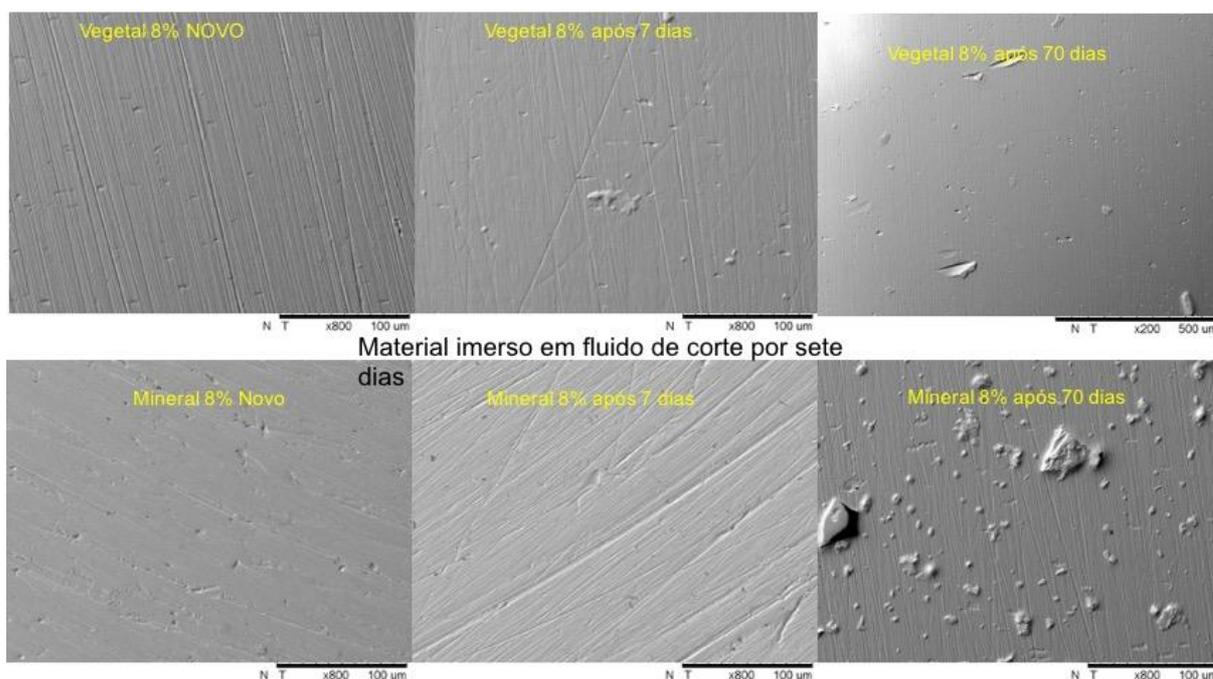


Figura 4.23. Evolução do grau de corrosão em superfície metálica de acordo com as condições testadas para os dois FCs investigados na concentração de 8,0%.

Não foram observados sinais de corrosão para os fluidos novos e o FC de base vegetal após sete e setenta dias de contaminação microbiológica. O FC de base mineral após setenta dias de contaminação microbiológica mostrou sinais de corrosão após período de imersão comprometendo entre 1% e 5% da superfície, confirmando demais resultados de ensaios de corrosão anteriormente descritos.

4.2.5.3 – Outros ensaios de corrosão - Tempo de evaporação

Desde que o contato da superfície metálica com o ar atmosférico pode ser o principal fator desencadeador da formação de óxidos, a capacidade de permanência do fluido de corte nesta superfície também funciona como uma barreira a formação desses óxidos devido as suas propriedades e aditivos específicos para esse fim. Dessa forma o tempo de secagem da gota de fluido de corte foi monitorada em temperatura ambiente e os resultados são apresentados na Fig. 4.24.

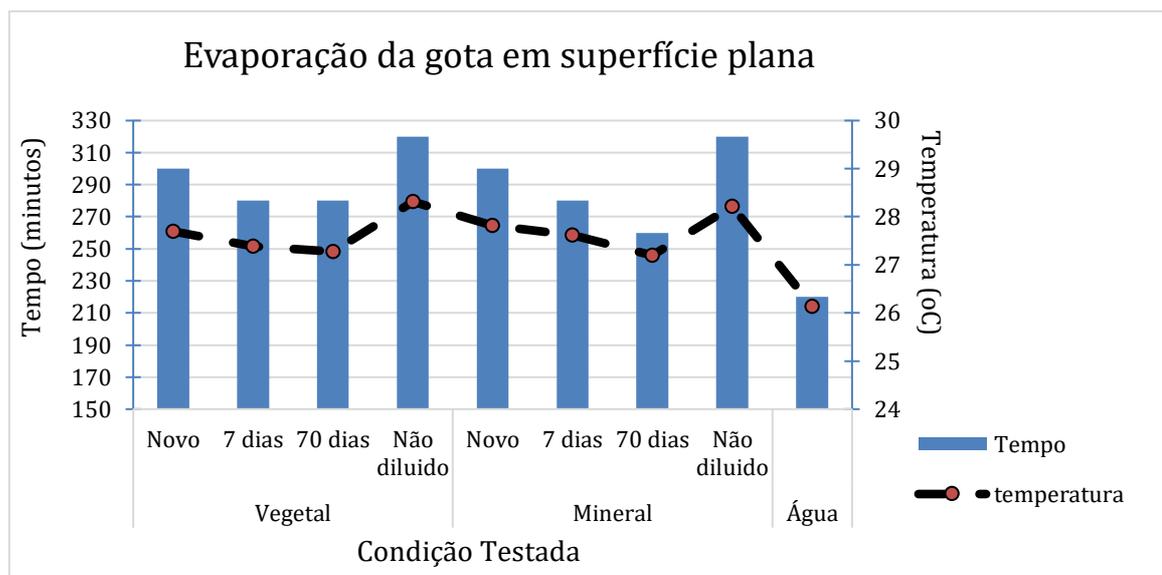


Figura 4. 24. Tempo de evaporação da gota (10 μ L) em superfície metálica plana deixada em temperatura ambiente.

Os fluidos novos tiveram praticamente o mesmo tempo de evaporação. Contudo, a água evaporou em um tempo 26,6% menor. Os fluidos contaminados por sete dias tiveram os mesmos tempos de evaporação, com redução de 6,6% em relação aos fluidos novos. Já o fluido de base mineral após setenta dias de contaminação microbiológica foi o que apresentou a maior redução do tempo de secagem (13,3%). Entre os fluidos testados, os óleos não diluídos foram que apresentaram maiores tempos até a secagem completa, como era de se esperar, pela ausência da água.

Adicionalmente à redução no tempo de secagem do fluido, as superfícies metálicas mergulhadas em meio contaminado por bactérias e fungos são submetidas a uma sequência de alterações biológicas e inorgânicas, imediatamente após esse contato, que alteram a estrutura da interface metal/solução, e a isso é associado o comportamento à corrosão. A primeira das alterações biológicas é a formação de uma película fina que altera principalmente a carga eletrostática e molhabilidade da superfície do metal (DEXTER, 1976 apud ORTIZ; GUIAMET; VIDELA, 1990), o que facilita a adesão bacteriana. A segunda fase, causada pela colonização microbiana, resulta no desenvolvimento de um biofilme formado por células bacterianas e as suas substâncias poliméricas extracelulares (EPS). A estrutura do biofilme consiste em grande parte de água, e cria uma barreira de difusão para a troca de elementos entre o metal e a solução (CHARACKLIS, 1981 apud ORTIZ; GUIAMET; VIDELA, 1990).

4.2.6. Desempenho Lubrificante - Desgaste por deslizamento - “Reciprocating”

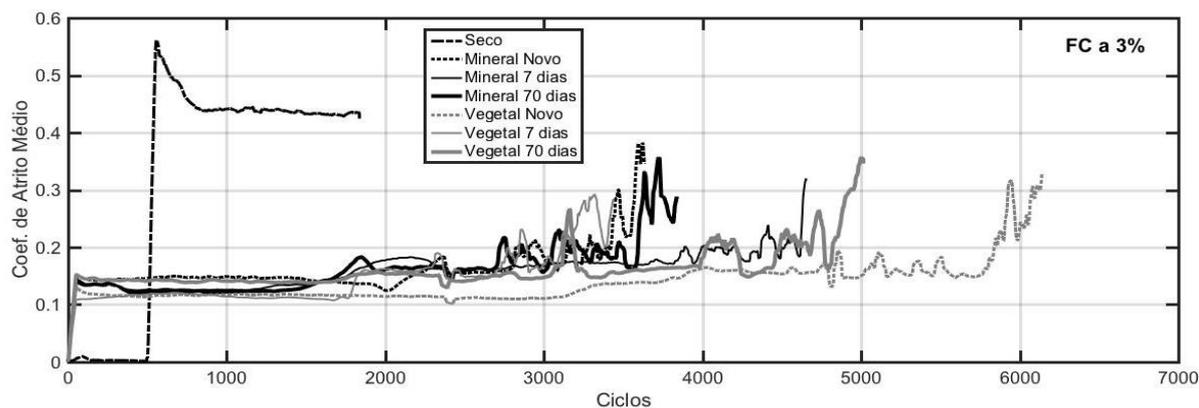
Esse método realizado em um tribômetro, apesar de não reproduzir o processo real de corte de um metal, é particularmente adequado para avaliar as propriedades de lubrificação de fluidos submetidos a condições de atrito e desgaste. É uma importante ferramenta que auxilia na triagem de FCs, através de instrumentos de fricção alternada, controlados por computador, que medem as propriedades de lubrificação e antidesgaste dos fluidos sob condições de deslizamento entre uma esfera e um contra corpo plano (ASTAKOV, 2012).

A viscosidade do óleo é um parâmetro que desempenha papel fundamental na lubrificação (STACHOWIAK, 2005) e determinação da capacidade do filme lubrificante hidrodinâmico (LYMAN, 1979). Diferentes óleos exibem diferentes viscosidades. Além disso, a viscosidade do óleo varia com a temperatura, taxa de cisalhamento e pressão aplicada. A própria espessura da película de óleo formada na superfície é geralmente proporcional a viscosidade (STACHOWIAK, 2005). De fato, alguns referem-se a este regime de lubrificação como lubrificação "pressão-viscosidade" (LYMAN, 1979).

Em condições extremas de pressão, tais como em alta carga, baixa velocidade e baixa viscosidade do lubrificante, a espessura da película lubrificante pode mudar para um passo denominado lubrificação limítrofe, onde a película lubrificante pode realmente romper e permitir contato metal-metal (PAWLAK, 2003).

Assim, à primeira vista, parece que os óleos mais viscosos apresentaram um melhor desempenho, uma vez que os filmes gerados seriam mais espessos e uma melhor separação das duas superfícies em contato seria alcançada. Isto, infelizmente, nem sempre é o caso, uma vez que os óleos mais viscosos são mais resistentes ao cisalhamento, consequentemente, as perdas de energia são mais elevadas gerando mais calor, que resulta num aumento substancial da temperatura das superfícies de contato, podendo levar à falha do componente (STACHOWIAK, 2005).

A lubrificação limítrofe é definida como "uma condição de lubrificação na qual o atrito entre duas superfícies em movimento relativo é determinado pelas propriedades das superfícies e pelas propriedades do lubrificante além da viscosidade" (BYERS, 2006). Existem várias teorias sobre o comportamento da lubrificação limítrofe. Uma explicação é que as moléculas polares do lubrificante limite são atraídas para a superfície metálica. Sob condições práticas, formam-se camadas do lubrificante. À medida que a fricção de deslizamento ocorre, algumas moléculas são removidas, mas outras tomam seu lugar. Este filme limite impede o contato de metal com metal. Se a película estiver quebrada e o contato de metal com metal for feito, pode ocorrer uma falha na peça. Na prática, a maior parte da lubrificação ocorre como lubrificação limite (TUCKER, 2006).



Uma questão que ainda necessita de maiores investigações é baseada na possível interferência dos microrganismos na carga elétrica do FC melhorando ou piorando a aderência de suas moléculas à superfície. A carga da superfície bacteriana varia de acordo com a espécie e é influenciada pelas características do meio de crescimento, como pH e força iônica, idade da bactéria e estrutura da superfície. O nível de dissociação de grupos carboxil, amino e fosfato na parede celular não é somente determinado pelo pH, mas também pela concentração da solução eletrolítica (HONG; BROWN, 2008). A magnitude das interações eletrostáticas diminui com aumento da força iônica devido à blindagem das cargas da superfície. As interações eletrostáticas perdem sua influência quando há forte força iônica (ARAÚJO et al., 2010).

4.2.6.1. Desgaste por deslizamento utilizando os FCs a 3,0%

Os resultados de lubricidade para os dois FCs investigados na concentração de 3,0% são apresentados na Figura 4.25. Para esta concentração de FC o coeficiente de atrito médio inicial teve o menor (0,1331) e maior valor (0,1537) determinados para o FC de base vegetal, novo e após setenta dias de contaminação microbiológica, respectivamente. Contudo, o FC de base mineral sofreu menor oscilação nesses valores mesmo após contaminação microbiológica (Figura 4.26), sendo acrescido 1,7% (após 7 dias de contaminação) e 1,0% (após setenta dias de contaminação) ao valor inicial obtido com o FC novo (0,1537). Porém, apesar de uma maior variação do coef. de atrito ter sido encontrada para o FC de base vegetal, o maior valor do coeficiente de atrito determinado nesse fluido equiparou-se aos valores médios determinados para o FC de base mineral. Isso pode significar uma menor resistência do FC de base vegetal a contaminação microbiológica comparado ao FC de base mineral.

Figura 4.25. Ensaio de desgaste por deslizamento utilizando os FCs em concentração de 3,0% e em ambiente sem fluido de corte

Considerando-se que no sistema tribológico em questão o coeficiente de atrito limite foi de 0,30, dentre todos os ambientes testados, a carga máxima atingida foi quando da utilização do FC de base vegetal novo, ao completar 5927 ciclos de deslizamento sob uma carga de 41,202 N (Fig. 4.27). Em ambiente seco a falha do sistema (contato metal com metal) ocorreu após 41 ciclos, sob uma carga de 13,734 N (Fig. 4.26.).

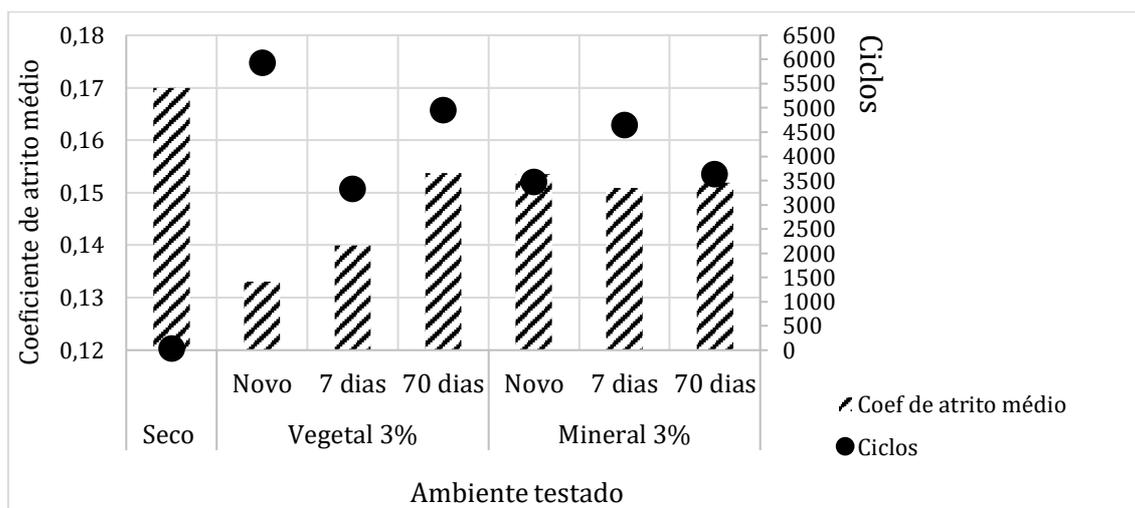


Figura 4. 26. Desempenho dos FCs a 3,0% durante ensaio de desgaste por deslizamento. Coeficiente de atrito médio correspondente a totalidade do ensaio.

Apesar de os dois FCs manterem um coeficiente de atrito médio muito próximos (Fig. 4.26.), a resistência ao cisalhamento de ambos se comportou de maneira diferente após a contaminação microbiológica por sete dias (Fig. 4.27). Observou-se uma redução de 33,3% para o FC de base vegetal e aumento de 25,0% para o FC de base mineral em relação a carga suportada por esses fluidos quando novos. Adicionalmente, apesar de o FC de base vegetal, submetido a contaminação microbiológica por setenta dias, manter suas características iniciais em relação a quantidade de carga suportada antes da falha, houve redução em 16,5% na quantidade de ciclos. Esses resultados podem ser embasados no fato de a viscosidade do FC de base vegetal ter sofrido redução após contaminação microbiológica e o de base mineral ter sofrido aumento, o que colabora para as alterações observadas quanto à sua resistência ao cisalhamento.

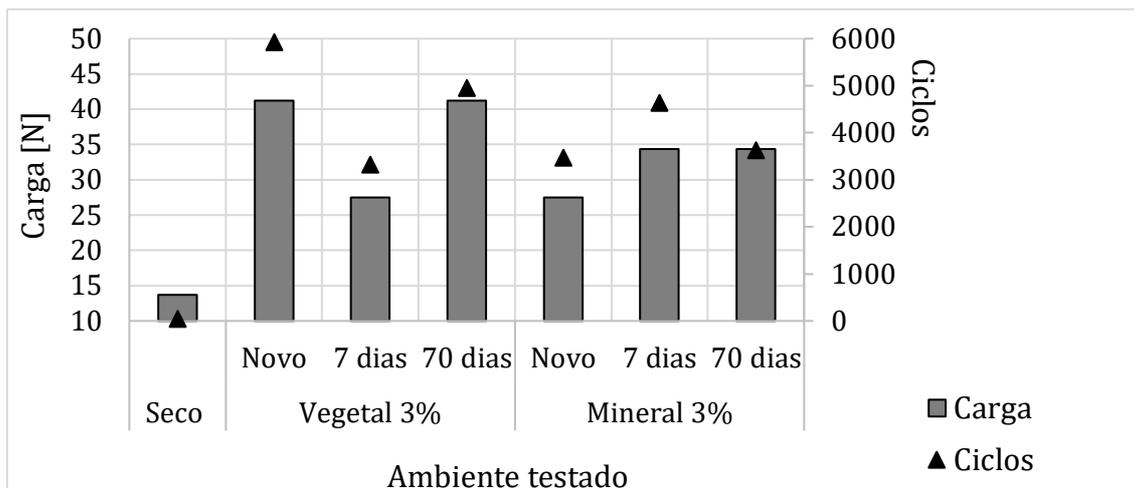


Figura 4.27. Desempenho de resistência ao cisalhamento em ensaio de desgaste por deslizamento dos dois FCs investigados, na concentração de 3,0%, nas três condições testadas e também em ambiente seco.

4.2.6.1. Desgaste por deslizamento utilizando os FCs a 5,0%

Os resultados dos ensaios de desgaste por deslizamento utilizando-se os FCs na concentração de 5,0% são apresentados na Fig. 4.28. Os FCs contaminados por sete e setenta dias, excetuando-se o FC de base mineral após sete dias de contaminação microbiológica, que teve seu desempenho melhorado (64,5%), apresentaram redução em seus desempenhos lubrificantes (redução no número de ciclos por falha no filme lubrificante), todos comparado aos seus FCs novos (Fig. 4.29).

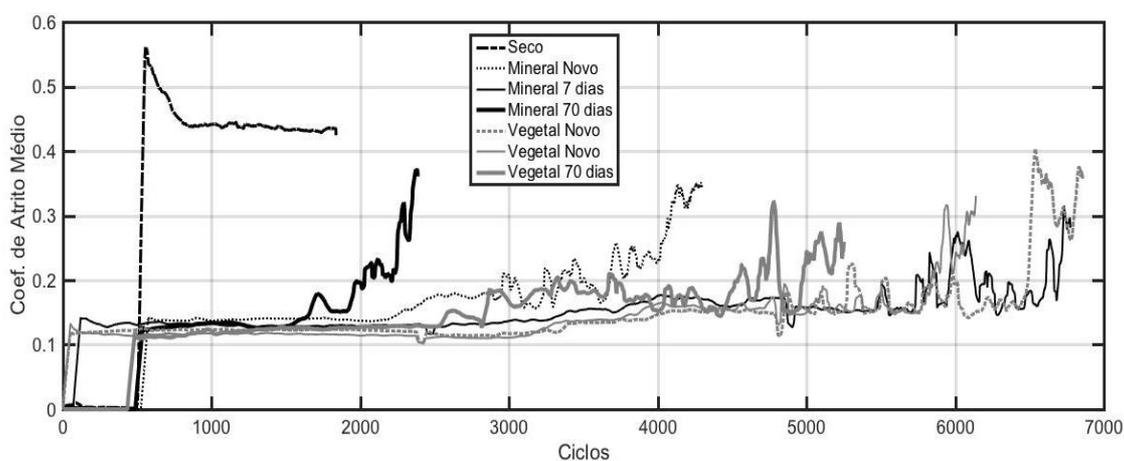


Figura 4.28. Ensaio de desgaste por deslizamento utilizando os FCs em concentração de 5% e em ambiente seco.

Na Figura 4.29 são apresentados os resultados dos ensaios realizados utilizando os FCs a 5,0% relacionando o coeficiente de atrito médio com a quantidade de ciclos que cada

fluido realizou antes de atingir o limite de 0,3 para o coeficiente de atrito. Os coeficientes de atrito médios apresentaram redução de 5,2% para o de base vegetal e de 6,5% para o de base mineral na condição em que foi submetido a sete dias de contaminação microbiológica. Entretanto, o sistema utilizando o FC de base vegetal, após setenta dias de contaminação microbiológica, sofreu aumento em seu coeficiente de atrito médio em 7,4% e o que utilizou FC de base mineral nesta mesma condição praticamente não sofreu alteração. Outra redução importante observada quando utilizados os FCs após setenta dias de contaminação foi o número de ciclos, sendo que o de base vegetal teve redução de 28,2% e o de base mineral de 44,3%. Ou seja, nesta concentração, excetuando-se o FC de base mineral submetido a sete dias de contaminação microbiológica que propiciou redução do coeficiente de atrito médio e incremento da vida útil do fluido, em todos os demais a redução do coeficiente de atrito médio foi acompanhada pela redução da vida do fluido no ensaio de desgaste por deslizamento.

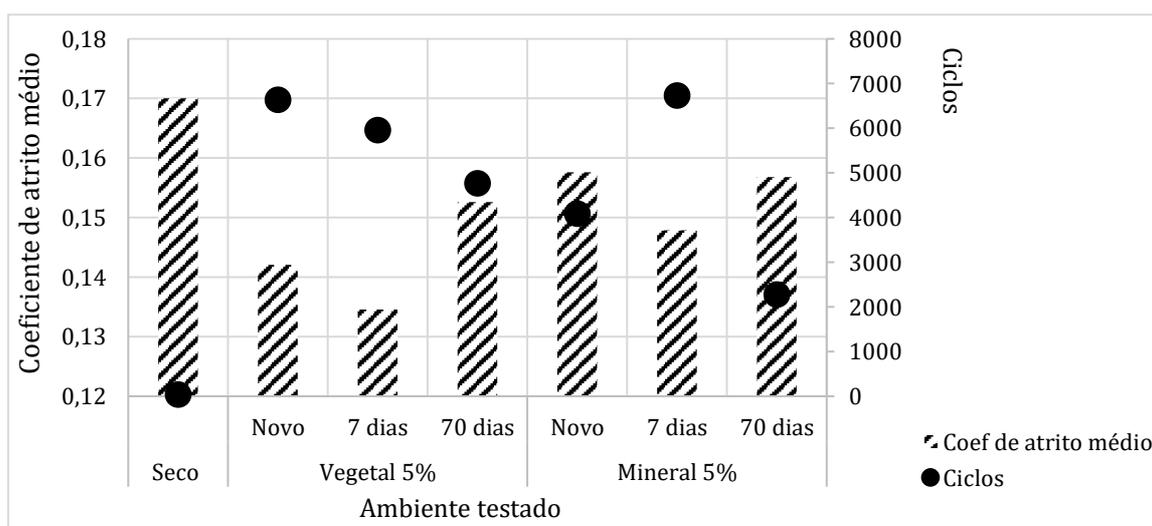


Figura 4.29. Desempenho dos FCs a 5% durante ensaio de desgaste por deslizamento.

Uma das possíveis causas para esse comportamento poderia estar associada com a viscosidade dos fluidos. O FC de base vegetal teve aumento na viscosidade em 6,7% após contaminado por setenta dias versus 85,0% do mineral. Contudo o índice de molhabilidade do FC de base vegetal piorou enquanto que o do mineral melhorou, ambos nessa mesma condição de contaminação microbiológica. Entretanto, dentre todas as possibilidades de fatores associados a esses fenômenos observados nos fluidos, a interação do microrganismo com as gotículas do FC ainda é um tema que carece de maiores estudos a fim de serem determinadas as reais causas da mudança de comportamento da propriedade lubrificante.

Nesta concentração mesmo após o processo de contaminação microbiológica sofrido, o FC de base vegetal continuou suportando maior carga que o FC de base mineral (Fig. 4.30). A exceção também neste gráfico foi o FC de base mineral após sete dias de contaminação microbiológica que melhorou o tempo de vida em relação a quantidade de ciclos e ainda sua resistência ao cisalhamento, suportando uma carga maior que a limite suportada pelo mesmo FC novo.

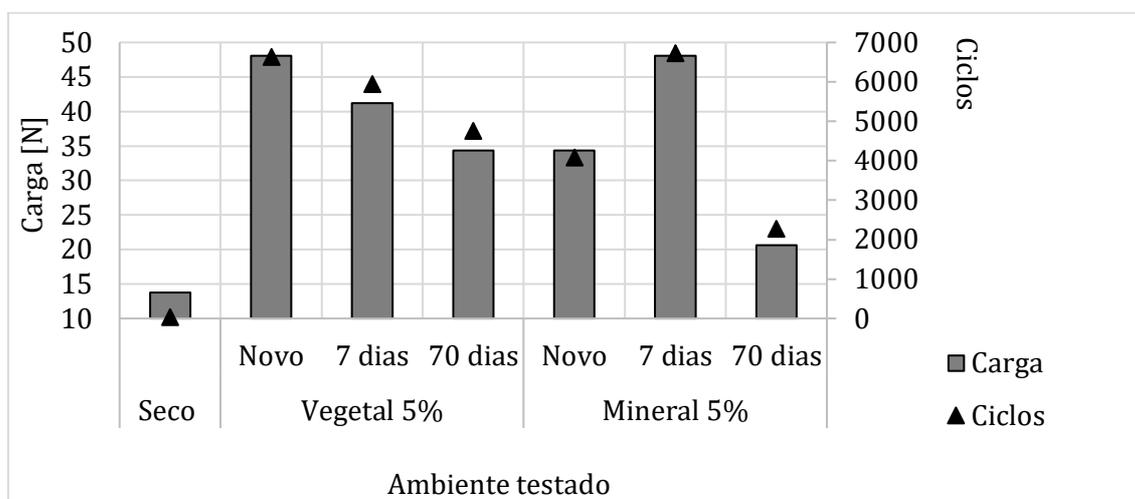


Figura 4.30. Desempenho de resistência ao cisalhamento em ensaio de desgaste por deslizamento dos dois FCs investigado, na concentração de 5,0%, nas três condições testadas e também em ambiente seco.

4.2.6.1. Desgaste por deslizamento utilizando os FCs a 8,0%

Os resultados obtidos no ensaio de desgaste por deslizamento dos dois FCs na concentração de 8% são apresentados na Fig. 4.31. O coeficiente de atrito médio obtido para os fluidos apresentou valor mínimo de 0,1602 (FC de base vegetal após 7 dias de contaminação microbiológica) e valor máximo de 0,1990 (FC de base mineral após 7 dias de contaminação microbiológica). Considerando o coeficiente de atrito limite de 0,30 no sistema, a carga máxima atingida (48,069 N) e maior número de ciclos realizados (6923) ocorreu quando da utilização do FC de base mineral novo. A menor carga suportada pelo sistema (13,734) foi em ambiente seco, após 41 ciclos de riscamento (Fig. 4.32).

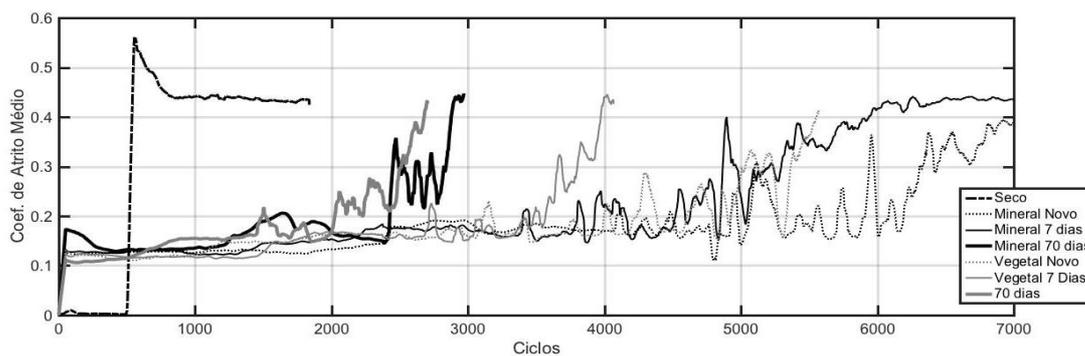


Figure 4.31. Ensaio de desgaste por deslizamento utilizando os FCs em concentração de 8,0% e em ambiente seco.

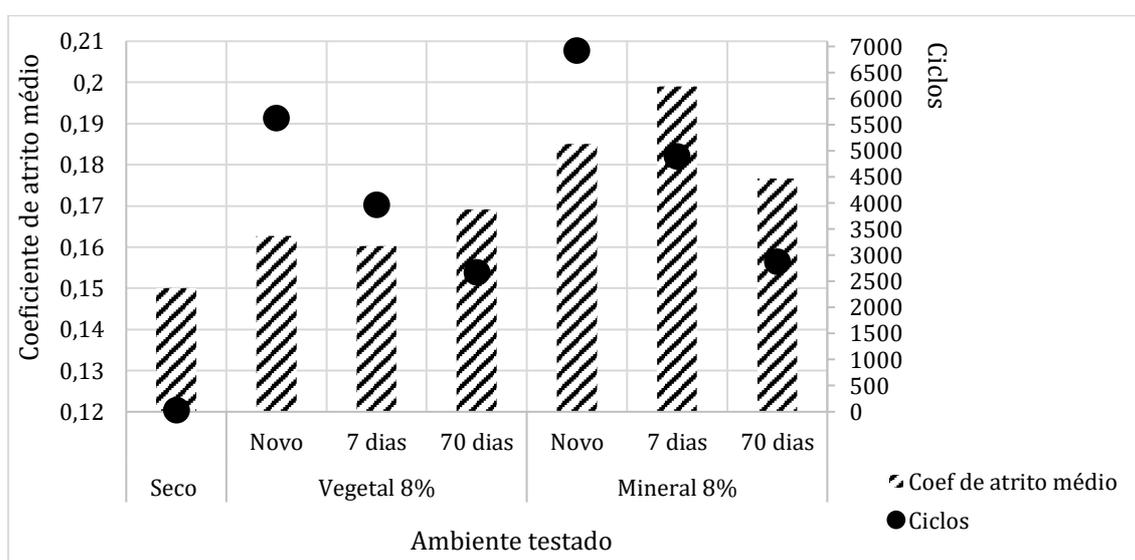


Figura 4.32. Desempenho dos FCs a 8,0% durante ensaio de desgaste por deslizamento.

Observa-se ainda que a carga suportada pelos dois fluidos no momento em que ocorre falha do filme lubrificante (resultando em contato de metal com metal), foi menor para os dois fluidos de corte (base vegetal e mineral) submetidos a contaminação por microrganismos em curto (sete dias) e longo prazo (setenta dias) em comparação aos novos. Enquanto os FCs contaminados por sete dias tiveram redução da resistência ao cisalhamento em média de 15,47% (14,28% para o mineral e 16,66% para o vegetal) em relação aos seus FCs bases novos, os resultados também evidenciaram uma redução ainda maior desta resistência ao cisalhamento (42,85%) quando utilizado o FC de base mineral após setenta dias de contaminação microbiológica. Esse resultado é seguido pelo FC de base vegetal em mesma condição de contaminação (33,33%). Esses FCs foram comparados aos seus FCs novos/recém diluídos. Apesar de os FCs de base mineral submetidos a contaminação microbiológica por sete e setenta dias apresentarem as maiores perdas em relação a resistência ao cisalhamento,

em relação as perdas observadas nos FCs de base vegetal, esse fluido base obteve melhores índices de desempenho neste quesito, mesmo após contaminado, suportando 19,6% a mais de carga que o CF de base vegetal (Fig. 4.33.).

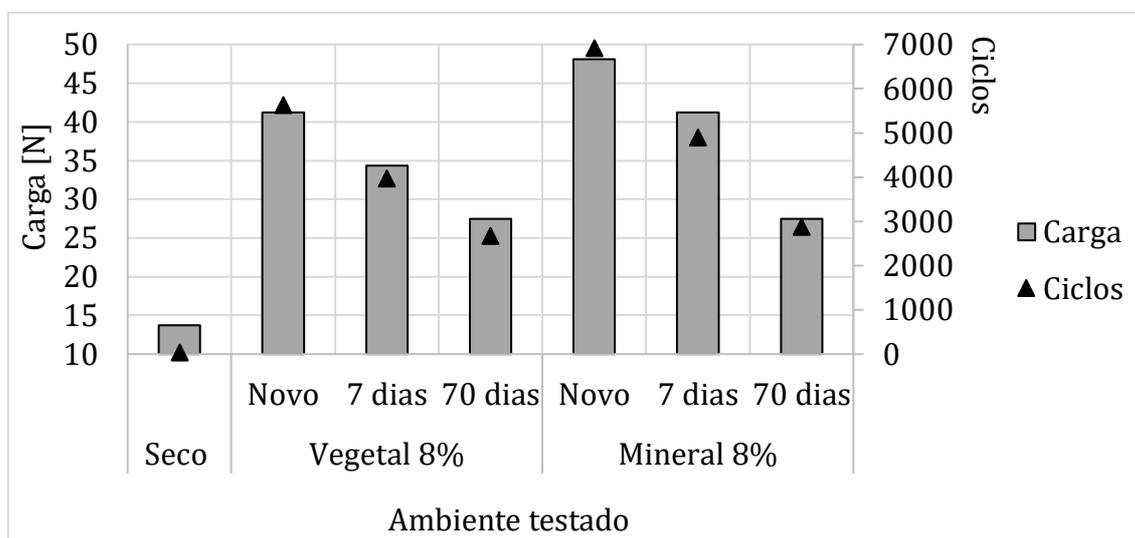


Figura 4.33. Desempenho de resistência ao cisalhamento em ensaio de desgaste por deslizamento dos dois FCs investigados, na concentração de 8,0%, nas três condições testadas e também em ambiente seco.

4.2.6.1. Desgaste por deslizamento utilizando os FCs a 10,0%

Os resultados obtidos no ensaio de desgaste por deslizamento utilizando os dois FCs na concentração de 10,0% (Fig. 4.34) evidenciaram comportamento semelhante de resistência ao cisalhamento dos filmes lubrificantes formados por esses dois fluidos. Contudo, apesar de o FC de base vegetal manter-se intacto por mais ciclos (3105) que o FC de base mineral novo, houve uma redução maior de desempenho do vegetal (31,7%) do que o mineral (14,3%) na quantidade de ciclos realizados até o rompimento do filme lubrificante após contaminação microbiológica por sete dias em relação aos fluidos novos.

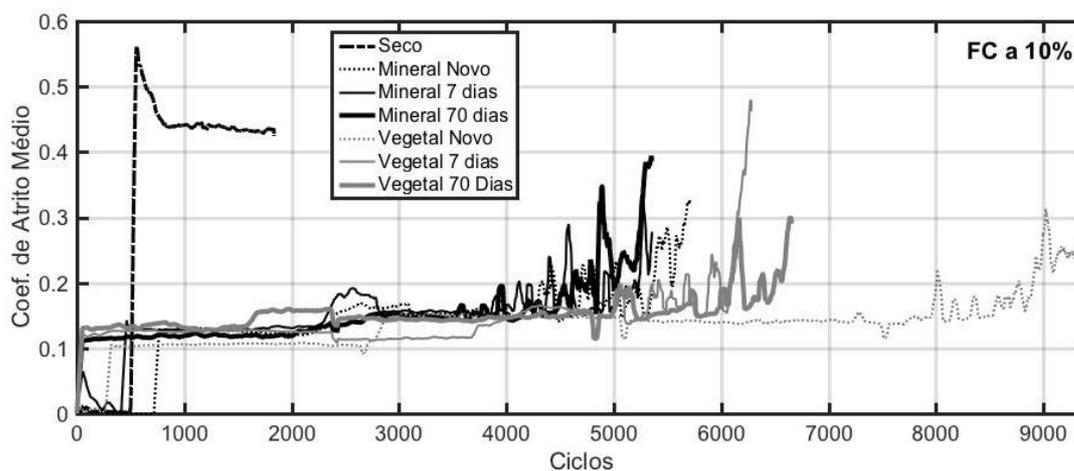


Figure 4.34. Ensaio de desgaste por deslizamento utilizando os FCs em concentração de 10% e em ambiente seco.

O coeficiente de atrito médio obtido nos ensaios utilizando os dois FCs na concentração de 10,0% é apresentado na Fig. 4.35. Os ensaios utilizando o FC de base vegetal obtiveram o menor valor de coeficiente de atrito médio de 0,1375 (CF de base vegetal após 7 dias de contaminação microbiológica) e o maior valor 0,1620 foi para CF de base mineral (após setenta dias de contaminação microbiológica). Considerando o coeficiente de atrito limite de 0,30 no sistema para os dois ambientes testados, as cargas máxima e mínima alcançadas no ambiente úmido oscilaram entre 61,80 N (FC de base vegetal novo) a 27,46 N (FC de base mineral após contaminação microbiológica por setenta dias).

O desempenho dos dois FCs quanto à resistência ao cisalhamento devido ao ensaio de desgaste por deslizamento, após contaminação microbiológica, evidenciou uma maior fragilidade do FC de base vegetal a essa contaminação (Fig. 4.36). A carga suportada pelo fluido novo de base vegetal sofreu redução de 22,2%, a curto prazo de contaminação (sete dias). Para o FC de base mineral essa redução em maior intensidade ocorreu apenas a longo prazo (setenta dias) e ainda assim foi menor para esse fluido (16,5%).

Nesta concentração o FC de base vegetal mesmo com todas as perdas sofridas, obteve as menores interferências em suas propriedades lubrificantes após a contaminação por microrganismos.

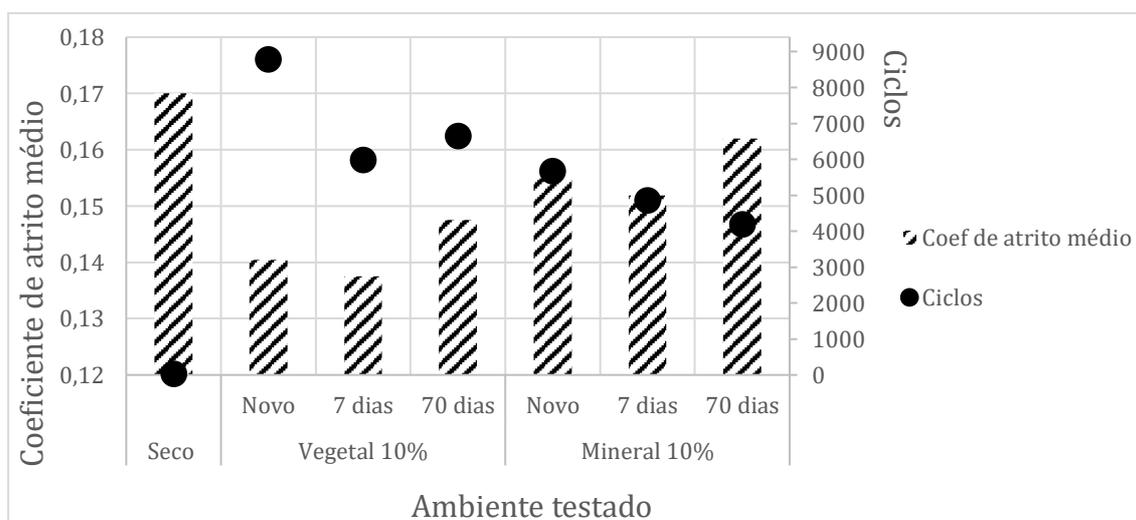


Figura 4.35. Desempenho dos FCs a 10% durante ensaio de desgaste por deslizamento.

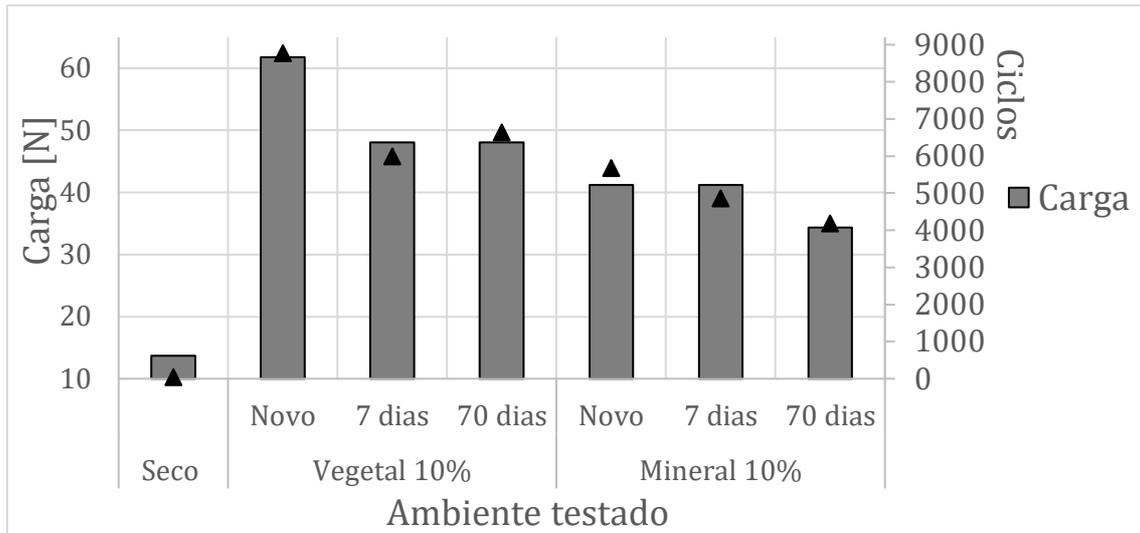


Figura 4.36. Desempenho de resistência ao cisalhamento em ensaio de desgaste por deslizamento dos dois FCs investigados, na concentração de 10,0%, nas três condições testadas e também em ambiente seco.

Em análise última dos ensaios de desgaste por deslizamento para os fluidos testados, os mesmos foram agrupados em vegetal e mineral (Figuras 4.37 e 4.38).

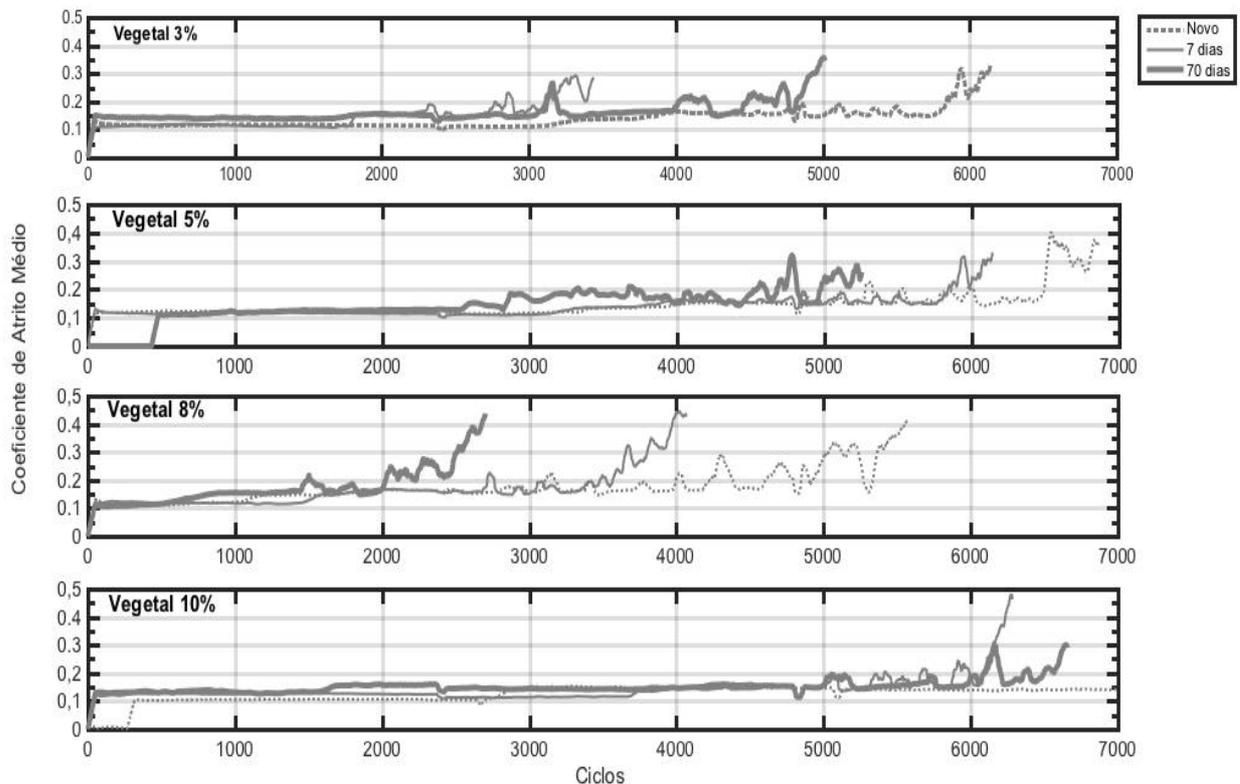


Figura 4.37. Desempenho de resistência ao cisalhamento em ensaio de desgaste por deslizamento dos dois FCs de base vegetal investigados, nas quatro concentrações testadas.

Nessas Figuras foi possível comparar o que aconteceu a cada fluido de corte novo e após os dois intervalos de contaminação, nas quatro concentrações testadas. Em cada concentração o fluido foi afetado em diferentes intensidades em sua propriedade lubri-refrigerante.

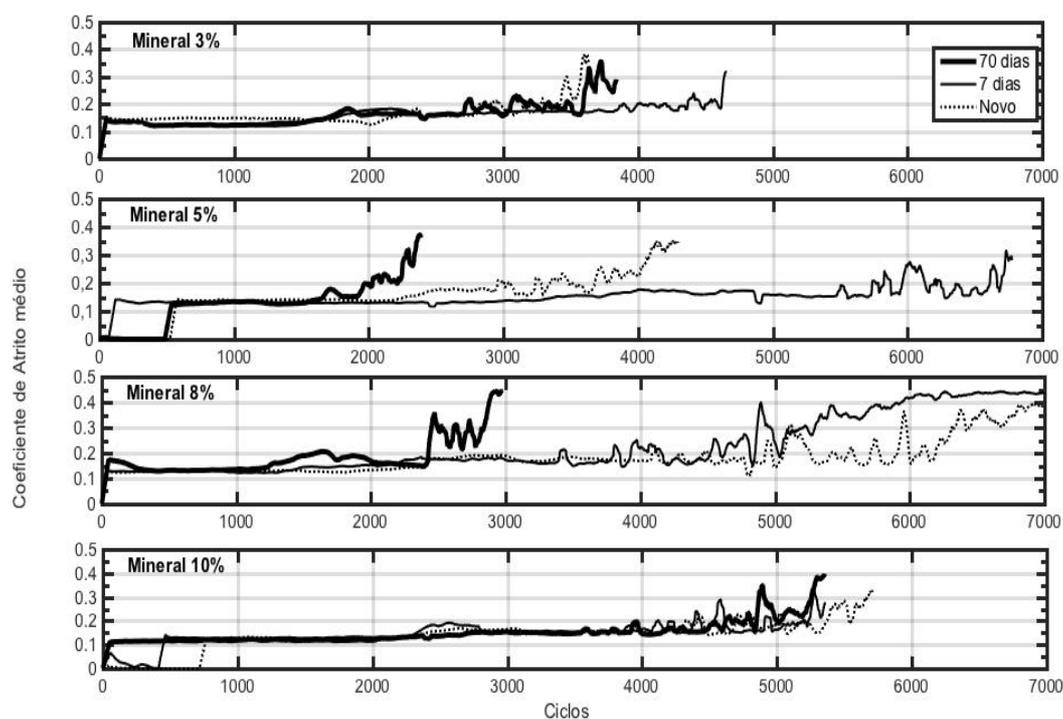


Figura 4.38. Ensaio de desgaste por deslizamento dos FCs de base mineral investigados, nas quatro concentrações testadas.

4.2.7. Desempenho Lubri-refrigerante – Esclerometria Pendular

Os dois FCs investigados foram agrupados, assim como nos ensaios anteriormente descritos, de acordo com a concentração testada. Dessa forma, o comportamento da energia específica consumida nos riscos realizados tanto em alumínio (concentração de 8,0% apenas) quanto em aço inoxidável (concentração de 3,0%, 5,0%, 8,0% e 10,0%) são apresentados em subitens a seguir. Todavia, há que se fazer algumas considerações sobre os resultados de todos de uma forma mais ampla antes de os tratar especificamente nos agrupamentos de análise expostos.

O modelo de energia utilizado por Franco (1989), foi adotado em todos os ensaios de esclerometria utilizando os fluidos de corte investigados (Eq. 4.1). A análise dos parâmetros característicos de ajuste mostra uma boa correlação com o modelo proposto pela Equação 4.1. Uma medida descritiva para avaliar o ajuste do modelo é o coeficiente de correlação “R²” que sinaliza o melhor ajuste quanto mais próxima de 1.

$$e = K \cdot \Delta m^q \quad (4.1)$$

Sendo:

“K” e “q” coeficientes característicos dos materiais

Δm é a variação da massa média no ensaio

4.2.7.1 Esclerometria Pendular utilizando FCs a 3,0%

Os resultados dos ensaios tribológicos de esclerometria pendular avaliando o desempenho dos dois FCs investigados na concentração de 3,0% quando do riscamento do aço inoxidável V304UF são apresentados nas Figs. 4.39 e 4.40

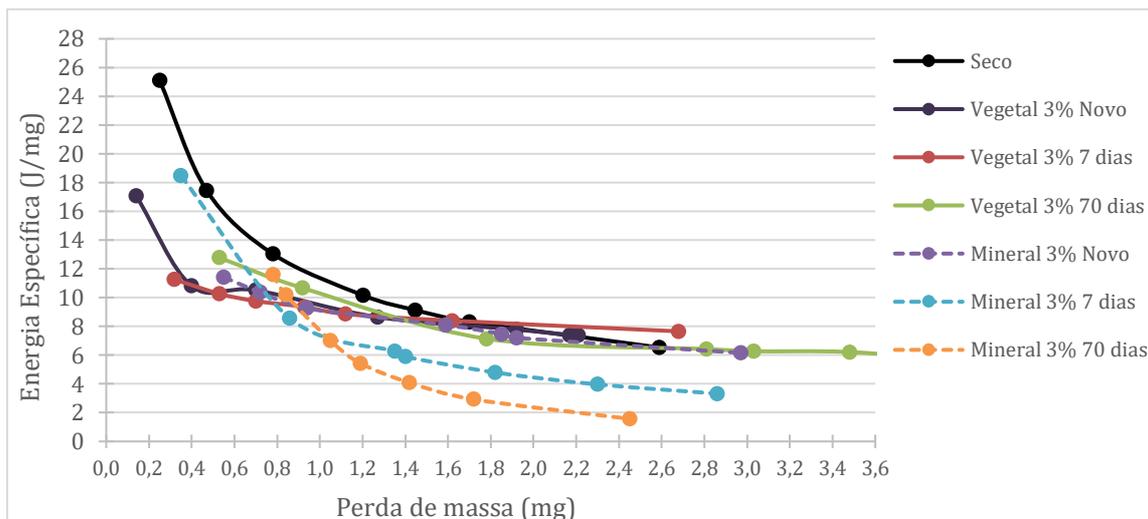


Figura 4.39. Energia específica consumida no riscamento da superfície do aço inoxidável a seco e submerso em 1,2 ml de fluido de corte a 3,0%. Pontos experimentais.

Todos os fluidos obtiveram melhores desempenhos que o ambiente seco, excetuando-se o FC de base vegetal após sete dias de contaminação microbiológica que apresentou desempenho pior que o ambiente seco após 1,6 mg de massa perdida. Apesar do melhor desempenho quando comparado ao ambiente seco antes de 1,0 mg de massa perdida, os FCs de base vegetal se assemelharam após essa perda de massa.

Após 0,8 mg de massa perdida os FCs de base mineral contaminados por sete e setenta dias mostraram desempenhos superiores aos demais fluidos e condições testadas assumindo as menores energias específicas para o riscamento do aço inoxidável. Possivelmente para esses fluidos a capacidade lubrificante tenha se sobreposto à capacidade refrigerante, fator decisivo para o aquecimento local do material melhorando as condições de cisalhamento. Nos ensaios de desgaste por deslizamento as propriedades lubrificantes destes fluidos a 3,0%, bem como sua resistência ao cisalhamento foram determinadas. O FC de base mineral após sete dias de contaminação melhorou seu desempenho e o com setenta dias manteve as características do FC novo. Contudo esses dois fluidos foram capazes de aumentar a resistência ao cisalhamento em 25,0% nesta condição de contaminação, resistindo ao ensaio de desgaste por deslizamento em um maior número de ciclos que o seu FC base novo, bem como reduziram os seus ângulos de contato e alteraram outros parâmetros, já discutidos anteriormente que podem justificar o melhor desempenho.

Na condição a seco ocorreu trocas de calor, por condução, através do material do corpo de prova e por convecção com o ar ambiente, podendo assim reduzir o aquecimento local do corpo de prova, que dessa forma, não sofre o processo de “amolecimento”, um

facilitador do seu cisalhamento. Essas trocas de calor, entretanto, não são relativamente elevadas, comparadas com a água e os fluidos. Por outro lado, a ausência de fluido não proporciona a lubrificação suficiente, sendo, portanto, o principal fator que eleva significativamente o coeficiente de atrito do sistema (Fig. 4.25) e o desgaste causado no penetrador (dados não apresentados).

Os pontos experimentais obtidos com cada fluido de corte testado na concentração de 3,0% que geraram as curvas mostradas na Fig. 4.39. foram ajustados por um modelo de potência utilizado por Franco (1989), cujas curvas são mostradas na Fig. 4.40.

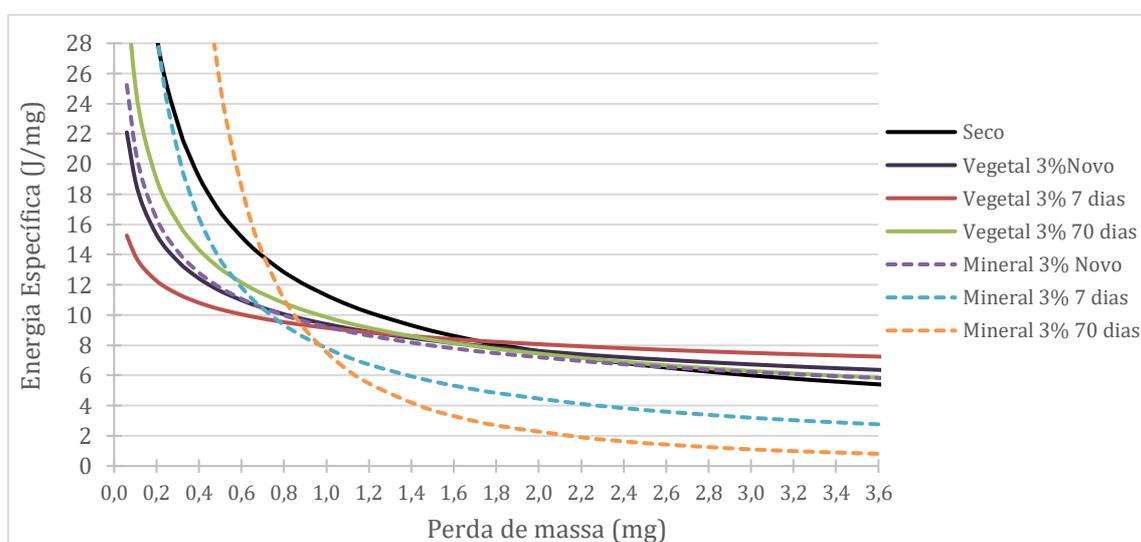


Figura 4.40. Curvas geradas no riscamento do aço inoxidável utilizando FCs a 3,0% ajustadas por um modelo de potências.

A análise dos parâmetros característicos de ajuste mostra uma boa correlação com o modelo proposto pela Equação 4.1 (Tab. 4.7). Como anteriormente descrito os valores obtidos para o coeficiente de correlação “R²”, que é usado como uma medida descritiva para avaliar o ajuste do modelo, estiveram muito próximos do valor de melhor ajuste da curva: 1.

Tabela 4.7. Parâmetros característicos do ajuste em modelo de potência (FCs 3,0% riscamento em V304UF).

Ambiente	K	q	R ²
Seco	11,299	-0,576	0,9925
Úmido (FC)			
Vegetal 3,0% Novo	11,299	-0,576	0,993
Vegetal 3,0% 7 dias	9,396	-0,304	0,997
Vegetal 3,0% 70 dias	9,149	-0,182	0,990
Mineral 3,0% Novo	9,857	-0,408	0,936
Mineral 3,0% 7 dias	9,218	-0,358	0,977
Mineral 3,0% 70 dias	7,799	-0,812	0,998

4.2.7.2 Esclerometria Pendular utilizando FCs a 5,0%

Os resultados dos ensaios tribológicos de esclerometria pendular avaliando o desempenho dos dois FCs investigados na concentração de 5,0%, nas três condições testadas, quando do riscamento do aço inoxidável V304UF são apresentados nas Figs. 4.41. e 4.42.

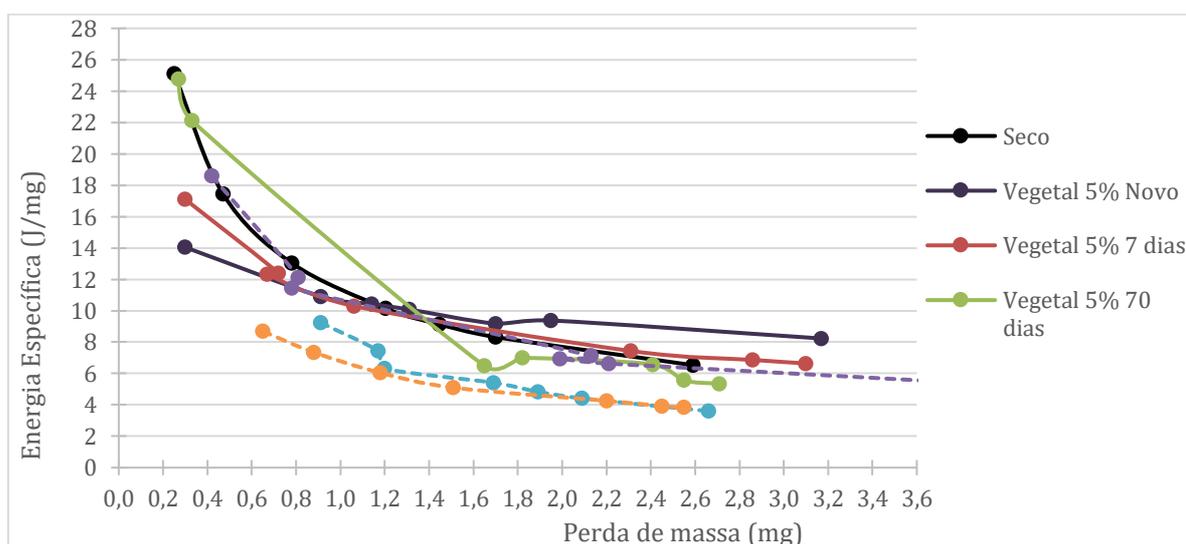


Figura 4.41. Energia específica consumida no riscamento de superfície do aço inoxidável submerso em 1,2 ml de fluido de corte a 5,0% em em ambiente seco. Pontos experimentais.

Entre os FC de base vegetal a 5,0%, até uma perda de massa de aproximadamente 1,0 mg, os fluidos apresentaram menores energias específicas que a condição a seco. Após este valor de perda de massa, os fluidos de base vegetal apresentaram energia específica bem

próxima ou superior à condição a seco. A perda gradativa em resistência ao cisalhamento mostrada nos ensaios de desgaste por deslizamento (Fig. 4.28 a 4.29), refletiram no aumento da energia específica no ensaio de riscamento com perda de massa acima de 1,0 mg. Este fluido após contaminado por microrganismos por sete e setenta dias suportou gradativamente menor carga e menor número de ciclos, o que afetou a sua capacidade lubrificante. Neste caso, nos ensaios de esclerometria seu desempenho também foi agravado para profundidades menores. Contudo após a perda de massa de 1,0 mg seu desempenho refrigerante modificou o comportamento em relação ao FC base novo. Os fluidos de base vegetal contaminados perderam em capacidade de remoção de calor (redução da difusividade térmica em 51,0% - Fig. 4.11.), com piora da molhabilidade (aumento do ângulo de contato da fase líquida com a sólida em 42,8% - Fig. 4.16).

O FC de base mineral a 5,0% novo apresentou um comportamento semelhante ao do ambiente seco quando do riscamento do aço inoxidável. Obviamente, esse comportamento é resultado do balanço de suas funções refrigerantes e lubrificantes. Analisando-se outros parâmetros desse fluido nessa concentração e condições de estudo observa-se que apesar de o coeficiente de condutividade térmica ter se mantido praticamente inalterado após a contaminação microbiológica “in vitro”, a difusividade térmica desse FC após sete dias de contaminação microbiológica sofreu aumento de 21,5% e redução de 14,7% após setenta dias respectivamente, e obtiveram melhora dos índices de molhabilidade, ou seja, o espalhamento desses dois fluidos na superfície do metal foi aumentado. Todos esses parâmetros podem estar associados ao incremento na capacidade dos dois fluidos contaminados (por sete e setenta dias) de possivelmente reter o aquecimento local facilitando assim o cisalhamento do material do corpo de provas.

No gráfico da Fig. 4.42. são mostradas as curvas ajustadas dos desempenhos das energias específicas para os fluidos de corte testados e o ambiente seco, em relação ao diferencial de massa perdido.

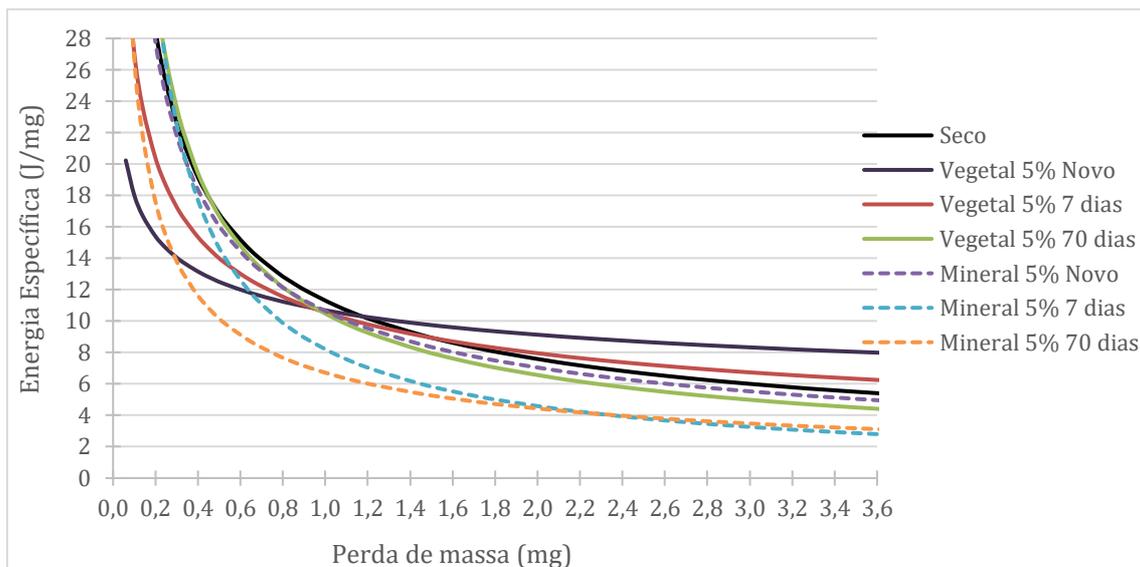


Figura 4.42. Curvas geradas no riscamento do aço inoxidável utilizando FCs a 5,0% ajustadas por um modelo de potências.

Como descrito anteriormente para os ensaios realizados com os fluidos de corte a 5,0% e ambiente seco, são apresentados na Tab. 4.8. os parâmetros obtidos quando do ajuste das curvas por um modelo de potências, com coeficientes de correlação R^2 bem próximos da unidade.

Tabela 4.8. Parâmetros característicos do ajuste em modelo de potência (FCs 5,0% riscamento em V304UF).

Ambiente	K	q	R^2
Seco	11,299	-0,576	0,9925
Úmido (FC)			
Vegetal 5% Novo	10,683	-0,227	0,957
Vegetal 5% 7 dias	10,550	-0,409	0,997
Vegetal 5% 70 dias	10,466	-0,675	0,986
Mineral 5% Novo	10,633	-0,596	0,994
Mineral 5% 7 dias	8,198	-0,840	0,943
Mineral 5% 70 dias	6,709	-0,599	0,992

4.2.7.3 Esclerometria Pendular utilizando FCs a 8,0%

Na concentração de 8,0% foram feitos ensaios em corpos de prova de aço inoxidável V304UF e alumínio. Os resultados são apresentados na sequencia.

Ensaio utilizando corpos de prova de aço inoxidável V304UF

Os resultados dos ensaios tribológicos de esclerometria pendular avaliando o desempenho dos dois FCs investigados na concentração de 8,0%, quando do riscamento do aço inoxidável V304UF são apresentados nas Figs. 4.43 e 4.44.

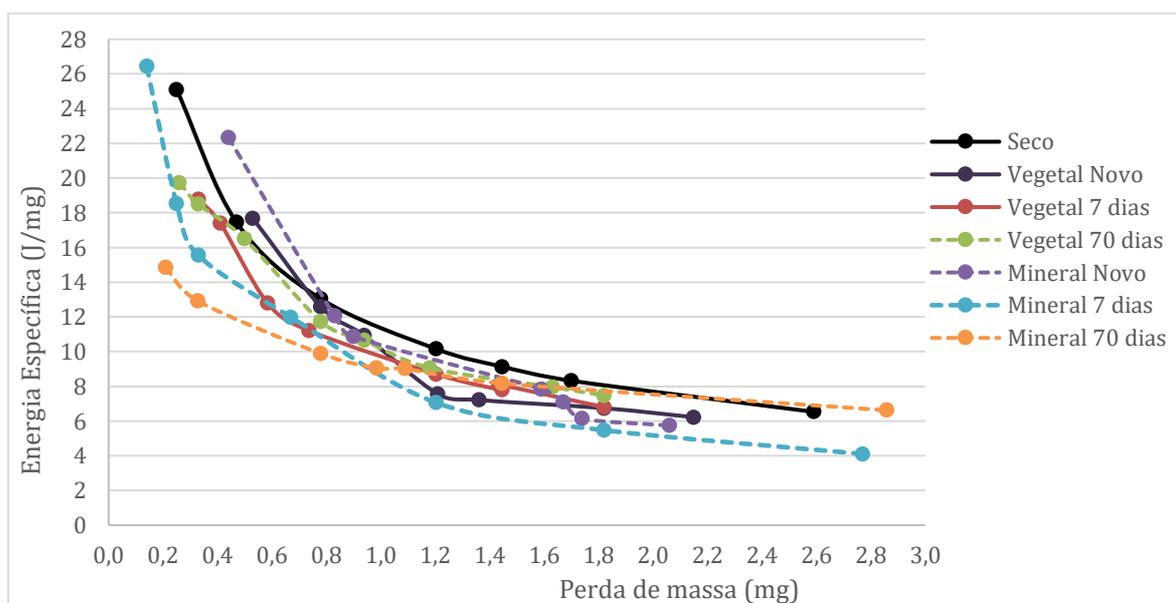


Figura 4.43 - Energia específica consumida durante riscamento de superfícies do aço inoxidável submersas em 1,2 mL de fluidos de corte a 8,0%. Pontos experimentais.

Apesar de todas as alterações sofridas pelos fluidos de corte investigados nesta concentração de uso, os desempenhos em maiores profundidades de ensaio cuja perda de massa foi maior que 0,8 mg foram semelhantes. O fluido de corte de base mineral após sete dias de contaminação microbiológica obteve a menor energia específica no riscamento do aço inox. Contudo em pequenas profundidades de corte, para as quais a massa perdida não ultrapasse 0,8 mg, o FC de base mineral novo e após setenta dias de contaminação microbiológica obtiveram o pior e melhor desempenho no ensaio de riscamento com a obtenção da maior e menor energia específica, respectivamente.

Houve redução dos coeficientes de difusividade térmica dos FCs de base mineral contaminados por sete e setenta dias. Nessa concentração o FC de base mineral apresentou menores ângulos de contato com a superfície (maior molhabilidade), nas 3 condições testadas do que o FC de base mineral, o que pode explicar as diferenças encontradas para o comportamento de ambos nos ensaios de esclerometria pendular. A Tabela 4.9 apresenta os parâmetros obtidos quando do ajuste das curvas por um modelo de potências para os

resultados com os FCs na concentração de 8,0%, com coeficientes de correlação R^2 bem próximos da unidade.

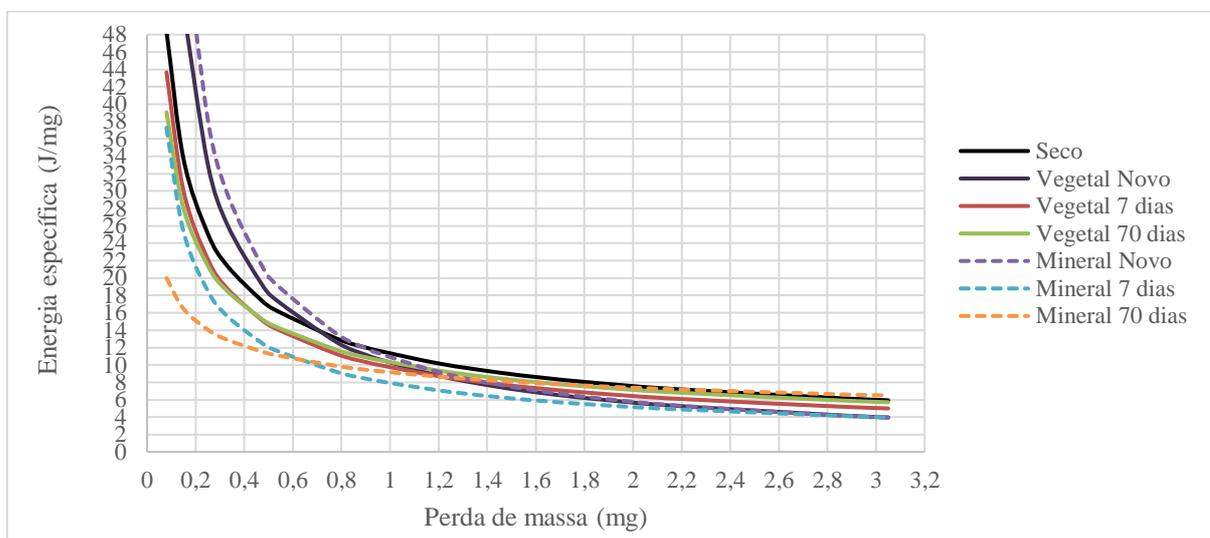


Figura 4.44 Curvas ajustadas por um modelo de potências para os ensaios de esclerometria pendular em aço inoxidável em ambientes: seco e úmido (utilizando FCs a 8,0%).

Tabela 4.9. Parâmetros característicos do ajuste em modelo de potência (FCs 8,0% riscamento em V304UF).

Ambiente	K	q	R^2
Seco	11,299	-0,576	0,9925
Úmido (FC)			
Vegetal 8% Novo	10,224	-0,847	0,9848
Vegetal 8% 7 dias	9,715	-0,595	0,9759
Vegetal 8% 70 dias	10,297	-0,528	0,9746
Mineral 8% Novo	10,841	-0,909	0,9894
Mineral 8% 7 dias	7,906	-0,614	0,9954
Mineral 8% 70 dias	9,146	-0,309	0,9992

Ensaaios utilizando corpos de prova de alumínio comercialmente puro

Os resultados dos ensaios tribológicos de esclerometria pendular avaliando o desempenho dos dois FCs investigados na concentração de 8,0% e ambiente seco, quando do riscamento do alumínio comercialmente puro são apresentados nas Figs. 4.45 e 4.46.

Observa-se que os valores de energia específica para o riscamento do alumínio puro comercial (Fig. 4.45) são superiores ao riscamento do aço inoxidável V304UF (Fig. 4.43), consequência da maior ductilidade do alumínio. Em maiores profundidades de ensaio, quando

a massa perdida é maior que 1,6 mg, as curvas obtidas nos ambientes seco e úmidos apresentam comportamentos semelhantes. Contudo, em profundidades menores, o FC de base mineral após sete dias de contaminação microbiológica obteve o pior desempenho quanto a energia específica necessária para realizar o risco. Mesmo alterando o tipo de material, apesar de ainda se tratar de um metal dúctil, o FC de base mineral após setenta dias de contaminação microbiológica apresentou o melhor desempenho quanto a energia específica necessária para a execução do risco.

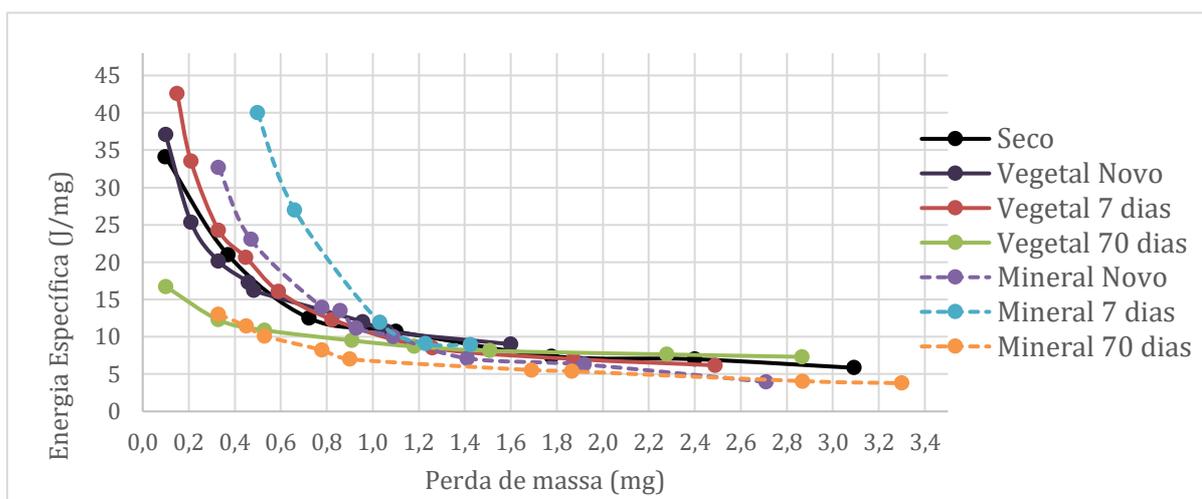


Figura 4.45. Energia específica consumida no riscamento de superfície do alumínio submerso em 1,2 ml de fluido de corte a 8,0% e em ambiente seco. Pontos experimentais.

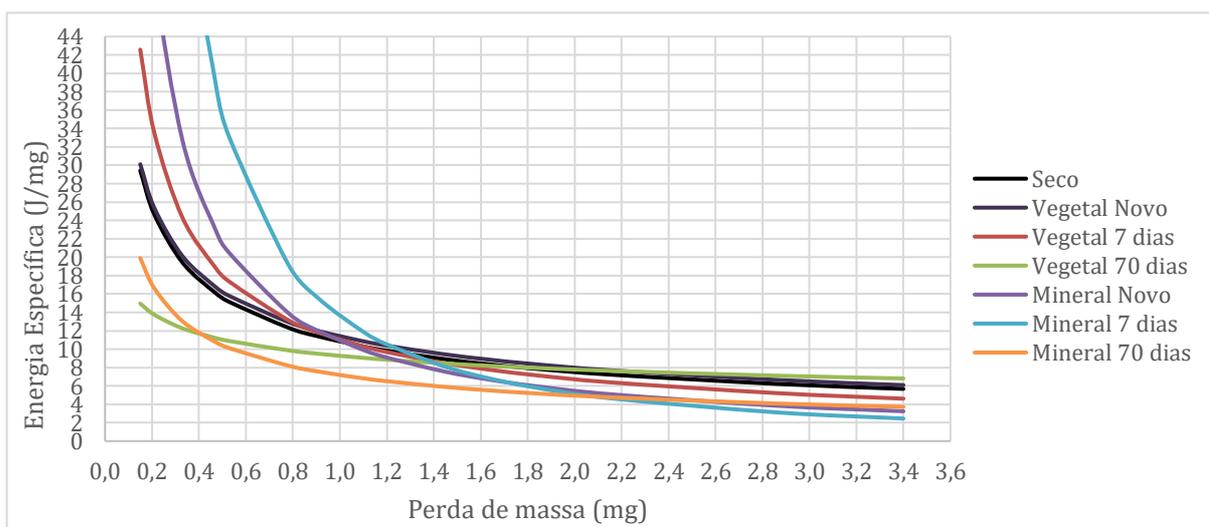


Figura 4.46. Curvas ajustadas por um modelo de potências para os ensaios de esclerometria pendular realizados na superfície de alumínio submerso em 1,2 mL de FC a 8,0% e em ambiente seco.

Para os ensaios utilizando corpos de provas de alumínio o FC de base vegetal após setenta dias de contaminação microbiológica, em pequenas profundidades de ensaio, assim como o FC de base mineral na mesma condição, obteve o melhor desempenho.

A Tabela 4.10 mostra o bom ajuste das curvas, quando os coeficientes de correlação R^2 são próximos da unidade.

Tabela 4.10. Parâmetros característicos do ajuste em modelo de potência (riscamento em CPs de alumínio).

Ambiente	K	q	R^2
Seco	10,827	-0,527	0,9860
Úmido (FC)			
Vegetal 8% Novo	11,4	-0,512	0,9906
Vegetal 8% 7 dias	11,029	-0,712	0,9842
Vegetal 8% 70 dias	9,272	-0,252	0,9948
Mineral 8% Novo	10,895	-0,991	0,9769
Mineral 8% 7 dias	13,582	-1,398	0,9866
Mineral 8% 70 dias	7,185	-0,537	0,9882

4.2.7.4 Esclerometria Pendular utilizando FCs a 10,0%

Os resultados dos ensaios tribológicos de esclerometria pendular avaliando o desempenho dos dois FCs investigados na concentração de 10,0% e ambiente seco, quando do riscamento do aço inoxidável austenítico V304UF são apresentados nas Figs. 4.47 e 4.48.

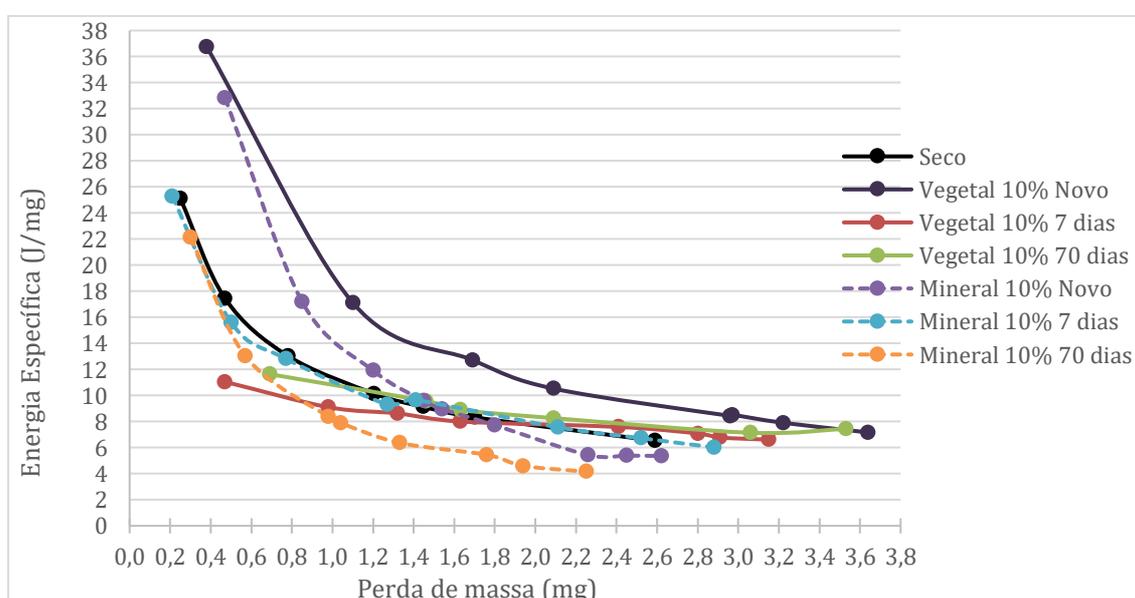


Figura 4.47. Energia específica consumida no riscamento de superfície do aço inoxidável submerso em 1,2 ml de fluido de corte a 10,0% e em ambiente seco. Pontos experimentais.

Os piores resultados obtidos nos ensaios de esclerometria pendular utilizando os dois FCs na concentração de 10,0 % foram para os FCs novos. Nessa concentração de uso esses fluidos naturalmente apresentam maiores poderes lubrificantes que os FCs em menores concentrações (3,0%, 5,0% e 8,0%) devido a menor presença de água de diluição. A expectativa de redução da energia específica com esses fluidos, entretanto, não se confirmou na prática.

A Figura 4.35 mostrou que nessa concentração (10,0%), nos ensaios de deslizamento, o FC base vegetal apresentou menores coeficientes de atrito que o de base mineral, o que também mostra incoerência com os resultados de esclerometria pendular, onde o FC base vegetal proporcionou maiores energias de riscamento que o de base mineral. Contudo comparando-se o FC de base vegetal com o de base mineral, observa-se no mineral outra característica que favorece o seu desempenho em relação ao vegetal após a contaminação microbiológica. Esses fluidos (base mineral) apresentaram ângulos de contato menores que os FC base vegetal, portanto, maior poder de molhabilidade, o que pode justificar o melhor desempenho nos ensaios de esclerometria pendular.

Os ensaios de esclerometria pendular dependem tipicamente das características lubrificantes e refrigerantes dos FCs, agindo simultaneamente. Se por um lado a lubrificação tende a reduzir o atrito, facilitando o deslizamento e arrancamento de material, por outro, a refrigeração reduz temperatura e mantém a resistência do material elevada, dificultando o cisalhamento e arrancamento de material. Esse fato dificulta a análise porque não há uma congruência coerente nessas propriedades dos FCs. A Fig. 4.13. mostra que os FCs de base mineral contaminados apresentam menores coeficientes de condutividade térmica que os de base vegetal, resultados que mais uma vez não contribuem para explicar estes resultados, pois menor condutividade significa em menor capacidade de retirar calor do sistema, portanto, a temperatura local tende a ser maior, facilitando o cisalhamento.

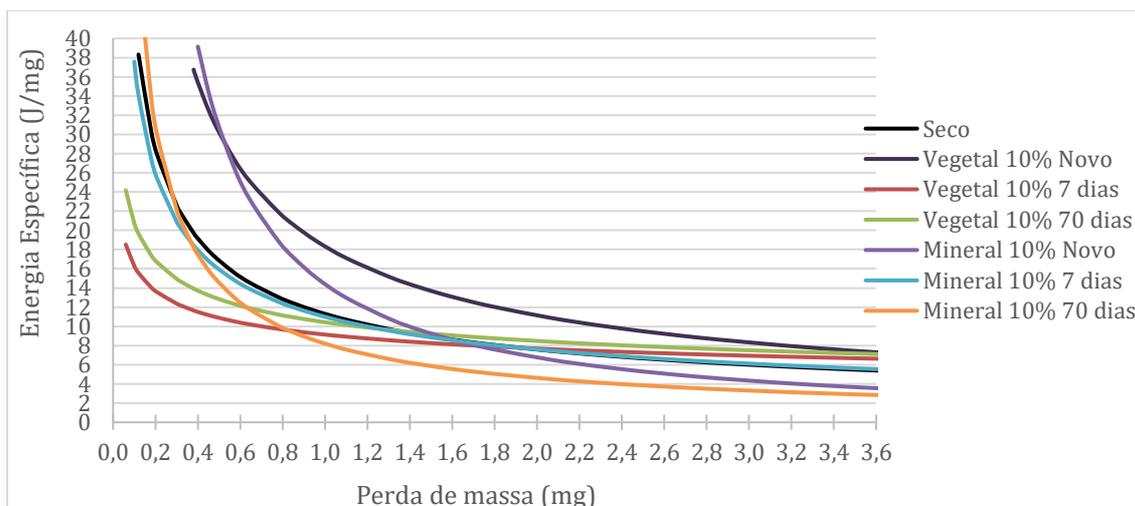


Figura 4.48. Curvas geradas no riscamento do aço inoxidável utilizando FCs a 10,0% e em ambiente seco, ajustadas por um modelo de potências.

A Tabela 4.11 mostra o bom ajuste das curvas, quando os coeficientes de correlação R^2 são próximos da unidade.

Tabela 4.11. Parâmetros característicos do ajuste em modelo de potência (FCs 10,0% riscamento em V304UF).

Ambiente	K	q	R^2
Seco	11,299	-0,576	0,9925
Úmido (FC)			
Vegetal 10% Novo	18,329	-0,719	0,9943
Vegetal 10% 7 dias	9,141	-0,251	0,9608
Vegetal 10% 70 dias	10,427	-0,299	0,9701
Mineral 10% Novo	14,397	-1,092	0,9813
Vegetal 10% 7 dias	10,991	-0,534	0,9903
Vegetal 10% 70 dias	8,195	-0,826	0,9881

Considerações gerais sobre os ensaios nas quatro concentrações testadas

O comportamento de redução da energia específica nos ensaios de esclerometria pendular (SALES, et al. 1999; FINZI, et al. 2016), conforme o aumento da profundidade do risco (perda de massa), utilizando o aço ABNT NB 8640, independente das diversas condições de lubrificação por eles utilizadas, também foi observado para todos os ensaios de

esclerometria realizados com os dois fluidos de corte neste estudo. Esse comportamento foi apontado por Franco (1989) resultado de dois fatores. O primeiro deles, descrito por Backer e colaboradores (1952), como efeito de escala e o segundo fator correspondente aos mecanismos de formação do cavaco (BRYGGMAN et al., 1985).

Assim como descrito por Sales et al. (1999), onde os fluidos com maior capacidade de retirada de calor não obtiveram o melhor desempenho, esperava-se que os fluidos de corte novos apresentassem esse comportamento quando comparados aos submetidos a contaminação microbiana. Em todos os grupos de ensaios de riscamento os FCs contaminados por sete e setenta dias, principalmente aqueles cuja base era mineral, apresentaram a menor energia específica para o riscamento do aço inoxidável. Como uma parcela considerável da energia necessária para riscar/retirar o cavaco é convertida em energia térmica, que causa o amolecimento do material facilitando o seu cisalhamento (MACHADO et al., 2015), os fluidos com maior capacidade de retirada de calor possivelmente impediram esse processo, apresentando assim as maiores energias específicas (SALES, 1999).

Devido suas características dinâmicas, o ensaio de riscamento de superfícies utilizando a esclerometria pendular muito se aproxima dos ensaios de usinagem. Entretanto, os resultados obtidos a partir desses ensaios foram complementares aos demais ensaios até aqui consolidados. O fato a ser destacado nos ensaios de esclerometria pendular é o ganho em capacidade lubrificante de alguns fluidos após a contaminação microbiológica, que pode ocorrer tanto pela presença física do microrganismo no FC quando pelo resultado de seu consumo dos componentes da fórmula e metabolismo, quebrando as longas cadeias de hidrocarbonetos, principalmente do FC de base mineral.

Estes resultados, especificamente aqueles com os dois FCs na concentração de 8,0% serão reforçados quando apresentados a seguir os resultados no processo de torneamento.

4.2.8. Desempenho refrigerante - Curva de resfriamento

A capacidade refrigerante dos dois FCs investigados foi determinada para as três condições testadas (novo; com sete e setenta dias de contaminação microbiológica “*in vitro*”) e nas quatro concentrações propostas (3,0%, 5,0%, 8,0% e 10,0%) através da obtenção das curvas de resfriamento dos corpos de prova (CPs). Após aquecimento do CP, em temperatura de 350 °C por uma hora, o mesmo era colocado no torno e, com o eixo árvore em movimento, o FC era aplicado. O resfriamento do CP era monitorado em função do tempo, e o intervalo de tempo para a temperatura cair de 296 °C para 41,0 °C foi utilizado como base para

classificação das diversas atmosferas refrigerantes. Os resultados são apresentados na Fig. 4.49. Foram realizados 72 ensaios entre testes, réplicas e tréplicas. Durante os testes a temperatura média ambiente era de 31,0 °C.

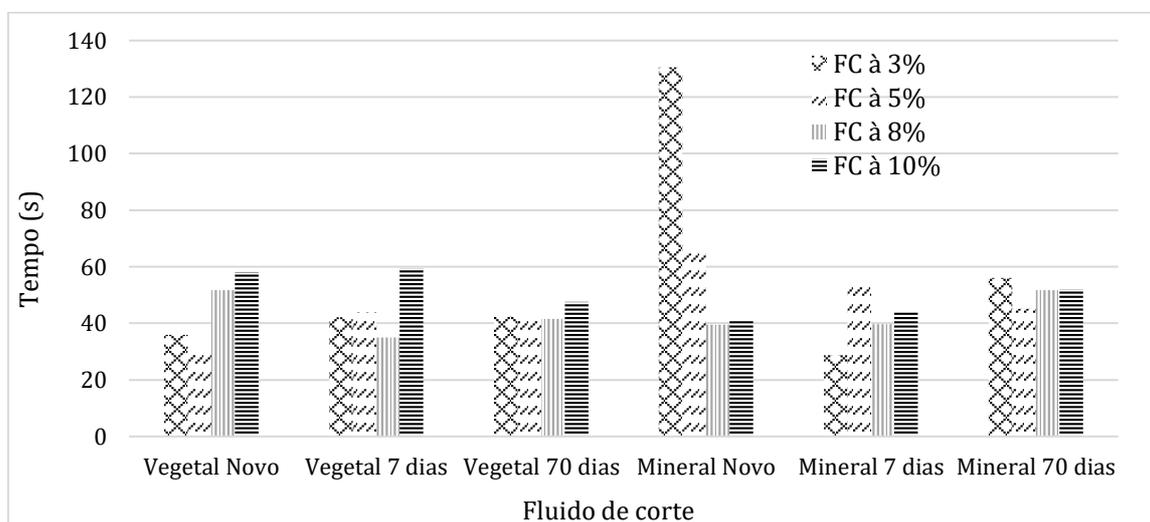


Figura 4.49. Tempo médio de resfriamento dos corpos de prova de 296 °C a 41 °C, submetidos aos ensaios de resfriamento em ambiente úmido (presença de fluido de corte)

O tempo de resfriamento médio dos CPs testados em ambiente seco foi de 5.323,0 segundos (88,7 minutos). Em relação ao tempo total gasto para o resfriamento dos CPs de 296 °C a 41 °C, 50,0% dos fluidos testados obteve piora no desempenho da propriedade refrigerante com a contaminação. Comparando os tempos de resfriamento dos corpos de prova ao aplicar os FCs após setenta dias de contaminação microbiológica, com os tempos obtidos quando da utilização dos fluidos novos, houve redução de capacidade refrigerante (ou aumento no tempo) de: 18,0% e 29,4% para os FCs de base vegetal nas concentrações de 3,0% e 5,0%, respectivamente, e de 30,8% e 25,4% para os FCs de base mineral nas concentrações de 8,0% e 10,0%, respectivamente. As demais concentrações, dos dois tipos de FC, mostraram ganho na capacidade refrigerante (redução no tempo de resfriamento) em uma ou nas duas condições de contaminação (por 7 e setenta dias), em comparação com os FCs novos (Fig. 4.49.).

As curvas de resfriamento obtidas após realização dos ensaios de resfriamento, dos dois fluidos de corte, nas três condições e nas quatro concentrações testadas são mostradas na Fig. 4.50 (a) 3,0%, (b) 5,0%, (c) 8,0% e (d) 10,0%.

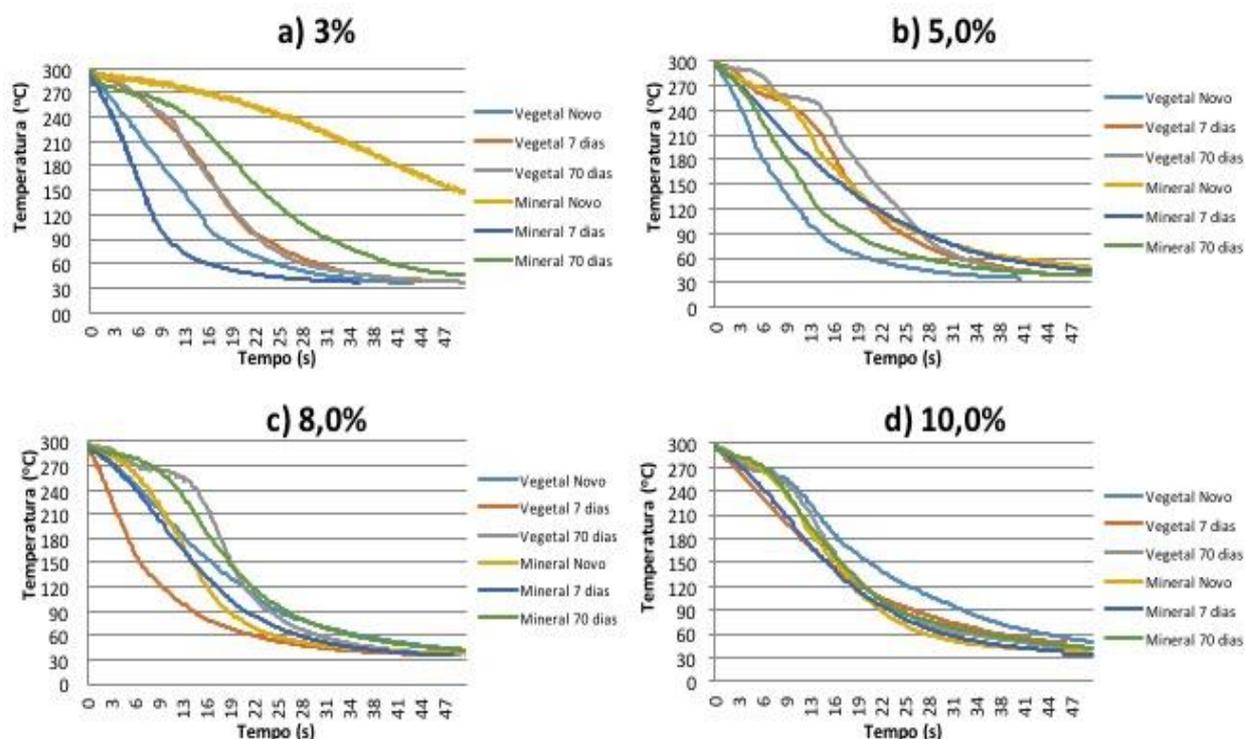


Figura 4.50 – Desempenho refrigerante dos FCs de base vegetal e mineral para a concentração de 3,0% (a), 5,0% (b), 8,0% (c) e 10,0% (d). Em todos os desempenhos mostrados são representadas as três condições investigadas.

Considerando o comportamento de cada faixa de concentração dos dois FCs investigados quanto a propriedade refrigerante, na concentração de 3,0%, o FC de base mineral na condição após sete dias de contaminação microbiológica, obtendo tempo total de resfriamento de 28,8s obteve o melhor desempenho refrigerante e na condição de novo obteve o pior desempenho com tempo total de resfriamento de 130,64s. Essa melhora no desempenho pode ser atribuída à redução sofrida tanto no ângulo de contato deste fluido (melhora da sua molhabilidade) com a superfície do metal, quanto em sua viscosidade cinemática, ambos ocorridos após a contaminação microbiana. Essas alterações em seus parâmetros iniciais, como as reduções do ângulo de contato em 18,0% e do calor específico em 8,2%, bem como um aumento de 3,5% em sua difusividade térmica, contudo, são fatores que somados podem não ser suficientes para explicar a mudança de comportamento deste fluido.

Comparando-se os FCs na concentração de 5,0%, após sete dias de contaminação microbiológica “*in vitro*”, os FCs com melhor (vegetal) e pior desempenho (mineral) inverteram as posições. O vegetal a 5,0% piorou sua propriedade refrigerante enquanto o de base mineral resfriou o CP em menor tempo que o seu FC base novo. Uma possível explicação para essa inversão nas propriedades, para esses FCs, no caso do FC de base

vegetal novo em relação ao contaminado por sete dias pode estar associada a uma redução de 51,0% em sua difusividade térmica e aumento de 88,7% em seu calor específico, fatores esses acompanhados de suave aumento em sua viscosidade cinemática (6,1%), bem como aumento do seu ângulo de contato (2,0% - após 2 segundos de contato da gota séssil com a superfície)

Para a concentração de 8,0%, o FC de base vegetal após sete dias de contaminação microbiológica obteve melhor desempenho refrigerante em relação às demais concentrações. As modificações sofridas por esse fluido foram relacionadas à redução da viscosidade cinemática nesta condição, que percorreu caminho inverso para o FC de base mineral na mesma concentração. Os FCs utilizados na concentração de 10,0% tiveram curvas semelhantes, com exceções nos 10 segundos iniciais e para o FC de base vegetal novo, o qual obteve o pior desempenho e uma curva de resfriamento peculiar.

Na Figura 4.51 são mostradas as curvas de resfriamento dos corpos de prova quando utilizados os dois FCs: novos (Fig. 4.51.a.), após sete dias de contaminação microbiológica (Fig. 4.51.b.) e após setenta dias de contaminação microbiológica (Fig. 4.51.c.).

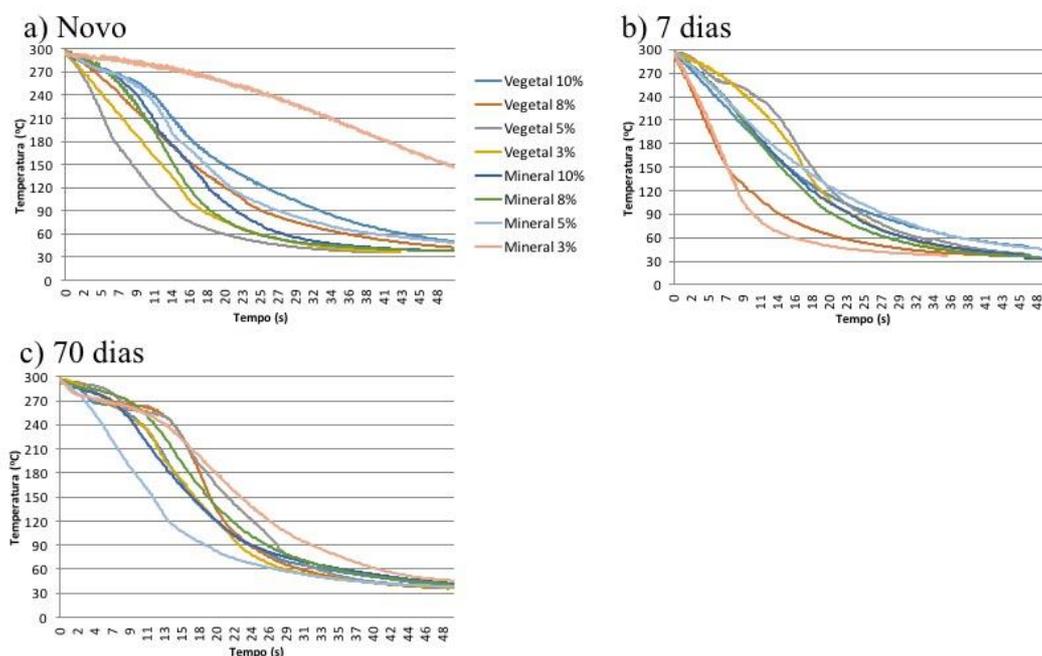


Figura 4.51 – Desempenho refrigerante dos FCs de base vegetal e mineral de acordo com cada condição testada: (a) FCs novos, (b) FCs após sete e (c) FCs após setenta dias de contaminação microbiológica “*in vitro*”.

Considerando-se o melhor desempenho refrigerante em cada faixa de concentração testada e ao mesmo tempo comparando-se as duas bases (mineral x vegetal), ao atribuir o número 1,00 para aquele, dentre os FCs novos, que obteve o menor tempo de resfriamento é possível interpretar o comportamento dos demais fluidos dentro da mesma faixa de

concentração em relação ao melhor colocado (Tab. 4.12.), em termos de ganho ou perda de desempenho. Os demais desempenhos dentro da mesma faixa de concentração são classificados percentualmente em relação ao FC novo (mineral ou vegetal) que obteve o melhor resultado.

Outra forma de analisar os demais desempenhos refrigerantes, de forma a ranqueá-los em relação ao FC novo, que obteve o melhor desempenho, foi realizada atribuindo-se o número um a esse fluido e percentuais aos demais fluidos em relação ao melhor desempenho. Dessa forma o FC de base vegetal novo na concentração de 5,0% se tornou a referência para o cálculo percentual do desempenho de todos os demais fluidos (Tab. 4.13.).

Tabela 4.12. Desempenho refrigerante em cada concentração de uso de dos FCs de base mineral e vegetal nas três condições testadas.

Concentração	Condição de biodegradação					
	FC de base vegetal			FC de base mineral		
	Novo	7 dias	70 dias	Novo	Após 7 dias	70 dias
3,0%	1,00	1,17	1,18	3,64	0,80	1,56
5,0%	1,00	1,40	1,39	2,07	1,76	1,44
8,0%	1,30	0,88	1,05	1,00	1,00	1,31
10,0%	1,41	1,44	1,16	1,00	1,07	1,26

Analisando cada fluido investigado, comparado aos demais de mesma concentração, determina-se o alcance do desempenho. Desta forma, foi possível determinar o quanto a contaminação microbológica interagiu com a capacidade refrigerante de cada FC comparado a sua preparação nova (Tab. 4.13.).

Tabela 4.13. – Ranqueamento do desempenho refrigerante dos FCs de base mineral e vegetal nas três condições testadas e quatro concentrações de uso a partir do FC que obteve o melhor resultado.

Concentração	Condição de biodegradação					
	FC de base vegetal			FC de base mineral		
	Novo	7 dias	70 dias	Novo	Após 7 dias	70 dias
3,0%	1,15	1,35	1,35	4,17	0,92	1,79
5,0%	1,00	1,40	1,39	2,07	1,76	1,44
8,0%	1,65	1,12	1,33	1,26	1,27	1,66
10,0%	1,85	1,90	1,52	1,32	1,41	1,65

Na concentração de 3,0% o melhor desempenho entre os fluidos novos foi para o fluido de base vegetal. O fluido de base mineral novo neste grupo levou 3,64 vezes o tempo do fluido vegetal novo para resfriar o corpo de provas. Contudo, o fluido de base mineral após

sete dias de contaminação microbiológica apresentou um tempo de resfriamento 20,0% melhor que o do fluido de base vegetal novo. Na concentração de 5,0% o melhor desempenho foi para o fluido de base vegetal novo e neste grupo, nenhum outro fluido melhorou esse tempo. Na concentração de 8,0% o melhor tempo foi para o FC de base mineral novo. Entretanto, o FC de base vegetal após sete dias de contaminação microbiológica apresentou ganho em 12,0% no tempo de resfriamento dos CPs. Na concentração de 10,0% o FC de base vegetal apresentou melhora em sua propriedade refrigerante a medida em que o fluido foi contaminado por maior carga microbiana, o que não foi observado no FC de base mineral.

Entretanto a análise a partir do melhor desempenho (Tab. 4.13.), obtido pelo FC de base vegetal novo na concentração de 5,0% houve principalmente piora da capacidade refrigerante dos demais FCs nas três condições testadas, com apenas uma exceção, que foi o FC de base mineral após sete dias de contaminação microbiológica

Os dados consolidados com os melhores e piores desempenhos refrigerantes dos FCs testados são apresentados na Fig. 4.52. Em a) o melhor desempenho em cada concentração testada é apresentado e em b) os piores desempenhos refrigerantes em cada concentração. Excetuando o FC de base mineral a 10% novo que, que possui uma curva de resfriamento do corpo de prova mais suave inicialmente, o comportamento das curvas obtidas quando da utilização dos FCs nas concentrações 3,0% (base mineral após sete dias), 5,0% (base vegetal novo) e 8,0% (base vegetal após sete dias) apresentam características semelhantes nas suas curvas de refrigeração (Fig. 4.52a). Para os piores desempenhos refrigerantes (Fig. 4.52b), o FC de base mineral novo na concentração de 3,0% promove um resfriamento mais lento que os demais: a 8,0% (base mineral após setenta dias de contaminação microbiológica), 5,0% (base mineral novo) e 10,0% (base vegetal após sete dias). Esses três fluidos, após 26 segundos de ensaio, seguem praticamente a mesma trajetória de curva.

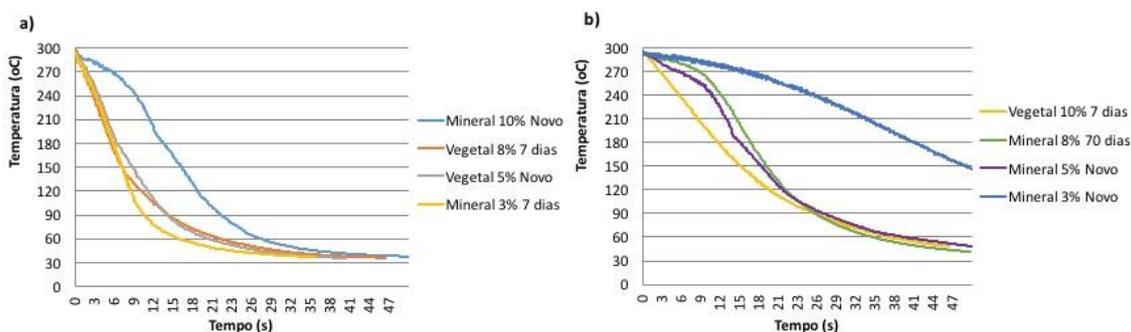


Figura 4.52 – Desempenho refrigerante dos FCs de base vegetal e mineral de acordo com (a) melhores desempenhos em cada concentração testada e (b) piores desempenhos em cada concentração testada.

Como descrito na metodologia (capítulo 3), a capacidade refrigerante dos fluidos foi calculada através do coeficiente de troca de calor por convecção, h (Tab. 4.14). Considerando-se que não houve variação de temperatura espacial no corpo de provas, foi utilizado o método da capacitância. Para esse método, foi utilizado o cálculo do número adimensional de Biot (Bi), que indica a existência ou não de um gradiente de temperatura interno (Sissom e Pits, 1979). A validade dos resultados parte do ponto de que os valores obtidos foram menores que 0,1 e através desse valor obtido foi possível determinar o h , com erro em torno de 5% (INCROPERA; DEWITT; BERGMAN, 2000). Todas as equações utilizadas para os cálculos foram descritas no capítulo 3.

Fluido de corte		Tempo total de aquisição (s)	$T_r - T_\infty$ (°K)	$T_i - T_\infty$ (°K)	Módulo adimensional de Biot	Coefficiente de troca de calor por convecção, h (W/m ² K)	
VEGETAL	3%	Novo	35,9	283	538	0,060	157,28
		7 dias*	42,1	283	538	0,051	133,92
		70 dias*	42,3	283	538	0,051	133,29
	5%	Novo	31,3	283	538	0,069	180,22
		7 dias	43,8	283	538	0,049	128,83
		70 dias	43,5	283	538	0,049	129,72
	8%	Novo	51,6	283	538	0,042	109,23
		7 dias	35,0	283	538	0,062	161,34
		70 dias	41,6	283	538	0,052	135,53
	10%	Novo	58,0	283	538	0,037	97,19
		7 dias	59,5	283	538	0,036	94,80
		70 dias	47,7	283	538	0,045	118,30
MINERAL	3%	Novo	130,6	283	538	0,016	43,18
		7 dias	28,8	283	538	0,075	195,85
		70 dias	56,0	283	538	0,038	100,72
	5%	Novo	64,7	283	538	0,033	87,19
		7 dias	55,0	283	538	0,039	102,61
		70 dias	45,2	283	538	0,048	124,84
	8%	Novo	39,6	283	538	0,054	142,48
		7 dias	39,7	283	538	0,054	142,00
		70 dias	51,8	283	538	0,042	108,87
	10%	Novo	41,2	283	538	0,052	136,95
		7 dias	44,0	283	538	0,049	128,24
		70 dias	52,0	283	538	0,041	108,53
Seco		2983,0	283	264	0,001	1,89	

Tabela 4.14. Determinação de Bi e h para cada fluido testado.

N

Figura 4.53

os valores de h e de Biot são apresentados, para cada grupo de fluidos de corte testados, de acordo com a concentração e na Fig. 4.54 é feito um ranqueamento da capacidade refrigerante de todos os FCs, a partir dos valores calculados de h (W/m²K). Em conformidade aos resultados já anteriormente descritos, a maior capacidade refrigerante foi determinada para o FC de base mineral na concentração de 3,0%, na condição em que foi submetido a

contaminação microbológica por sete dias, apresentando o maior valor de h (195,85 W/m²k). O ambiente seco, como esperado obteve o resultado de pior meio refrigerante. O número adimensional de Biot também é apresentado.

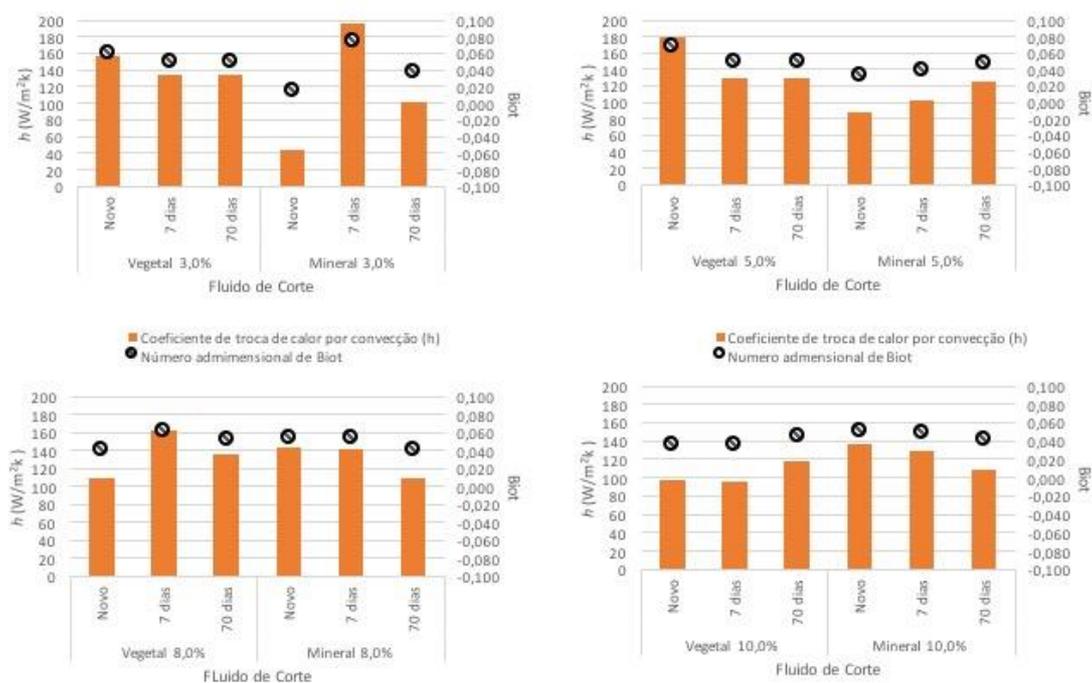


Figura 4.53. Capacidade refrigerante de cada fluido testado a partir do valor calculado de Biot e h .

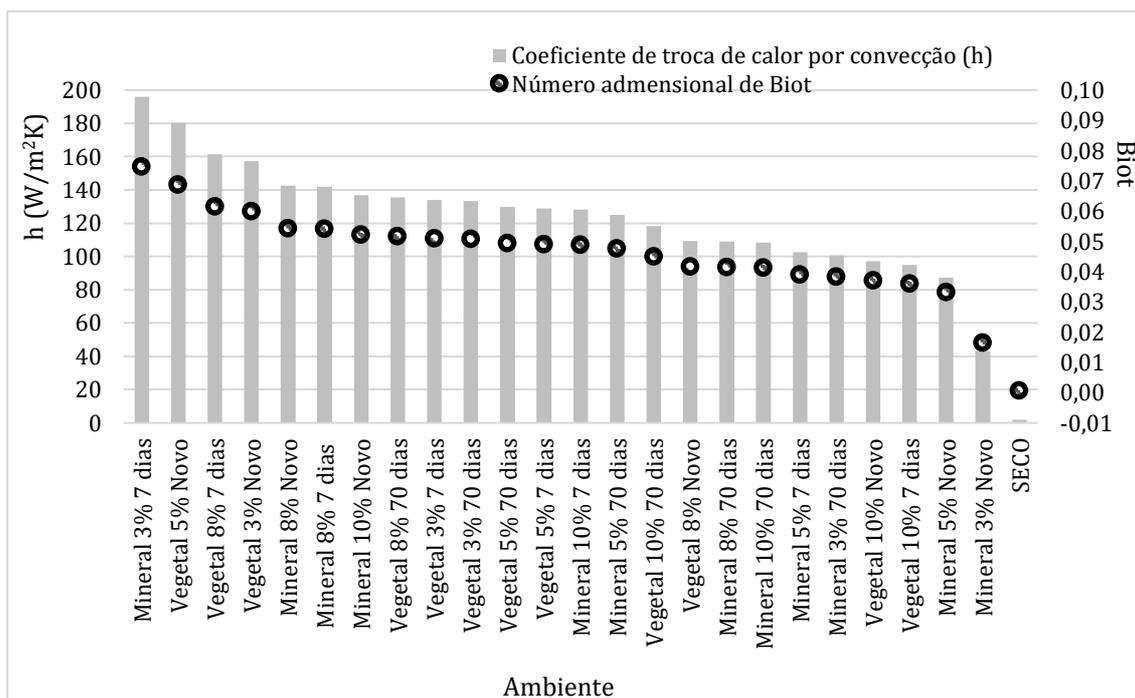


Figura 4.54. Ranqueamento da capacidade refrigerante dos ambientes testados (seco e úmidos) da maior para a menor capacidade de acordo com o coeficiente de troca de calor por convecção, h (W/m²K).

4.2.9. Desempenho Lubri-refrigerante - Processo de furação

Os desempenhos dos dois FCs (base vegetal e base mineral) no processo de furação são apresentados nas Figs. 4.55 a 4.58 para as concentrações de 3,0%, 5,0%, 8,0% e 10,0%, respectivamente, e os resultados são comparados aos obtidos em ambiente seco. A furação por 20 segundos da peça de trabalho mostrou melhor desempenho para o FC de base vegetal novo em relação ao FC de base mineral novo e ao ambiente seco, para praticamente todas as concentrações testadas. Na concentração de 10,0% foi a exceção, quando se observou um desempenho estatisticamente similar para os dois fluidos novos (vegetal e mineral).

Em uma análise geral, após a contaminação microbiológica por sete e setenta dias, apesar do maior alcance em profundidade para o FC de base vegetal a 3,0% em relação ao mineral, o mesmo apresentou maior redução em desempenho (29,16 % após sete dias e 40,76 % após setenta dias) que o FC de base mineral nas mesmas condições (12,36% e de 24,34%).

A demanda por FCs biodegradáveis para uma produção mais limpa e redução no uso de óleos minerais que causam degradação ambiental pode ser encontrada em muitos regulamentos de países como Áustria, Canadá, Hungria, Japão, Polônia, Escandinávia, Suíça, EUA e UE (BARTZ, 2006). Os fluidos de corte à base de óleo vegetal são ambientalmente amigáveis, renováveis, menos tóxicos e econômicos na redução dos custos de tratamento de

seus resíduos devido à sua inerente maior biodegradabilidade (CETIN et al., 2011). Contudo, neste estudo foi o fluido de corte mais prejudicado em desempenho com a contaminação, devido a estas características.

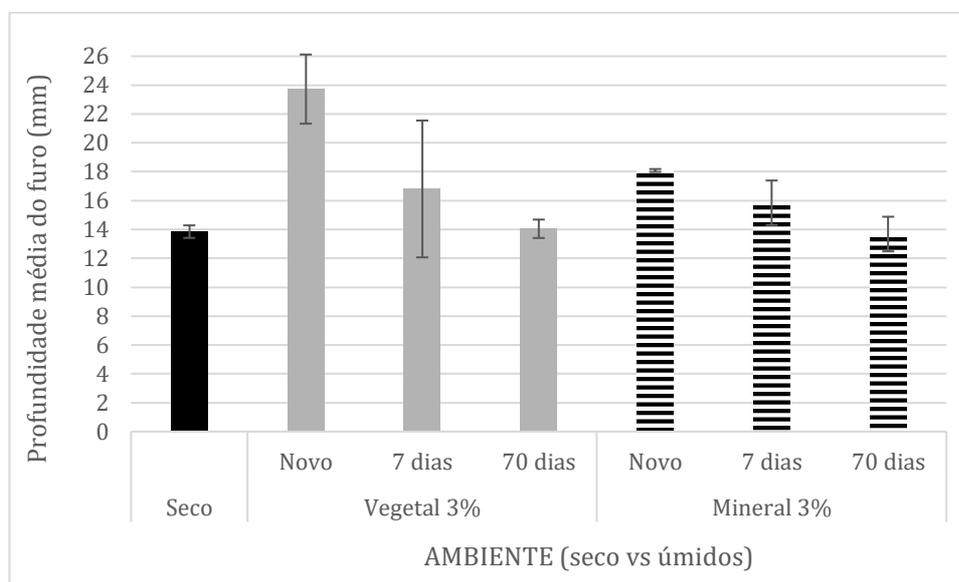


Figura 4.55. Profundidade alcançada pelos furos utilizando FC a 3,0%, brocas de 8 mm de diâmetro, rotação de 1770 rpm, carga de 19,90 N, durante 20s. Os resultados em ambiente seco também são apresentados.

Em todas as concentrações testadas (3,0%, 5,0%, 8,0% e 10,0%) (Figs. 4.55 a 4.58) o mesmo comportamento de queda em profundidade do furo é detectado para o mesmo tempo de usinagem da broca (20s), nas três condições investigadas (novo, após sete e setenta dias de biodegradação microbológica). A exceção foi para o FC de base mineral a 8,0% com o qual a profundidade dos furos manteve-se a mesma para duas das condições, novo e após sete dias de contaminação microbológica. Na condição após setenta dias de contaminação houve redução em profundidade alcançada de 29,25 % (Fig. 4.56).

Além de prolongar a vida da ferramenta, aumentar a precisão dimensional, e diminuir a quantidade de energia consumida, quando comparado ao ambiente seco, a aplicação eficaz de FCs pode também diminuir a rugosidade da superfície da peça (METALS HANDBOOK, 1989).

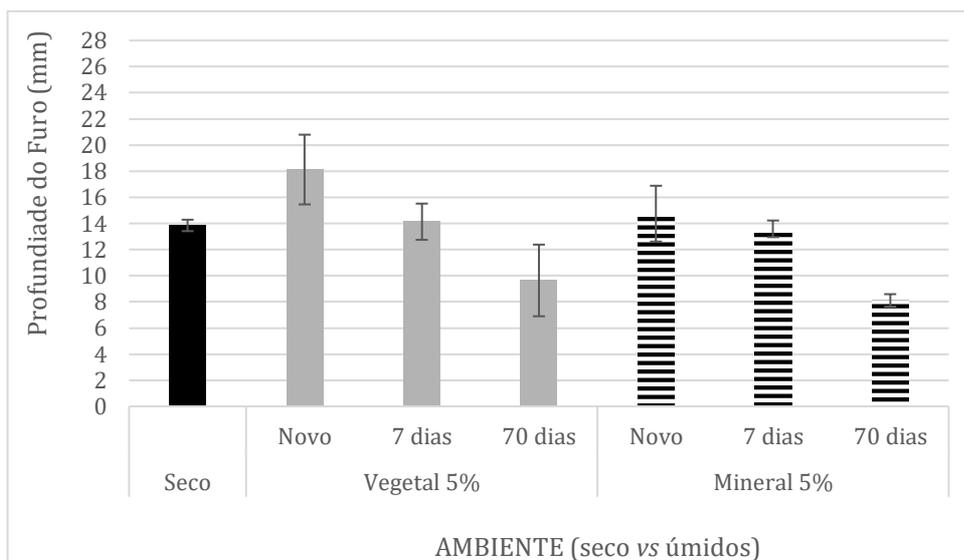


Figura 4.56. Profundidade alcançada pelos furos utilizando FC a 5,0%, brocas de 8 mm de diâmetro, rotação de 1770 rpm, carga de 19,90 N, durante 20s. Os resultados em ambiente seco também são apresentados.

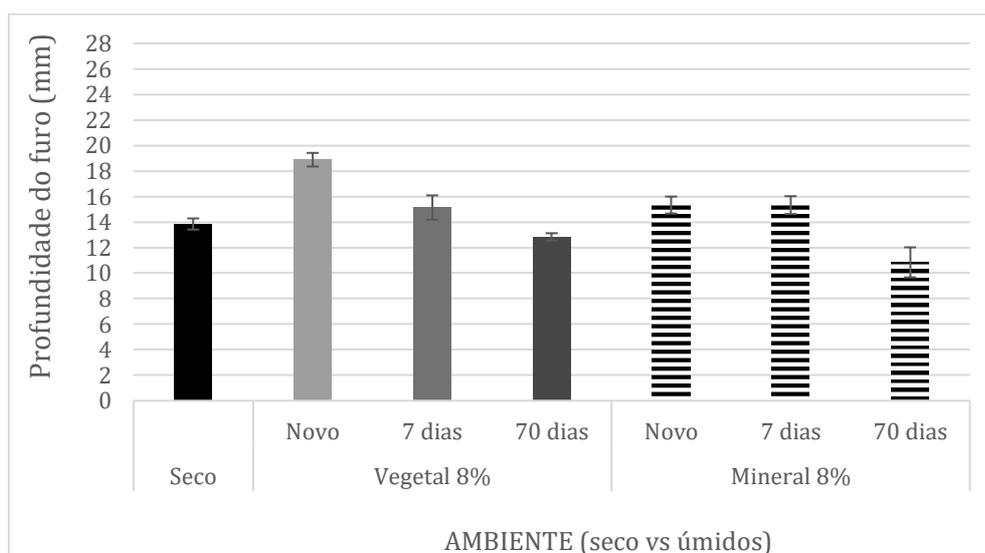


Figura 4.57. Profundidade alcançada pelos furos utilizando FC a 8,0%, brocas de 8 mm de diâmetro, rotação de 1770 rpm, carga de 19,90 N, durante 20s. Os resultados em ambiente seco também são apresentados.

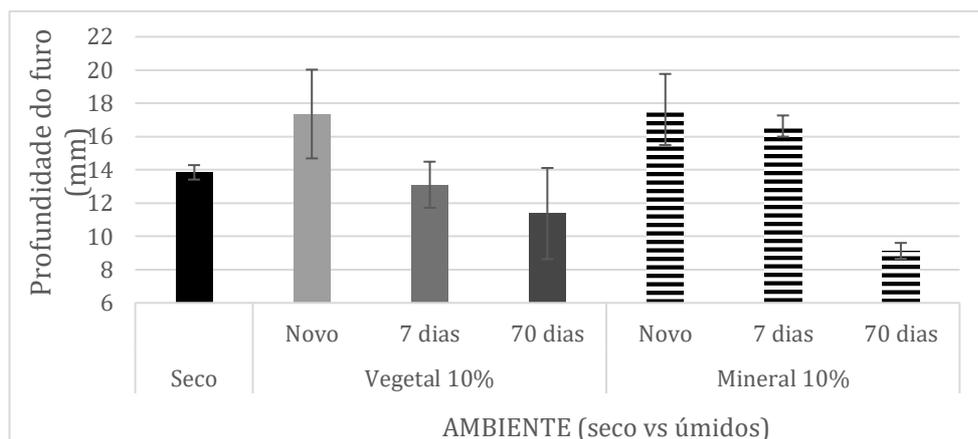


Figura 4.58. Profundidade alcançada pelos furos utilizando FC a 10,0%, brocas de 8 mm de diâmetro, rotação de 1770 rpm, carga de 19,90 N, durante 20s. Os resultados em ambiente seco também são apresentados.

Observa-se, portanto, o comprometimento do desempenho de propriedades lubrificantes dos dois FCs causado pelo aumento da carga microbiana após sete e setenta dias de biodegradação artificial “*in vitro*”, sendo o pior efeito encontrado quando da contaminação por longo prazo (setenta dias) no fluido de base mineral na concentração de 10% (Fig. 4.59). Entretanto, os desempenhos obtidos com a utilização de FC de base vegetal, nas concentrações de 3,0% e 5,0%, após setenta dias de biodegradação apresentaram as maiores quedas em profundidade alcançada pela ferramenta de corte, (40,79% e 46,82% respectivamente) em comparação aos fluidos a 3,0% e 5,0% novos, respectivamente, como pode ser observado na Fig. 4.59.

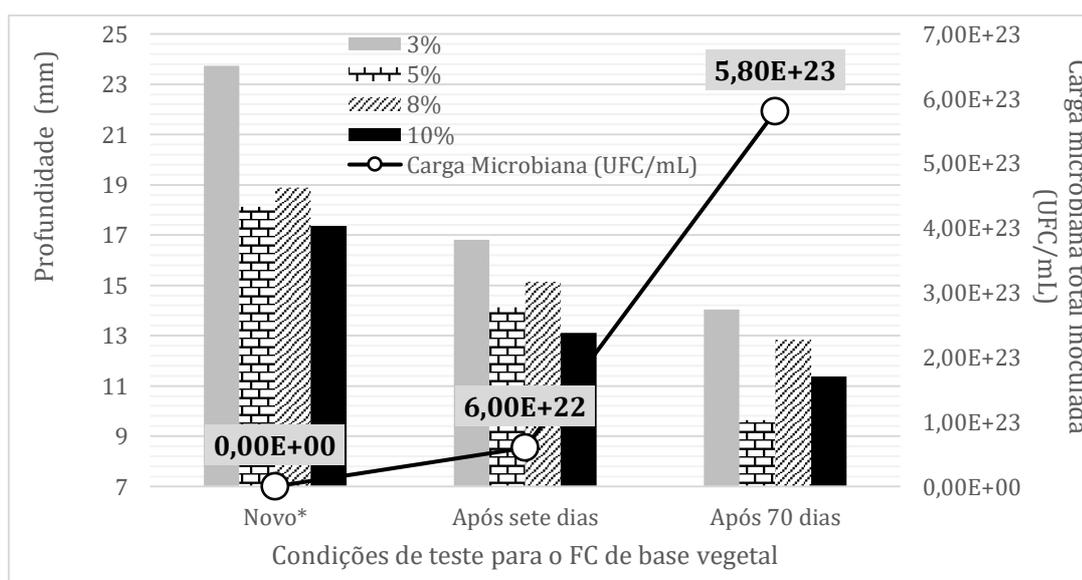


Fig. 4.59. Desempenho do FC de base vegetal, nas quatro concentrações testadas e nas três condições propostas em relação a carga microbiana inoculada. Parâmetros de corte: brocas de 8 mm de diâmetro, rotação de 1770 rpm, carga de 19,90 N, por 20s.

Após sete dias de contaminação microbiológica as mudanças sofridas pelo FC de base mineral pouco alteraram o seu desempenho lubri-refrigerante no processo quando comparado ao FC novo (Fig. 4.63.). O efeito da biodegradação após sete dias de contaminação microbiológica, período após o qual o FC passou a ter uma população microbiana inoculada de $6,0 \times 10^{22}$ UFC/mL e uma contagem média de viáveis de $1,0 \times 10^5$ UFC/mL, foi nula para a concentração de 8,0%, visto que os furos mantiveram a profundidade em relação ao FC novo. Para as concentrações de 5,0% e 10,0%, as alterações na profundidade dos furos foram pouco expressivas ($\approx 1,0$ mm) 7,8% e 5,6% respectivamente. Na concentração de 3,0% a redução foi de 2,24 mm (12,4%).

A maior variação observada, quanto ao alcance dos furos produzidos, foi na condição após setenta dias de contaminação microbiológica, com perda severa em alcance da ferramenta de corte na concentração de 10,0% (48,2%), seguido pelas concentrações de 5,0% (45,0%), 8,0% (29,2%) e 3,0% (24,4%).

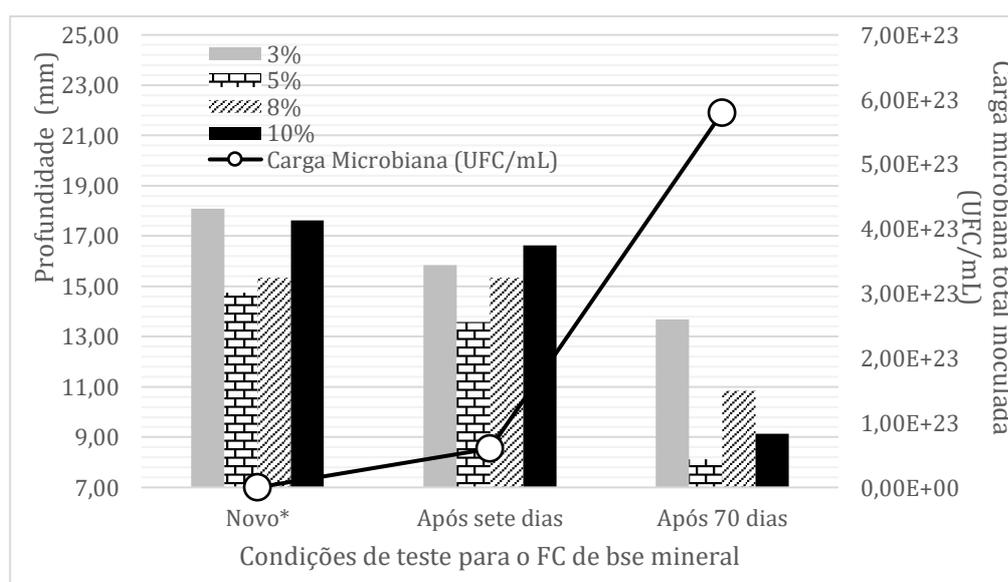


Fig. 4.60. Desempenho do FC de base mineral, nas quatro concentrações testadas e nas três condições propostas em relação a carga microbiana inoculada. Parâmetros de corte: brocas de 8 mm de diâmetro, rotação de 1770 rpm, carga de 19,90 N, por 20s.

Os resultados do processo de furação, para os dois fluidos de corte quanto ao desempenho em profundidade, considerando os valores médios obtidos de todas as concentrações testadas (3,0%, 5,0%, 8,0% e 10,0%) são apresentados na Fig. 4.61. Para o ensaio de furação o desempenho do FC de base vegetal obteve melhores resultados que o de base mineral. Apesar da concentração a 3,0% não se tratar de uma concentração de uso

recomendada pelos fabricantes tanto do FC de base mineral quanto o de base vegetal, quando utilizada essa concentração no processo de furação, para o FC de base vegetal, os resultados foram significativamente superiores ($P<0,01$) às outras três concentrações testadas (5,0%, 8,0% e 10,0%).

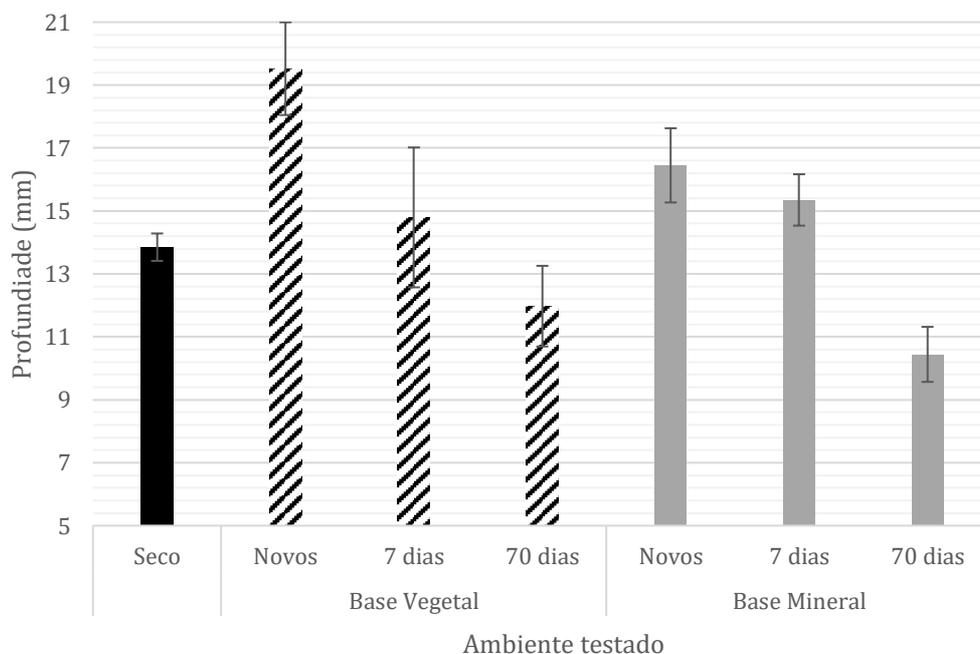


Figura 4.61. Média de profundidade obtida para os dois FCs nas diversas concentrações, nas três condições testadas para o ambiente úmido comparados ao ambiente seco. Parâmetros de corte: brocas de 8 mm de diâmetro, rotação de 1770 rpm, carga de 19,90 N, por 20s.

Os desempenhos dos dois FCs no processo de furação também foram avaliados quanto aos percentuais de perda em profundidade de alcance da broca em relação ao Fluido que proporcionou a maior profundidade ($L=23,72$ mm). Foi atribuído 1,00 ao FC de base vegetal na concentração de 3,0% (devido ao melhor desempenho no processo) e para os demais fluidos foram calculados os percentuais correspondentes as profundidades obtidas pelos mesmos durante os ensaios (Tab. 4.15.).

Tabela 4.15. – Ranqueamento do desempenho dos dois FCs nas três condições propostas, no processo de furação a partir do FC que obteve o melhor resultado (1,0).

Concentração	Fluido de corte					
	FC de base vegetal			FC de base mineral		
	Novo	7 dias	70 dias	Novo	Após 7 dias	70 dias
3,0%	1,00	0,71	0,59	0,76	0,67	0,58
5,0%	0,76	0,60	0,41	0,62	0,57	0,34

8,0%	0,80	0,64	0,54	0,65	0,65	0,46
10,0%	0,73	0,55	0,48	0,74	0,70	0,38

4.2.9. Desempenho lubri-refrigerante – Processo de torneamento

Os resultados dos testes de torneamento desenvolvidos por Grub (2014) em seu trabalho de mestrado (ao investigar a vida das ferramentas utilizando os FCs novos e contaminados por 7 dias) foram somados aos resultados obtidos durante o período de realização desta tese utilizando os fluidos contaminados por setenta dias. A junção desses resultados permitiu a análise que se segue.

As Figuras 4.62 e 4.63 mostram os resultados de desgaste da ferramenta de corte em função do tempo de usinagem no torneamento, nas duas velocidades de corte testadas (125 e 250 m/min) para os dois CFs investigados: base vegetal (Figura 4.62) e base mineral (Figura 4.63) nas três condições testadas (novo, após 7 e setenta dias de contaminação microbiológica), totalizando seis fluidos de lubri-refrigeração. Nestes testes os fluidos de corte foram utilizados apenas na concentração de 8%, concentração sugerida pelos fabricantes desses fluidos.

Foram observadas as curvas características (no formato em “S”) pertinentes aos três estágios de desgaste: adequação, desgaste constante e desgaste acelerado da ferramenta (MACHADO et al., 2015). As curvas referentes à menor velocidade de corte de 125 m/min não atingiram o terceiro estágio, onde o desgaste é acelerado, indicando aproximação do ponto de quebra.

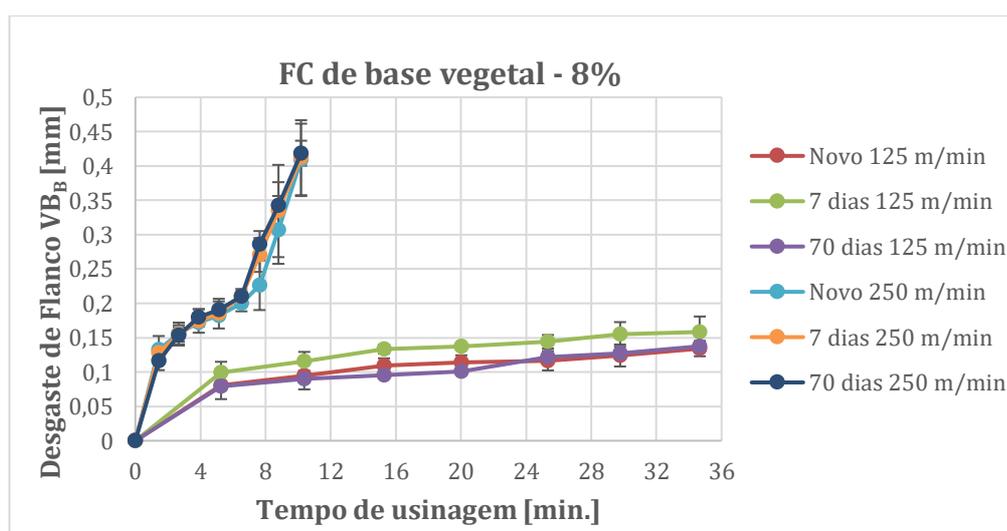


Figura 4.62. Desgaste de Flanco em quando utilizado o FC de base vegetal em baixa e alta velocidade de corte

Na usinagem dos metais, principalmente em altas velocidades de corte, a ferramenta está sujeita a vários tipos e mecanismos de desgastes. Alguns deles são causados por efeitos

térmicos proveniente da interação cavaco-ferramenta (DINIZ et al., 2010; MACHADO et al., 2015). Para desacelerar esse desgaste e, conseqüentemente, aumentar a vida da ferramenta, utiliza-se o FC, que em altas velocidades de corte atua principalmente como refrigerante. De acordo com Diniz et al. (2010), o fluido refrigerante deve ter: baixa viscosidade, alto calor específico e alta condutividade térmica. Em baixas velocidades de corte, as propriedades lubrificantes são mais importantes (MACHADO et al., 2015). Assim, normalmente, em processos de torneamento com ferramentas de metal duro, a aplicação de um fluido de corte sempre aumenta a vida da ferramenta, independente da velocidade empregada, resultado da combinação das duas ações: refrigerantes e lubrificantes.

As curvas de vida das ferramentas apresentadas nas Figs 4.62 e 4.63 mostram que em ambos os fluidos testados, o aumento da velocidade de corte de 125 m/min para 250 m/min a acelera o desgaste, como era de se esperar, considerando a clássica Equação de Taylor. Contudo, em alta velocidade de corte (250 m/min), a taxa de desgaste de flanco médio (VB_B) observada para o FC de base mineral (Fig. 4.63) foi ligeiramente menor (vida ligeiramente maior) que o FC de base vegetal (Fig. 4.62). Este fato mostra que a combinação de propriedades refrigerantes e lubrificantes do FC de base mineral é ligeiramente superior, nesta velocidade.

Nas baixas velocidades, o comportamento de ambos os fluidos é bastante similar, mas com ligeira vantagem para os FC base vegetal, numa análise puramente visual.

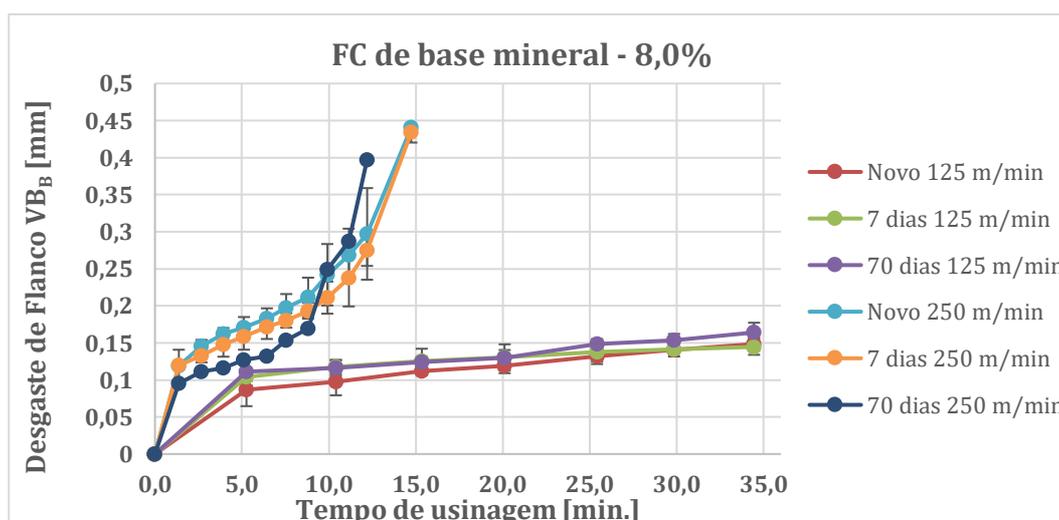


Figura 4.63. Desgaste de Flanco quando utilizado o FC de base Mineral em baixa e alta velocidade de corte.

Em baixa velocidade de corte (125 m/min.), a evolução do desgaste de flanco nos ensaios de vida utilizando o FC de base vegetal submetido a contaminação microbiológica por

sete dias comparado ao FC novo (Figura 4.62), após análise estatística (ANOVA, com índice de confiabilidade de 95% e nível de significância de 5%) apresentou aumento significativo ($p=0,016$) no desgaste da ferramenta de corte, reduzindo sua vida. A contaminação microbiológica por sete dias já havia sido associada a uma redução em sua viscosidade cinemática (Figura 4.6), o que possivelmente agravou a instabilidade da presença do filme lubrificante na interface de corte.

Apesar das pequenas oscilações nos índices de viscosidade cinemática e coeficiente de atrito médio quando utilizado o FC de base mineral, nos ensaios de vida em baixa velocidade de corte, o desgaste de flanco em todo o tempo de usinagem fixado (34,7 min) foi semelhante para as três condições investigadas (Fig. 4.64), excetuando-se o intervalo de 5 a 15 minutos, para o qual a curva de desgaste mostrou queda em relação a curva obtida quando da utilização dos FCs contaminados por sete e setenta dias.

Em baixa velocidade de corte, quando da utilização de FC de base vegetal, e excetuando-se a condição após sete dias de contaminação, os ensaios em baixa velocidade de corte (Fig. 4.64) apresentaram resposta semelhante ao relatado por Belluco e De Chiffre (2002), no qual FCs emulsionáveis de base vegetal apresentam melhor desempenho que o mineral, no torneamento do aço inoxidável, quanto a vida da ferramenta de corte. Óleos de bases vegetais, provêm de fontes renováveis, garantindo maior poder de lubrificação devido à polaridade de suas moléculas, de cadeias longas, pesadas, e de natureza dipolar (Souza, 2010). Como o comportamento do FC de base vegetal contaminado por setenta dias foi semelhante ao novo, pode-se inferir sobre a manutenção dessas características para o FC de base vegetal, em baixa e em alta velocidade de corte, mesmo após longo período de contaminação microbiológica. Na concentração de 8,0%, os coeficientes de atrito apresentados pelo ensaio de deslizamento (*Reciprocating*) com o fluido vegetal novo e contaminado por setenta dias são similares (ligeiramente superior para o contaminado 0,163 para o novo, contra 0,169 para o contaminado – Fig. 4.35). Houve também um comportamento similar da energia específica de riscamento no ensaio de esclerometria pendular para os dois fluidos de base vegetal, novo e contaminado por setenta dias (Figs. 4.45 e 4.46).

Em alta velocidade de corte (250 m/min) o comportamento nas três condições propostas (FC novo e após sete e setenta dias de contaminação microbiológica), mostra resultados muito similares para o FC base vegetal e apenas o FC de base mineral com setenta dias de contaminação mostrou perda sensível de vida da ferramenta, principalmente no intervalo de tempo entre 10 a 15 minutos. Este comportamento pode ser atribuído à perda na capacidade de resfriamento do FC contaminado, devido ao aumento sensível da viscosidade

desse fluido (Fig. 4.6). A presença de maior carga microbiana pode ter contribuído para a desestabilização dos CFs, resultando em um maior percentual de água não ligada as gotículas de óleo, bem como do aumento do tamanho das gotículas de óleo por esse mesmo processo.

A Figura 4.64 apresenta o comportamento do desgaste de flanco médio (VB_B) até um tempo de corte de 34,67 min para a velocidade de 125 m/min (Fig. 4.64a) e 10,18 min para a velocidade de 250 m/min (Fig. 4.64b) para ambos os fluidos testados nas diferentes condições de contaminação (novo, contaminado por 7 e por setenta dias). Observa-se que em altas velocidades de corte o FC de base vegetal proporciona menor tempo de vida à ferramenta de corte principalmente nas condições em que foi contaminado por sete e setenta dias. Um dos fatores que pode explicar esta redução na vida na ferramenta pode ser a própria presença do particulado microbiano, com diferente coeficiente de condutividade térmica, reduzindo assim a refrigeração na superfície ferramenta/peça e ao mesmo tempo impedindo a chegada do FC propriamente dito. Outro fator de grande influencia para essa redução pode estar relacionada a própria degradação do fluido de corte, a partir da qual ele se torna subprodutos dentro de reservatório, não conseguindo mais exercer suas propriedades lubri-refrigerantes da mesma forma como quando ele é recém preparado (recém diluído em água).

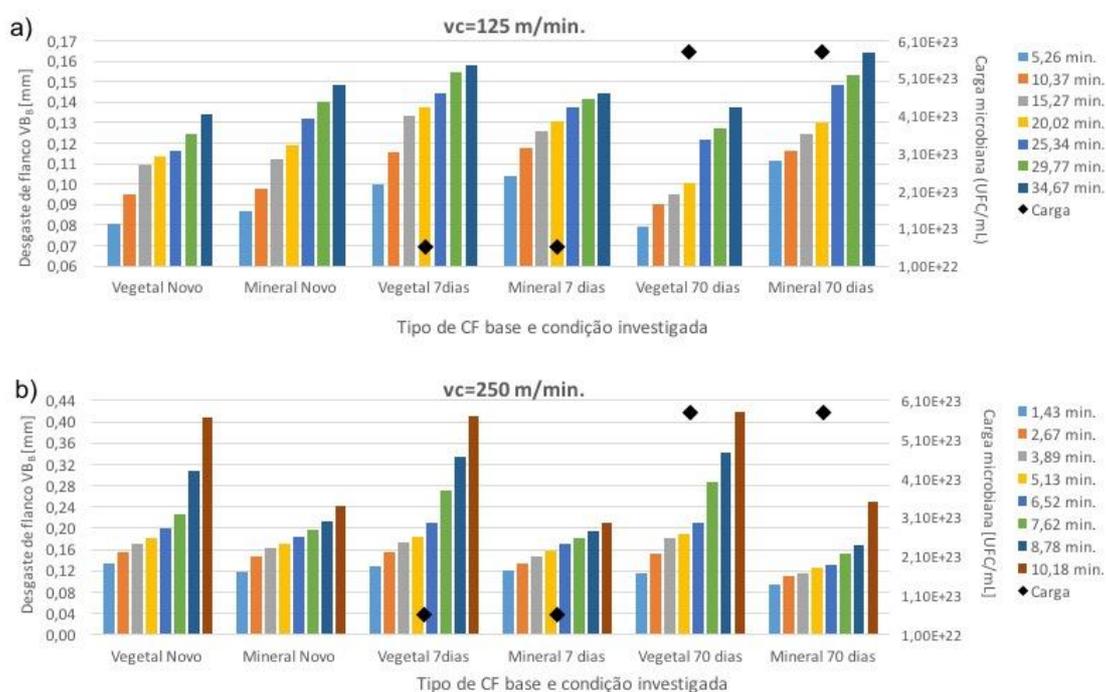


Figura 4.64. Desgaste de Flanco quando utilizado os FCs de base Vegetal e Mineral em baixa (a) e alta (b) velocidade de corte relacionados a presença da carga microbiana.

UFC/mL = Unidades Formadoras de Colônias por mililitro de FC.

Em operações de remoção de cavacos, no entanto, óleos de alta viscosidade não agem muito bem nas pastilhas e atuarão como um isolador, reduzindo assim ainda mais as propriedades de arrefecimento na ferramenta. A viscosidade de um óleo de corte deve ser baixa o suficiente para limpar os cavacos e não isolar o calor da operação, mas suficientemente alta para controlar a nebulização de óleo, uma preocupação comum para a saúde associada ao uso de óleos reticulados (CHILDERS, 2006).

A formação de qualquer tipo de filme lubrificante no processo de usinagem depende da utilização de uma velocidade de corte baixa e redução do atrito, e a medida que esta velocidade aumenta essa possibilidade diminui, principalmente em virtude do aumento da temperatura interferir na redução da viscosidade, comprometendo a integridade da película (ASTAKOV, 2012). Tal fenômeno ocorre devido ao aquecimento aumentar a possibilidade de as gotículas da emulsão colidirem e se coalescerem durante o movimento Browniano (BYERS, 2006).

A deterioração da qualidade da superfície usinada no processo de torneamento também está diretamente relacionada com a progressão do desgaste da ferramenta (SHAMA, 2009). Neste estudo, o desgaste da ferramenta de corte utilizando o FC de base mineral nas três condições de estudo, em alta velocidade de corte foi significativamente menor ($P < 0,001$) quando comparado ao FC de base vegetal (nas mesmas condições).

Os FCs são meios lubri-refrigerantes que reduzem a geração e removem o calor gerado durante a operação de corte no sentido de aumentar a vida da ferramenta, impedindo que a mesma atinja temperatura crítica, acima da qual ela se desgasta rapidamente (FERRARESI, 2006; SALMON, 2006; DINIZ et al., 2010; SOUZA, 2010; ASTAKHOV, 2012; MACHADO et al., 2015). Esse desgaste ocasionado pela temperatura acima da crítica, ocorre em diferentes mecanismos, deixando desta forma, a vida da ferramenta diretamente relacionada com a velocidade de corte utilizada (FERRARESI, 2006; MACHADO et al., 2015). Os resultados desse estudo podem indicar uma melhora no desempenho do FC de base mineral quando contaminado por bactérias e ainda uma maior resistência do FC de base vegetal em alterar suas propriedades lubri-refrigerantes, mesmo após a contaminação microbiológica por curto (sete dias) e longo prazo (setenta dias).

Em altas velocidades de corte (250 m/min) utilizando o FC de base vegetal (Figura 4.64), o desgaste da ferramenta de corte até o limite de desgaste de flanco (VB_B) de 0,4 mm foi atingido em tempos de usinagem mais curtos no FC de base vegetal (tempo de usinagem < 10 min). Quando utilizado o FC de base mineral o desgaste observado para esse mesmo intervalo de tempo não alcançou 0,25 mm (Figura 4.62). Entretanto o comportamento de

desgaste da ferramenta de corte quando utilizado o FC de base mineral não foi semelhante nas três condições investigadas como ocorreu com o FC de base vegetal, quando para o qual foi observado praticamente a mesma curva de desgaste de flanco (VB_B) para as três condições investigadas.

Apesar de o FC de base mineral (contaminado por setenta dias) apresentar melhor desempenho em relação ao desgaste da ferramenta de corte até o tempo de usinagem de 8 minutos (Fig. 4.64b), em alta velocidade de corte, passado esse intervalo, o desgaste se torna maior nesta condição de lubri-refrigeração. A vida da ferramenta de corte foi maior para as condições de FC novo e contaminado por sete dias, embora essa diferença não seja tão grande (desgaste de flanco médio de 0,24 mm para o fluido de corte novo; 0,21 mm para o fluido contaminado por 7 dias e 0,25 para o fluido contaminado por setenta dias, conforme Fig. 4.63). Esses resultados podem indicar uma melhora no desempenho do CF de base mineral quando contaminado por bactérias e ainda uma maior resistência do CF de base vegetal em alterar suas propriedades lubri-refrigerantes mesmo após a contaminação microbiológica por curto (sete dias) e longo prazo (setenta dias).

Em alta velocidade de corte o desgaste de flanco médio VB_B observado foi menor nas três condições investigadas para o FC de base mineral em relação ao CF de base vegetal em até 10,2 minutos de usinagem (Fig. 4.67). Em baixa velocidade, a vida da ferramenta foi menor para o FC de base vegetal contaminado por sete dias, seguido pelo FC de base mineral contaminado por 7 e setenta dias (Fig. 4.67). Observa-se nesta mesma figura que o primeiro aumento da carga microbiana para o FC de base vegetal foi acompanhado pelo aumento do desgaste da ferramenta de corte. Para o FC de base mineral a maior carga microbiana é que foi acompanhada deste efeito.

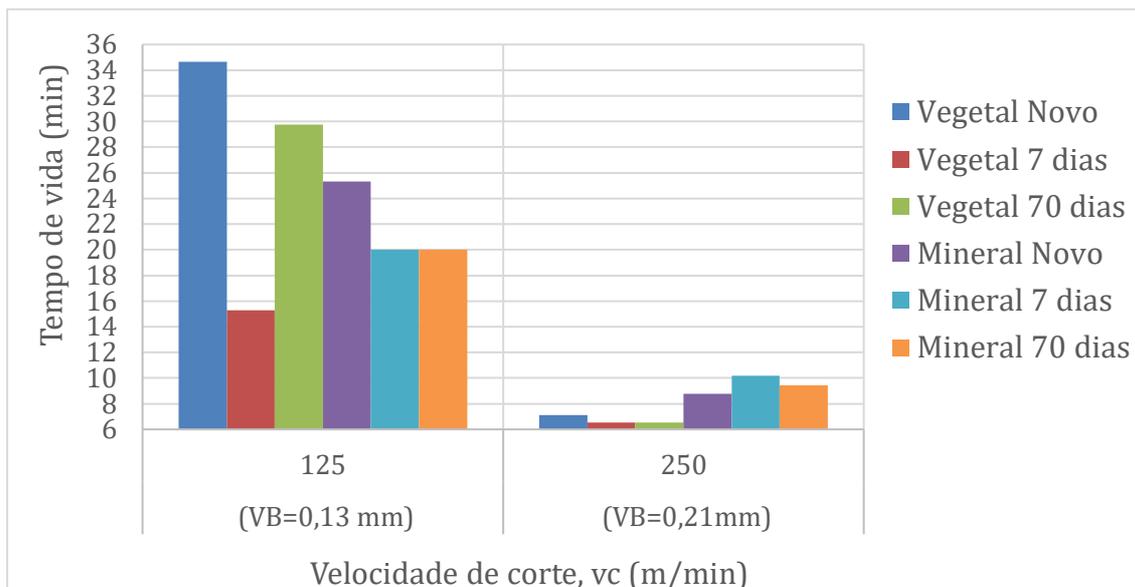


Figura 4.65 Tempo de vida (T) da ferramenta de corte em baixa e alta velocidade de corte.

Na Figura 4.66 é mostrada a evolução do desgaste de flanco da ferramenta de corte no processo de torneamento, utilizando os dois FC investigados, em baixa e alta velocidade de corte. Nas figuras 4.66a e 4.66c os ensaios foram realizados com o FC de base vegetal e em 4.66b e 4.66d com o FC de base mineral. O padrão de desgaste observado foi o mesmo para todas as condições testadas, contaminadas e não contaminadas.

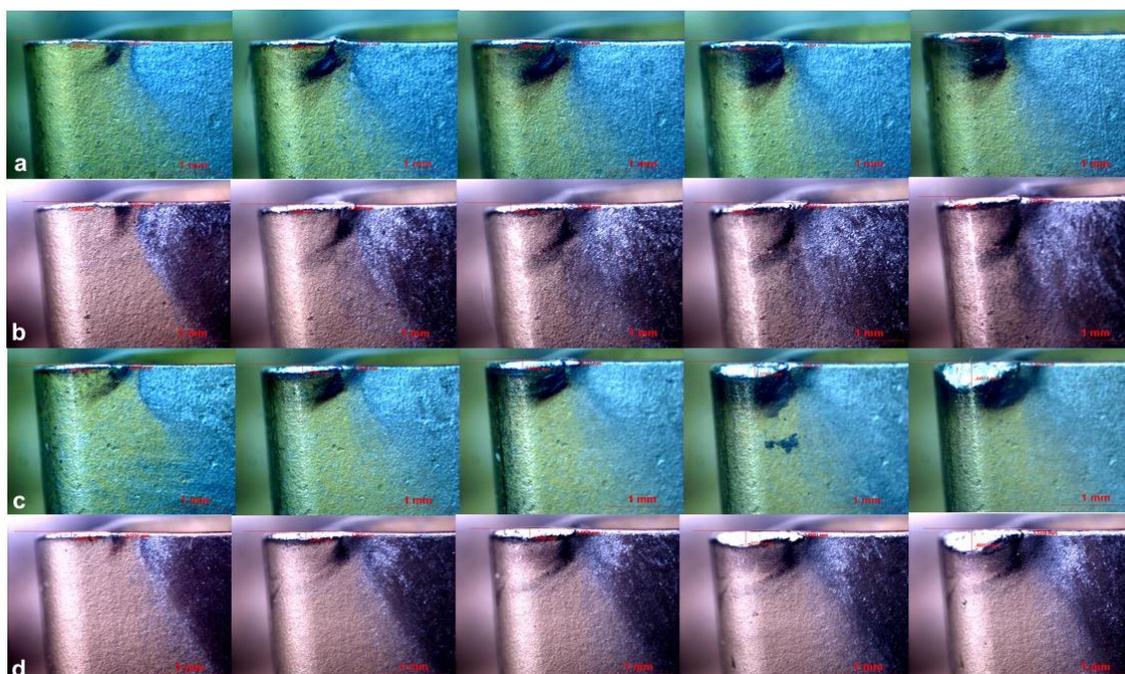


Figure 4.66. Evolução do desgaste de flanco no teste de vida utilizando os dois CFs base, vegetal (a e c) e mineral (b e d), ambos contaminados por setenta dias. Em 4.66a e 4.66b, ambos com $v_c=125$ m/min, $a_p=1,0$ mm, $f=0,20$ mm/volta. Em 4.66c e 4.66d, ambos com $v_c=250$ m/min, $f=0,20$ mm/volta, $a_p=1$ mm;

Análises em microscópio eletrônico de varredura (MRV) das ferramentas utilizadas nesta pesquisa, desenvolvidos por Grub (2014) (com fluidos novos e contaminados por 7 dias) e por esta doutoranda (com fluidos contaminados por setenta dias) indicam que o mecanismo de desgaste predominante no flanco das ferramentas é o adesivo (*attrition*). Segundo Machado et al., (2015) esse mecanismo de desgaste ocorre quando o fluxo de material se torna irregular sobre a ferramenta de corte, e partículas (grãos de carbonetos) são arrancadas da superfície da ferramenta e arrastadas na interface de corte junto ao fluxo de material (podendo até promover desgaste abrasivo). Em todos os ensaios foram detectados esse mecanismo para os dois CF investigados. A Fig. 4.67 ilustra uma das ferramentas utilizada no teste com velocidade de corte de 250 m/min e fluido de corte de base mineral contaminado por 7 dias, no final de vida. O aspecto relativamente rugoso da superfície desgastada é uma forte indicação da predominância do mecanismo de desgaste adesivo.

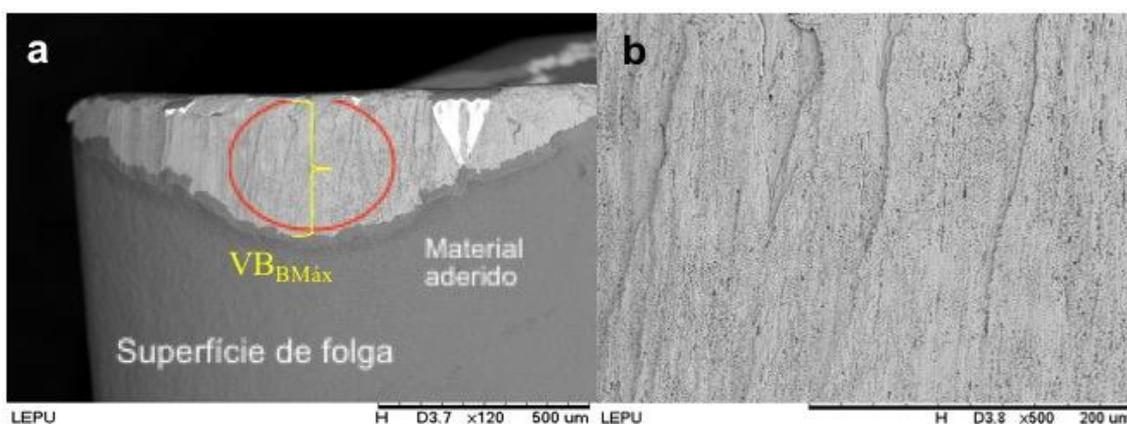


Figura 4.67. (a) Desgaste de flanco da ferramenta de corte utilizada no teste com $v_c = 250$ m/min e fluido de corte de base mineral após contaminação de 7 dias, após ataque com ácido clorídrico para remoção de material da peça aderido; (b) Detalhe da região destacada em (a) (GRUB, 2014).

Na Figura 4.68 são apresentados os resultados de força para alta e baixa velocidade de corte (250 e 125 m/min) em função do avanço, para os dois tipos de FCs testados e condições de contaminação microbiológica investigadas.

A lubrificação é uma propriedade fundamental requerida pelo processo de usinagem ao FC, tanto para reduzir o atrito entre as superfícies em contato, como para diminuir esse

contato presente na interface peça-ferramenta-cavaco. Em altas velocidades de corte, como as condições de penetração do CF não são favoráveis, a lubrificação fica bastante prejudicada e a propriedade refrigerante dos CFs se sobressai (MACHADO et al., 2015).

No geral, observou-se maiores forças de corte e de avanço, quando da usinagem em baixa velocidade de corte (125 m/min) (Figura 4.68a e 4.68d), comparado a alta velocidade de corte (250 m/min) (Figura 4.68b e 4.68d), com exceção da força de avanço (F_f) com o fluido mineral contaminado por setenta dias, que apresentou forças maiores para a velocidade maior de 250 m/min. Com o aumento da velocidade de corte há a maior geração e calor e o aumento da temperatura reduz a resistência ao cisalhamento do material, promovendo menores forças de usinagem. As condições lubri-refrigerantes do fluido mineral com setenta dias de contaminação atuaram no sentido de desafiar a lógica, levando ao aumento da força de avanço quando se aumentou a velocidade de corte de 125 para 250 m/min. Poderia-se supor que o aumento da carga particulada no FC (presença maciça de microrganismos, seus produtos metabólicos e consequentemente, as alterações causadas ao “meio” devido a sua presença, como a transformação do fluido em outros subprodutos), tenham contriuido para elevar a resistência ao cisalhamento do material.

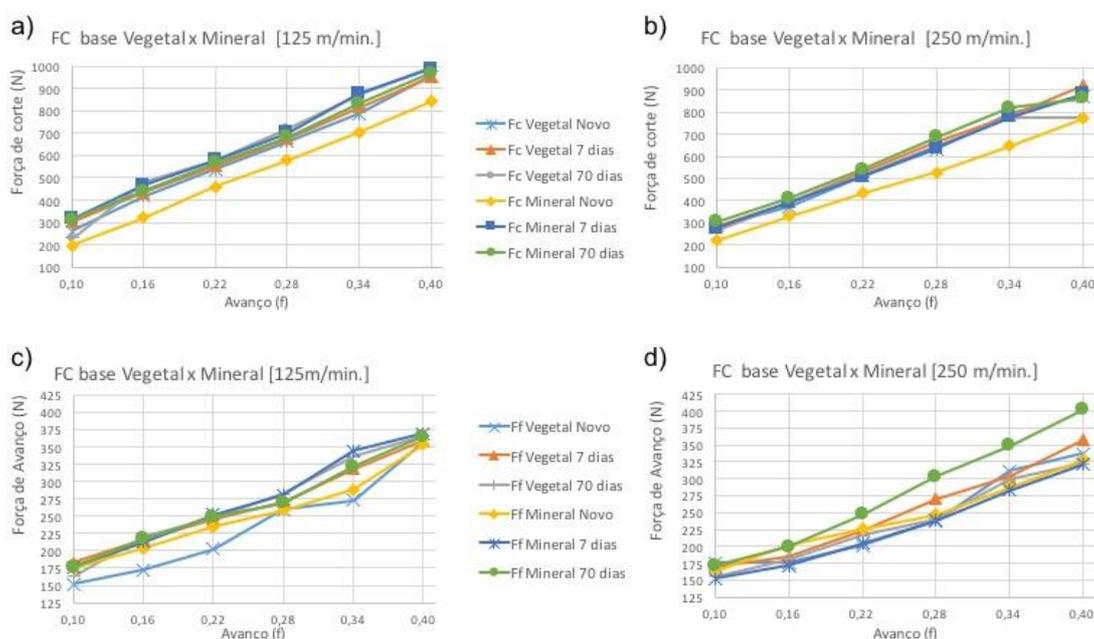


Figura 4.68. Forças de corte e avanço (F_c e F_f) em função do avanço. Em (a) e (c) ensaios com $v_c = 125$ m/min; Em (b) e (d) ensaios com $v_c = 250$ m/min

Observa-se que a contaminação do FC base mineral aumentou nitidamente as forças de corte (F_c) em comparação com a usinagem utilizando o fluido novo, o qual apresentou os

menores valores de força em todos os avanços testados. A contaminação deste fluido acarretou em redução da capacidade de carga no teste de esclerometria por deslizamento (*Reciprocating*) (Fig. 4.31 a 4.33), apesar da energia específica ter diminuído com a contaminação por setenta dias, no teste de esclerometria pendular (Fig. 4.44). A capacidade refrigerante do FC base mineral também reduziu com a contaminação microbiológica (Fig. 4.53 e Tab. 4.14). Estes fatos ajudam a explicar estes resultados. O efeito deletério da contaminação dos dois FCs pode também ser notada pelo aumento da força de avanço (F_f), na menor velocidade de corte (125 m/min) em comparação à usinagem com os fluidos novos (Fig. 4.68c). Na maior velocidade de corte de 250 m/min, este efeito não se verificou (Fig. 4.68d) exceto para o FC base mineral contaminado por setenta dias. Todos esses resultados, reiterando, são explicados pela ação conjunta dos efeitos lubri-refrigerantes dos fluidos.

A variação da rugosidade em função do avanço é mostrada nos gráficos a e b da figura 4.69, para as velocidades de corte de 125 e 250 m/min, respectivamente. A rugosidade da superfície recém usinada é teoricamente gerada pelas marcas de avanço da ferramenta de corte deixadas na peça. Dessa forma, o aumento do avanço tende a aumentar a rugosidade superficial da peça uma vez que picos e vales tem suas alturas e profundidades aumentados, respectivamente (CORRÊA, 2014; MACHADO et al., 2015). Nesse estudo a rugosidade superficial obtida teve comportamento semelhante, tanto em baixa (Figura 4.69a) quanto em alta velocidade de corte (Figure 4.69b).

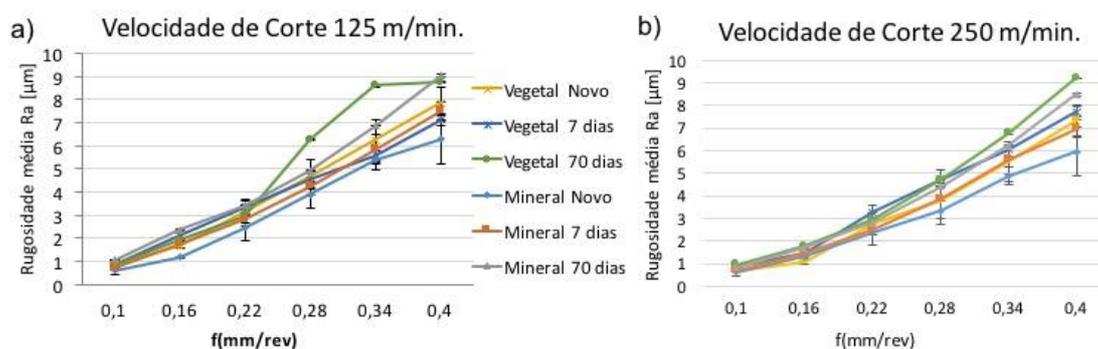


Figura 4.69. Variação da rugosidade (Ra) pelo avanço, na usinagem do aço inoxidável austenítico V304UF com os diversos meios lubri-refrigerantes, utilizando baixa (125 m/min) e alta (250 m/min) velocidade de corte em (a) e (b) respectivamente.

Os valores de rugosidade em baixa velocidade de corte oscilaram de 0,62 μm (utilizando o FC de base mineral novo - em avanço de 0,1 mm/rot.) até 9,04 μm (utilizando o FC base mineral após setenta dias de contaminação microbiológica - em avanço de 0,4 mm/rpm). Em alta velocidade de corte os valores de rugosidade oscilaram entre 0,64 μm (utilizando o FC de base mineral novo - em avanço de 0,1 mm/rot.) até 9,21 μm (utilizando o FC base vegetal após setenta dias de contaminação microbiológica - em avanço de 0,4 mm/rot.). Estudo realizado por Adithan (2008) aponta menores valores de rugosidade para os FCs de base vegetal comparado ao mineral. Neste estudo, o FC de base mineral apresenta os menores parâmetros de rugosidade em baixa e em alta velocidade de corte, em todos os avanços testados.

De um modo geral, a rugosidade média R_a aumentou progressivamente para todas as condições em que o FC foi contaminado por microrganismos, após sete e setenta dias. A exceção foi para o avanço de 0,22 mm/volta e velocidade de corte de 250 m/min, no qual a condição de contaminação a longo prazo apresentou menor rugosidade que a de sete dias (curto prazo), para o FC de base vegetal.

Considerações finais sobre os resultados

- ✓ Os dois fluidos contaminados por curto e longo prazo apresentaram semelhantes comportamentos para as forças de corte tanto em baixa quanto em alta velocidade. O destaque foi para o FC novo de base mineral, o qual apresentou significativamente o melhor desempenho comparado ao FC de base vegetal e as suas versões contaminadas.
- ✓ Os resultados obtidos evidenciam o quanto é importante para a indústria em termos de custos, selecionar adequadamente o tipo de FC (base mineral ou vegetal) para cada processo de usinagem com o qual a indústria trabalha, a diluição adequada para cada processo de usinagem, e outros parâmetros, como material usinado, parâmetros de corte, etc. Seguir as recomendações dos fabricantes tanto de FC quanto de máquinas operatrizes, significa outro passo importante para manter boas práticas de gestão do início ao fim do uso dos FCs.
- ✓ Neste estudo os dados mostraram a grande interferência que os microrganismos que contaminam os FCs causam para o bom desempenho de suas propriedades. Cada tipo de FC (base mineral ou vegetal) sofre impacto diferente diante da contaminação microbiológica e isso refletirá na qualidade técnica final do produto acabado, além de afetar significativamente os custos de produção, com descarte precoce, tratamento do resíduo, etc. Apesar de algumas concentrações terem seus desempenhos melhorados após a contaminação microbiológica, essas concentrações quando novas (FC recém diluído) não foram compatíveis com o melhor desempenho significando um custo extra inicial de FC desnecessário.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

CONTAMINAÇÃO ARTIFICIAL “*IN VITRO*”

- ✓ No geral, o FC de corte de base mineral, apresentou menor resistência a contaminação microbiológica quanto ao tempo necessário para atingir a carga mínima de viáveis de 10^5 UFC/mL (dados não apresentados).
- ✓ Os fluidos de corte de base mineral, nas quatro concentrações testadas, mostraram mudanças expressivas principalmente na coloração (escurecimento do fluido) e piora do odor característico.
- ✓ Como consequência da contaminação, nos dois FCs em concentrações iguais ou inferiores a 8,0%, houve uma maior desestabilização dos FCs em relação as características originais de uso.

pH, VISCOSIDADE CINEMÁTICA/DINÂMICA e MASSA ESPECÍFICA

- ✓ O pH sofreu redução com a contaminação para ambos os FC testados (base vegetal e mineral).
- ✓ Enquanto os FCs de base mineral, nas quatro concentrações testadas, sofreram apenas incremento em sua viscosidade, em maior ou menor índice, de acordo com o tempo de contaminação microbiológica, os FCs de base vegetal, quando não mantiveram as características iniciais de viscosidade cinemática (na concentração de 10% em ambos os tempos de contaminação e 5,0% após sete dias), sofreram tanto a redução (37,5% dos fluidos), quanto o incremento (50,0% dos fluidos) deste parâmetro.
- ✓ O desempenho da viscosidade dinâmica acompanhou o da viscosidade cinemática.
- ✓ Não foram observadas alterações significantes na massa específica dos dois FCs investigados, nas quatro concentrações testadas. Oscilou 0,5% para o FC de base vegetal e 0,4% para o de base mineral.

DIFUSIVIDADE, CONDUTIVIDADE e CALOR ESPECÍFICO

- ✓ Não se observou uma relação direta da contaminação dos fluidos testados com a difusividade térmica, condutividade térmica e calor específico. Houve tanto aumento como redução nos valores dessas propriedades com a contaminação.
- ✓ No geral, após a contaminação microbiológica, houve uma maior tendência dos dois FCs de redução dos coeficientes de difusividade e condutividade térmica, sendo que nos FCs de base mineral, essa redução ocorreu em mais concentrações de uso do que nos FCs de base vegetal. Contudo em um terço dos casos foi observado o aumento desses coeficientes e até mesmo manutenção das características iniciais (quando FC está novo).
- ✓ Enquanto 50,0% dos FCs de base vegetal após contaminados por sete e 70 dias, sofreram: redução no coeficiente de condutividade térmica (com variação de 1,7% a 3,4%) e aumento no coeficiente de difusividade térmica (com variação de 2,7% a 48,6%), 75,0% dos fluidos de base mineral sofreram redução do coeficiente de condutividade térmica (com variação de 1,7% a 6,9%) e 62,5% deles sofreram redução do coeficiente de difusividade térmica (com variação de 2,0% a 19,3%).
- ✓ Os FCs de base mineral na concentração de 5,0% [com aumento (19,3%) após sete dias e redução (16,1%) após 70 dias] e de 8,0% (reduções de: 14,7% após sete dias e 11,7% após 70 dias de contaminação microbiológica) apresentaram as maiores alterações no parâmetro de difusividade térmica. Excetuando-se a concentração de 8,0% que sofreu alterações mínimas apenas após sete dias de contaminação microbiológica, os demais fluidos nas concentrações de 5,0% e 10,0% sofreram redução e aumento do coeficiente de difusividade térmica, respectivamente. Na concentração de 3,0% foram observados tanto o aumento (após sete dias) quanto a redução (após 70 dias de contaminação microbiológica) deste parâmetro.

MOLHABILIDADE

- ✓ Os fluidos de base mineral nas concentrações de 5,0%, 8,0% e 10,0% apresentaram redução do ângulo de contato mostrando melhoramento de sua capacidade molhante após contaminação microbiológica por sete e 70 dias. Esse fato foi observado apenas na concentração de 3,0% (com 7 dias de contaminação) para o FC de base vegetal.
- ✓ A capacidade de molhabilidade do FC de base vegetal a 5,0% e 10,0% piorou após a contaminação microbiológica de maneira gradativa conforme o tempo de contaminação microbiológica. Na concentração de 8,0% esse fluido base tanto mostrou piora na

molhabilidade quanto uma manutenção das características iniciais, quando contaminado por sete e 70 dias, respectivamente.

CORROSÃO

- ✓ Como esperado os dois FCs na concentração de 8,0% apresentaram falha na proteção anticorrosiva após 70 dias de contaminação microbiológica. Tal fato pode ser observado diretamente tanto nas amostras metálicas submersas nesses fluidos novos e contaminados pelo período de sete e 70 dias, quanto nos papéis filtros em contato direto com os fluidos,

DESGASTE POR DESLIZAMENTO (*Reciprocating*)

- ✓ O coeficiente de atrito médio, determinado pelo teste de deslizamento (no início do teste) para os fluidos testados, no geral, reduziu com a contaminação de 7 dias, quando comparado ao fluido novo. Entretanto, após 70 dias de contaminação a tendência se inverteu, aumentando o coeficiente de atrito.
- ✓ O coeficiente de atrito médio obtidos com os fluidos de corte de base mineral, no geral, foi superior aos FC de base vegetal.
- ✓ O número de ciclos para atingir o coeficiente de atrito de 0,3 seguiu a ordem inversa do coeficiente de atrito médio inicial. Resultado coerente com as expectativas.
- ✓ A capacidade de carga durante os testes, no geral, diminuiu com a contaminação dos fluidos de corte.

ESCLEROMETRIA PENDULAR

- ✓ A esclerometria pendular possibilitou detectar mudanças nas características dos fluidos de corte após contaminação microbiológica. Os fluidos de corte contaminados que apresentaram perda na capacidade de retirar calor melhoraram seus desempenhos em relação aos FCs base, como ocorreu com o FC de base mineral após sete e 70 dias de contaminação microbiológica em algumas concentrações. O fluido de corte de base mineral após contaminação por 70 dias apresentou menor energia específica, nos testes com perda de massa superior a 0,8 mg, em praticamente todas as concentrações testadas.

CURVA DE RESFRIAMENTO

- ✓ De um modo geral pode-se afirmar que a contaminação microbiológica dos FCs não impactou em alterações significativas na capacidade refrigerante desses fluidos. Entretanto, esta análise depende fortemente da concentração de fluido utilizada.

- ✓ O FC de base mineral a 3% contaminado por sete dias foi o que obteve melhor desempenho da capacidade refrigerante (maior coeficiente convectivo, - h), seguido pelo fluido de base vegetal novo a 5,0% e pelo fluido de base vegetal a 8,0% contaminado por 7 dias. O pior desempenho (menor coeficiente convectivo - h) foi apresentado pelo fluido de corte de base mineral a 5,0% novo, sendo melhor apenas que a condição a seco.

FURAÇÃO

- ✓ O FC de base vegetal, que no geral se mostrou mais eficiente que o de base mineral, na concentração de 3%, obteve o melhor desempenho apesar de se tratar de uma concentração diferente da recomendada pelo fabricante (8%). E mesmo após a exposição a contaminação microbiológica por 70 dias, esse fluido manteve o melhor desempenho em cada concentração testada, em relação aos demais fluidos. A profundidade de furação (percurso de avanço - L_f) obtida após 20 segundos de teste reduziu com a aplicação do fluido após 7 e 70 dias de contaminação, nesta ordem. Após 70 dias de contaminação o L_f foi menor até que a condição a seco.

TORNEAMENTO (FC a 8%)

- ✓ A contaminação microbiológica dos dois FCs (vegetal e mineral) reduziu a vida da ferramenta no processo de torneamento, quando usinando na menor velocidade de corte de 125 m/min, sendo que no fluido de base vegetal, a contaminação mais curta de sete dias apresentou vidas menores que o fluido contaminado por 70 dias.
- ✓ Na alta velocidade de corte de 250 m/min, o FC de base mineral após sete e 70 dias de contaminação microbiológica teve seu desempenho significativamente melhorado quanto à redução do desgaste da ferramenta de corte, quando comparado ao fluido novo, isto não ocorreu com o fluido de base vegetal, quando a contaminação diminuiu a vida.
- ✓ As forças de corte e de avanço bem como a rugosidade superficial aumentaram gradativamente conforme o tempo de contaminação a curto (sete dias) e a longo prazo (70 dias).

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Investigar a contribuição do particulado microbiano quantificado de microrganismos viáveis e inviáveis nas propriedades lubrificantes dos FCs.
- ✓ Avaliação do processo de adsorção física e química do FC após contaminação microbiológica.

- ✓ Investigar a correlação entre a presença do microbioma característico que cada FC pode viabilizar em chão de fábrica com o desempenho das propriedades do lubri-refrigerantes do fluido.
- ✓ Avaliação do consumo dos componentes/aditivos dos fluidos de corte, isolados e em grupo, por microrganismos e determinar sua relação com a perda de desempenho em uso.
- ✓ Avaliação e monitoramento do crescimento microbiano em diversas marcas e tipos de fluidos de corte para determinação de sua bioresistência a contaminação microbiológica.
- ✓ Estudo do microbioma presente na maioria das indústrias para desenvolvimento de FCs mais resistentes aos microrganismos já adaptados a estes ambientes.
- ✓ Desenvolvimento de FCs de acordo elevando-se em consideração a diversidade de microbiomas presentes nas indústrias espalhadas pelo planeta.
- ✓ Desenvolver um estudo de fabricação de máquinas-ferramenta com o conceito “internet das coisas” que opere sem a presença do operador de máquina, minimizando assim a exposição do mesmo a este microbioma e deixando de representar riscos a saúde do homem.
- ✓ Desenvolvimento de um sistema de autolimpeza das máquinas ferramentas baseado em micro e nano partículas biológicas ou não, adicionadas aos fluidos de corte, que sejam ao mesmo tempo seguras ao manuseio do homem e ao processo de usinagem, podendo inclusive melhorar este último.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM FINZI, M. B. *Microbioma do fluido de corte utilizado na indústria metal-mecânica brasileira: composições quantitativa e qualitativa, fatores que influenciam a presença de microrganismos, biodegradação e impacto nas propriedades lubri-refrigerantes* 2015. 86 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG. <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.3009>

ARANDA, E.; ULLRICH, R.; HOFRICHTER, M. Conversion of polycyclic aromatic hydrocarbons, methyl naphthalenes and dibenzofuran by two fungal peroxygenases. *Biodegradation*, v. 21, n. 2, p. 267-281, 2010. DOI: 10.1007/s10532-009-9299-2

ARULAZHAGAN, P.; VASUDEVAN, N. Role of nutrients in the utilization of polycyclic aromatic hydrocarbons by halotolerant bacterial strain. *J. Environ. Sci. China* 2011;23:282–287. DOI: 10.1016/s1001-0742(10)60404-4

ASM International Handbook Committee. *ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM International; 1992. ISBN 0871703807

ASTAKHOV, V. P.; JOKSCH, S. (Ed.). *Metalworking fluids (Mwfs) for cutting and grinding: fundamentals and recent advances*. Elsevier, 2012. ISBN: 9780857095305

ASTM D2270-93. Standard practice for calculating viscosity index from kinematic viscosity at 40 °C and 100 °C. *American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (USA)*, 1993. DOI: 10.1520/D2270-10R16

ASTM D445. Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity). *American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (USA)*, 2006. DOI: 10.1520/D0445-21

ASTM D4627-92 (2002), Standard Test Method for Iron Chip Corrosion for Water—Dilutable Metalworking Fluids, *American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (USA)*, 2002, DOI: 10.1520/D4627-92R02

ASTM D7042-14. Standard Test Method for Dynamic Viscosity and Density of Liquids by Stabinger Viscometer (and the Calculation of Kinematic Viscosity). *American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (USA)*, ASTM International, 2012. DOI: 10.1520/D7042-21A

ASTM E2275. Standard Practice for Evaluating Water-Miscible Metalworking Fluid Bioresistance and Antimicrobial Pesticide Performance, Annual Meeting Book of ASTM Standards Vol. 17.05, *American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (USA)*, 2013. DOI: 10.1520/E2275-14

ASTM F22 – 02. Standard Test Method for Hydrophobic Surface Films by the Water-Break Test, *American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA (USA)*, 2007. DOI: 10.1520/F0022-21

ATKINS, Peter; DE PAULA, Julio. *Elements of physical chemistry*. Oxford University Press, USA, 2009. ISBN: 9780198727873

AVUNCAN, G. Machining Economy and Cutting tools, *Makine Takim Endüstrisi Ltd. Publication, Istanbul*, p. 375-403, 1998. (in Turkish).

AWOSIKA-OLUMO, A. I.; TRANGLE, K. L.; FALLON, L. F. Microorganism-induced skin disease in workers exposed to metalworking fluids. *Occup. Med. (Lond.)* 2003;53:35– 40. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqg006>

BABICH, H.; STOTZKY, G. Toxicity of zinc to fungi, bacteria, and coliphages: influence of chloride ions. *Appl. Environ. Microbiol.* 1978;36:906–914. <https://doi.org/10.1128/aem.36.6.906-914.1978>

BACKER, W. R.; MARSHALL, E. R.; SHAW, M. C.; 1952, *The Size Effect in Metal Cutting*, Transactions of ASME, 74, pp. 61-72. <https://doi.org/10.1115/1.4015687>

BAECKER, Albin AW; LEROUX, Kevin; VONHOLY, A. Microbiological contaminants of metal-working fluids in service. *South African Journal of Science*, v. 85, n. 5, p. 293-295, 1989.

BAKALOVA, S. et al. Bacterial microflora of contaminated metalworking fluids. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, v. 21, n. 4, p. 437-441, 2007. <https://doi.org/10.1080/13102818.2007.10817490>

BALAJI, V.; EBENEZER, P. Optimization of extracellular lipase production in *Colletotrichum gloeosporioides* by solid state fermentation. *Indian Journal of Science and Technology*, v. 1, n. 7, p. 1-8, 2008. DOI: 10.17485/ijst/2008/v1i7.11

BAND, J. D. et al. Peritonitis due to a *Mycobacterium chelonae*-like organism associated with intermittent chronic peritoneal dialysis. *J Infect Dis* 1982;145:9–17. <https://doi.org/10.1093/infdis/145.6.919>

BARROZO, M.A.S. *Planejamento de Experimentos*. Programa de Pós-Graduação Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia – PPG-EQ/UFU, jul, 2006.

BARTH, M. Belastung und Beanspruchung durch biologische Arbeitsstoffe bei Kühlschmiermittel-Exponierten in der Metallbearbeitung. *University of Düsseldorf, Düsseldorf*, 2003. <https://docserv.uni-duesseldorf.de/servlets/DocumentServlet?id=2633>

BARTZ, Wilfried J. Lubricants and the environment. *Tribology international*, v. 31, n. 1, p. 35-47, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00006-1)

BARTZ, Wilfried J. Ecological and environmental aspects of cutting fluids. *Tribology & Lubrication Technology*, v. 57, n. 3, p. 13, 2001. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/ecological-environmental-aspects-cutting-fluids/docview/226958636/se-2>

BARTZ, W. J. Ecotribology: environmentally acceptable tribological practices. *Tribology International*, v. 39, n. 8, p. 728-733, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.07.002>

BARTZ, W. J. *Einführung in die Tribologie und Schmierungstechnik: Tribologie, Schmierstoffe, Anwendungen. Mit 142 Tabellen*. expert Verlag, 2010. ISBN 978-3-8169-2830-0

BAY, N. Et al. (2010) Environmentally Benign Tribo-systems for Metal Forming. *Annals of the CIRP—Manufacturing Technologies* 59(2):760–780. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.05.007>

BECKETT, William et al. Hypersensitivity pneumonitis associated with environmental mycobacteria. *Environmental health perspectives*, v. 113, n. 6, p. 767, 2005. <https://doi.org/10.1289/ehp.7727>

BEEKHUIS B (2013) Influence of Solid Contaminants in Metal Working Fluids on the Grinding Process. *Advanced Materials Research* 769:61–68. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.769.61>

BELLUCO, W.; DE CHIFFRE, L. Surface integrity and part accuracy in reaming and tapping stainless steel with new vegetable based cutting oils. *Tribology International*, v. 35, n. 12, p. 865-870, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(02\)00093-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00093-2)

BENITO, J. M. et al. Formulation, characterization and treatment of metalworking oil-in-water emulsions. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 12, n. 1, p. 31-41, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10098-009-0219-2>

BENNET, E. O. The biology of metalworking fluid, *Journal of American Society of Lubrication Engineers*, v. 289,6, p.237-247, 1972. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCAL733408915>

BERGSTROM, L. Magnus. Explaining the growth behavior of surfactant micelles. *Journal of colloid and interface science*, v. 440, p. 109-118, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2014.10.054>

BENNICK; FRAUENHOFFER, The Most Common Cutting Fluid Problems. http://www.castrol.com/liveassets/bp_internet/castrol/castrol_advantage/STAGING/local_assets/downloads/c/cnc_machining_article_issue_42.pdf

BERNSTEIN, D. I. et al. Machine operator's lung. A hypersensitivity pneumonitis disorder associated with exposure to metalworking fluid aerosols. *Chest* 1995;108:636-641. <https://doi.org/10.1378/chest.108.3.636>

BIANCHI, E. C. et al. Controle do crescimento microbiano nos fluidos de corte utilizando a radiação ultravioleta. 2008 <http://www.cimm.com.br/portal/publicacao/43-controle-do-crescimento-microbiano-nos-fluidos-de-corte-utilizando-a-radiacao-ultravioleta.WJsSrBBA9xg> Acesso em 10/04/15. 17p.

BONUGLI-SANTOS, R. C. et al. Marine-derived fungi: diversity of enzymes and biotechnological applications. *Frontiers in microbiology*, p. 1-15, 2015. doi: 10.3389/fmicb.2015.00269

BOOTH, Ian R. Regulation of cytoplasmic pH in bacteria. *Microbiological reviews*, v. 49, n. 4, p. 359, 1985. doi: 10.1128/mr.49.4.359-378.1985

BORENSTEIN, S.W. 1994. *Microbiologically influenced corrosion handbook*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited. ISBN 978-1-85573-127-1

BRENNAN, P. J.; NIKAIDO, H. The envelope of mycobacteria. *Annual review of biochemistry*, v. 64, n. 1, p. 29-63, 1995. <https://doi.org/10.1146/annurev.bi.64.070195.000333>

BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMANN, M. (1999) Friction, Cooling and Lubrication in Grinding. *Annals of the CIRP—Manufacturing Technologies* 48(2):581–598. DOI 10.1016/S0007-8506(07)63236-3

BRINKSMEIER, E.; WALTER, A. Generation of reaction layers on machined surfaces. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 49, n. 1, p. 435-438, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62983-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62983-7)

BRINKSMEIER, E.; LUCCA, D. A.; WALTER, A. Chemical Aspects of Machining Processes. *Annals of the CIRP Manufacturing Technologies* 2004;53(2):685–699. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60035-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60035-3)

BRINKSMEIER, E. et al. Current approaches in design and supply of metalworking fluids. *Tribol. Trans.* 2009;52:591–601. <https://doi.org/10.1080/10402000902825739>

BRINKSMEIER, E.; HUNTEMANN, J. W. Wirkmechanismen von Kuhlsmierstoffadditiven im Zerspanprozess. *FVA Forschungsvorhaben*, v. 4761, p. 866, 2009. https://www.researchgate.net/publication/306421487_Wirkmechanismen_von_Kuhlsmierstoffadditiven_im_Zerspanprozess

BRINKSMEIER, E. et al. Metalworking fluids—Mechanisms and performance. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 64, n. 2, p. 605-628, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.003>

BROUGHTON, W. R.; LODEIRO, M. J. Review of Surface Characterization Techniques for Adhesive Bonding, *NPL Report MATC (A)66*, 2002. <http://eprintspublications.npl.co.uk/id/eprint/2201>

BRUCKER, Charles F.; RHODIN, Thor N. Oxygen chemisorption and reaction on α -Fe (100) using photoemission and low-energy electron diffraction. *Surface Science*, v. 57, n. 2, p. 523-539, 1976. DOI:10.1016/0039-6028(76)90345-9

De BRUYN, E. 1992. *Microbial ecology of sulphide-producing bacteria in water cooling systems*. PhD Thesis. University of Pretoria. South Africa

BRUZE, M. et al. Occupational allergic contact dermatitis from alkanolamineborates in metalworking fluids. *Contact Dermatitis* 1995;32: 24–27. DOI: 10.1111/j.1600-0536.1995.tb00835.x

BRYGGMAN, V.; HOGMARK, S.; VINGSBO, O. “Mechanisms of Gouging Abrasive Wear of Steel Investigated With The Aid of Pendulum Single Pass Grooving”, *Annals of Int. Conf. On Wear of Materials*, Canada, 1985;324-331. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(86\)90237-1](https://doi.org/10.1016/0043-1648(86)90237-1)

BUCKLEY, Donald H. Surface films and metallurgy related to lubrication and wear. *Progress in Surface Science*, 1982;12(1):1-153. [https://doi.org/10.1016/0079-6816\(82\)90005-3](https://doi.org/10.1016/0079-6816(82)90005-3)

BURGESS, W. A. *Recognition of Health hazards in Industry*. A Wiley-Interscience publication, second ed. New York, 1995. p 538. ISBN: 978-0-471-57716-4

BURK, J. M. *Slime control seminar*. Buckman Laboratories International Inc., Campinas-SP, Brasil. 1984.

BYERS, J. P. *Metalworking fluids*. 2. ed. Taylor e Francis Group. 2006. 480 p. DOI <https://doi.org/10.1201/978142001773>

BYRNE, G.; SCHOLTA, E. Environmentally clean machining processes—a strategic approach, *CIRP Annals—Manufacturing Technology*. 1993;42:471–474. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62488-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62488-3)

CALLISTER, W. D. Jr. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2000. ISBN-10 8521612885

CAMBIELLA, A. et al. Interfacial properties of oil-in-water emulsions designed to be used as metalworking fluids. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 305, n. 1, p. 112-119, 2007. DOI:10.1016/j.colsurfa.2007.04.049

CANTER, N. Monitoring Metalworking Fluids. *Tribology & Lubrication Technology* 2011;67(3):42–51.

CASTELLAN, R. M. et al. Inhaled endotoxin and decreased spirometric values. An exposure-response relation for cotton dust. *N Engl J Med* 1987;317:605–610. DOI: 10.1056/NEJM198709033171005

CAPELLETTI, R. V. *Avaliação da atividade de biocidas em biofilmes formados a partir de fluido de corte utilizado na usinagem de metais*. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química. Campinas, maio de 2006. <https://core.ac.uk/reader/296841180>

CÉBRON, A. et al. Impact of clay mineral, wood sawdust or root organic matter on the bacterial and fungal community structures in two aged PAH-contaminated soils. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2015;1–15. DOI:10.1007/s11356-015-4117-3

CETIN, M. H. et al. Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. *Journal of Cleaner Production*, 2011;19(17):2049-2056. DOI:10.1016/j.jclepro.2011.07.013

CHAZAL, P. M. Pollution of modern metalworking fluids containing biocides by pathogenic bacteria in France. Reexamination of chemical treatments accuracy. *Eur. J. Epidemiol.* 1995;17:1–7. DOI: 10.1007/BF01719939

CHILDERS, J. C. The chemistry of metalworking fluids. *Manufacturing engineering and materials processing*, v. 71, p. 127, 2006. ISBN-13: 978-1-57444-689-0

COSMACINI, E. et al. PAH emissions of synthetic organic esters used as lubricants in a two-stroke engine. *Journal of Synthetic Lubrication*, v. 3, n. 4, p. 251-261, 1986. <https://doi.org/10.1002/jsl.3000030402>

CYBULSKI, Zefiryn et al. The influence of emulsifiers on hydrocarbon biodegradation by Pseudomonadacea and Bacillacea strains. *Spill Science & Technology Bulletin*, v. 8, n. 5, p. 503-507, 2003. DOI:10.1016/S1353-2561(03)00068-9

ÇAKİR, O. et al. Selection of cutting fluids in machining processes. *Journal of Achievements in materials and Manufacturing engineering*, v. 25, n. 2, p. 99-102, 2007. https://www.researchgate.net/publication/40543038_Selection_of_cutting_fluids_in_machining_processes

De CHIFFRE L (1990) *Metal Cutting Mechanics and Applications*, Technical University of Denmark. (D. Sc. Dissertation).

DE CHIFFRE, L. (2009) *Theoretical Models for Orthogonal Cutting*, DTU Technical University of Denmark, IPL: 1–33. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/theoretical-models-for-orthogonal-cutting>

CLARK, M. M. et al. (2005) An Evaluation of the Colloidal Stability of Metal Working Fluid. *Journal of Colloid and Interface Science* 284:477–488. DOI:10.1016/j.jcis.2004.07.027

COETSER, S. E.; CLOETE, T. E. Biofouling and biocorrosion in industrial water systems. *Critical reviews in microbiology*, v. 31, n. 4, p. 213-232, 2005. DOI: 10.1080/10408410500304074

COSTIGAN, M. G. (2003) Hydrogen sulfide: UK occupational exposure limits. *Occup Environ Med* 60, 308–312. <http://dx.doi.org/10.1136/oem.60.4.308>

CYPROWSKI, M. et al. Microbial and endotoxin contamination of water-soluble metalworking fluids. *Int. J. Occup. Med. Environ. Health* 2007;20:365-371. <http://dx.doi.org/10.2478/v10001-007-0036-y>.

DAVIS, S. H. Thermocapillary instabilities. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 19, n. 1, p. 403-435, 1987. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.19.010187.002155>

DAVIS, J. R. ed. ASM International Handbook. *Specialty Handbook: Stainless Steels*. Materials Park, ASM International, 1994. p. 20 ISBN: 978-0-87170-503-7

DARMAWAN, Raden et al. Isolation and evaluation of PAH degrading bacteria. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, v. 6, n. 3, p. 1, 2015. doi:10.4172/2155-6199.1000283

DAVIM, J. P. et al. Experimental studies on drilling of aluminium (AA1050) under dry, minimum quantity of lubricant, and flood-lubricated conditions. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, v. 220, n. 10, p. 1605-1611, 2006. DOI:10.1243/09544054JEM557

DEORSOLA, F. A. et al. Synthesis, characterization and environmental assessment of nanosized MoS₂ particles for lubricants applications. *Chemical engineering journal*, v. 195, p. 1-6, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.04.080>

DETTMER, T. 2004. Not Water Miscible Metalworking Fluids on the Basis of Renewable Raw Materials. *Dr.-Ing. Diss., TU Braunschweig, Vulkan Verlag, Essen, Germany*. (German)

DETTMER, T. *Nichtwassermischbare Kühlschmierstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe*. Vulkan-Verlag GmbH, 2006. ISBN 10: 3802786947

DIAZ, M. et al. Evaluation of native acidophilic algae species as potential indicators of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) soil contamination. *Journal of applied phycology*, v. 27, n. 1, p. 321-325, 2015. ISSN : 0921-8971

DICKINSON, E. *An introduction to food colloids*. Oxford:Oxford University Press. 1992. 216 p ISBN-13: 978-0198552239

DILGER, S.; FLURI, A.; SONNTAG, H. G. Bacterial contamination of preserved and non-preserved metalworking fluids. *Int J Hyg Environ Health*. 2005;208(6):467-476. DOI: 10.1016/j.ijheh.2005.09.001

DIN 51360-2, 1981. Testing of Cooling Lubricants; Determination of Corrosion Preventing Characteristics of Cooling Lubricants Mixed with Water; Chip/filter Paper Method. German Institute of Standardization. Beuth Verlag, Berlin, Germany (in German).

DIN 51385 (2013) *Lubricants Processing Fluids for Forming and Machining of Materials—Terms*, Beuth-Verlag.

https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=DIN%2051385&item_s_key=00616098

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI N. L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais 7.ed.* São Paulo: Artliber Editora, 2010. 262p. ISBN13: 978-8587296016

DUCHAINÉ, C. et al. Workers Exposed to Metalworking Fluids (FC) – *Evaluation of Bioaerosol Exposure and Effects on Respiratory and Skin Health Studies and Research Projects / Report R-745*, Montréal, IRSST, 2012, 75 pages. ISBN: 978-2-89631-624-3 (PDF)

EL BARADIE, M. A. Cutting Fluids, Part I: Characterisation, *Journal of Materials Processing Technology* 56 (1996) 786-797. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01892-1](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01892-1)

ELIAS, Sivan; BANIN, Ehud. Multi-species biofilms: living with friendly neighbors. *FEMS microbiology reviews*, v. 36, n. 5, p. 990-1004, 2012. DOI: 10.1111/j.1574-6976.2012.00325.x

van ELSAS, J. D.; TREVORS, J. T.; JANSSON, J. K.; NANNIPIERI P. *Modern Soil Microbiology*, Second Edition CRC Press, 21 de dez de 2006 - 672 p. DOI <https://doi.org/10.1201/9781420015201>

ELSMORE, R. The survival of *Legionella pneumophila* in dilute metalworking fluids. *Tribiol Int* 2003;22:213–217. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(89\)90159-X](https://doi.org/10.1016/0301-679X(89)90159-X)

EVANS, R. Selection and testing of metalworking fluids. In: *Metalworking Fluids (MWFs) for Cutting and Grinding*. Woodhead Publishing, 2012. p. 23-78. <https://doi.org/10.1533/9780857095305.23>

FABIAN, F. W.; PIVNICK, H. Growth of bacteria in soluble oil emulsions. *Appl Microbiol* 1953;1:199–203. DOI: 10.1128/am.1.4.199-203.1953

FALKINHAM, J. O. Mycobacterial aerosols and respiratory disease. *Emerg. Infect. Dis.* 2003;9:763–767. DOI 10.3201/eid0907.02-0415

FALKINHAM, J. O. Effects of biocides and other metal removal fluid constituents on *Mycobacterium immunogenum*. *Appl Environ Microbiol* 2009;75:2057–2061. doi: 10.1128/AEM.02406-08

FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais, 12a ed. São Paulo; Edgard Blucher, 2006. 751p. ISBN 978-85-212-1419-9

FERREIRA, E. E. et al. Reologia de suspensões minerais: uma revisão. *Revista Esc. Minas*, v. 58, n. 1, 2005. DOI:10.1590/S0370-44672005000100014

FINZI, M. B. A., et al. (2016). avaliação de fluidos de corte em ensaios de esclerometria pendular. In *IX Congresso Nacional De Engenharia Mecânica*. DOI:10.20906/CPS/CON-2016-1586

FISHWICK, D. et al. (2005) Respiratory symptoms, immunology and organism identification in contaminated metal working fluid workers. What you see is not what you get. *Occup Med* 2005;55(3):238-241. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqi049>

FLEMMING, H. C.; WINDENGER, J. Extracellular polymeric substances (EPS): the biofilm construction material. In: Weber J, Sand W (eds) *Biofouling and materials*: EDMZ, COST 520 workshop. EDMZ, Bern, 1999:2–18. <https://doi.org/10.1590/S1517-83822010000100016>

FOLTZ, G. Corrosion and Metalworking Fluids. *Production Machining*, Article From: 5/15/2003, disponível em: <http://www.productionmachining.com/articles/corrosion-and-metalworking-fluids>. Acessado em 10/10/2014.

FORBES, E. S.; REID, A. J. D. Liquid phase adsorption/reaction studies of organo-sulfur compounds and their load-carrying mechanism. *Asle Transactions*, v. 16, n. 1, p. 50-60, 1973. <https://doi.org/10.1080/05698197308982704>

FORD, T.; MITCHELL, R. The ecology of microbial corrosion. *Advances in Microbial Ecol.* 1990;11:231–262. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-7612-5_6

FOX, N. J.; STACHOWIAK, G. W. Vegetable oil-based lubricants—a review of oxidation. *Tribol Int* 2007;40:1035–1046. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2006.10.001>

FOXALL-VANAKEN, S. et al. Common components of industrial metalworking fluids as sources of carbon for bacterial growth. *Appl Environ Microbiol* 1986;51:1765–9. DOI: 10.1128/aem.51.6.1165-1169.1986

FRANCO, S. D. *Contribuição ao Estudo do Desgaste Abrasivo de Materiais Polifásicos*; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, Uberlândia, MG, Brasil, 1989.175p. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14919>

FRANK-STROMBORG, M. (1989): The epidemiology and primary prevention of gastric and esophageal cancer. A worldwide perspective. *Cancer Nursing* 12:53–64. PMID: 2713838. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2713838/>

FRASER. P. et al. (1989): Further results from a census based mortality study of fertiliser manufacturers. *Br J Ind Med* 46:38–42. <http://www.jstor.org/stable/27726724>. Accessed 11 Sept. 2023.

FRIESEN, M. C. et al. Distinguishing the common components of oil-and water-based metalworking fluids for assessment of cancer incidence risk in autoworkers. *American journal of industrial medicine.* 2011;54(6):450-460. <https://doi.org/10.1002/ajim.20932>

van der GAST, C. et al. Identification and characterization of bacterial populations of an in-use metalworking fluid by phenotypic and genotypic methodology. *Intl Biodet Biodeg* 2001;47:173–123 DOI:10.1016/S0964-8305(01)00036-1

van der GAST, C. J. et al. Bacterial community structure and function in a metalworking fluid. *Environ Microbiol* 2003;5:453–461. DOI: 10.1046/j.1462-2920.2003.00428.x

van der GAST, C. J.; THOMPSON, I. P. Effects of pH amendment on metal working fluid wastewater biological treatment using a defined bacterial consortium. *Biotechnol Bioeng* 2004;89(3):357–366. DOI: 10.1002/bit.20351

GAUTHIER, S. L. Metalworking fluids: oil mist and beyond. *Appl Occu Environ Hyg* 2003;18:818–824. DOI: 10.1080/10473220390237313

GHOSH, Pranab; DAS, Moumita. Study of the influence of some polymeric additives as viscosity index improvers and pour point depressants–Synthesis and characterization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 119, p. 79-84, 2014. DOI:10.1016/j.petrol.2014.04.014

GILBERT, P., PEMBERTON, D. AND WILKINSON, D.E. (1990) Barrier properties of the Gram-negative cell envelope towards high molecular weight polyhexamethylene biguanides. *Journal of Applied Bacteriology* 69, 585–592. DOI: 10.1111/j.1365-2672.1990.tb01552.x

GILBERT, Y.; VEILLETTE, M.; DUCHAINE, C. Metalworking fluids biodiversity characterization. *J. Appl. Microbiol* 2010;108:437–449. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2009.04433.x

GLASSE, Benjamin et al. Turbidimetry for the stability evaluation of emulsions used in machining industry. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 92, n. 2, p. 324-329, 2014. DOI:10.1002/cjce.21930

GLEICH, H. (2004) *Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Adhäsionsvermögen von Polymerwerkstoffen am Beispiel von PP und PBT und deren Beeinflussung durch die Niederdruck-Plasmatechnologie*, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften» Maschinenbau und Verfahrenstechnik. 3–22. (Dr. -Ing. Dissertation). <http://purl.oclc.org/NET/duett-07132004-134530>

GODLEVSKIY, V. A.; VOLKOV, A. V.; MARKOV, V. V. *International Journal of Advances in Machining and Forming Operations*, 2009, 1(2), 87–92. ISBN 978-0-85709-114-7

GOH, C. L.; GAN, S. L. (1994) The incidence of cutting fluid dermatitis among metalworkers in a metal fabrication factory: a prospective study. *Contact Dermatitis* 31, 111–115. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0536.1994.tb01929.x>

GOLDBERG, S.; KONIS, Y.; ROSENBERG, M. Effect of cetylpyridinium chloride on microbial adhesion to hexadecane and polystyrene, *Appl. Environ. Microbiol.* 56, 1678, 1990. doi: 10.1128/aem.56.6.1678-1682.1990

GOMES, R. C. et al. “Correlação entre baixas temperaturas e o controle da contaminação microbiana nos fluidos de corte”. In: 4º COBEF - Congresso Brasileiro de Fabricação, Águas de São Pedro – SP, abril de 2007. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjPq_uGvM2BAxW5rJUCHVN6DXYQFnoECBoQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.abcm.org.br%2Fanais%2Fcobef%2F2007%2Ffiles%2F011068210.pdf&usg=AOvVaw375RcjJSbWiDASHsmEJBoJ&opi=89978449

GORDON, T. Dose-dependent pulmonary effects of inhaled endotoxin in guinea pigs. *Environ Res* 1992;59: 416–426. [https://doi.org/10.1016/S0013-9351\(05\)80045-3](https://doi.org/10.1016/S0013-9351(05)80045-3)

GORDON, T. et al. *Mycobacterium immunogenum* causes hypersensitivity pneumonitis-like pathology in mice. *Inhal Toxicol* 2006;18:449–456. DOI: 10.1080/08958370600563904

GRATTAN, C. E. et al. (1989) Cutting fluid dermatitis. *Contact Dermatitis* 20, 372–376. DOI: 10.1111/j.1600-0536.1989.tb03175.x

GRUB, A. M.; FINZI, M. B. A.; RIBAS, R. M.; MACHADO, Á. R. *Evaluation of the Performance of Contaminated Cutting Fluids when Turning AISI 304 Austenitic Stainless Steel*. LUBMAT 2014 - Lubrication, Maintenance and Tribotechnology Conference & Exhibition, 25-27 June 2014, Manchester, UK.

GRUB, A. M.; FINZI, M. B. A.; MACHADO, A. R. **Avaliação das Forças de Usinagem no Processo de Torneamento Utilizando Fluidos de Corte Contaminados Por Microrganismos**, aceito no CONEM 2014 – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 10-15 Agosto 2014, Uberlândia-MG. BR.

GUSTAVSSON, P.; GUSTAVSSON, A.; HOGSTED, T. C. (1988): Excess of cancer in Swedish chimney sweeps. *Br J Ind Med* 45:777–781. DOI:10.1136/oem.45.11.777

HADIBARATA, T.; KRISTANTI, R. A. Potential of a white-rot fungus *Pleurotus eryngii* F032 for degradation and transformation of fluorene. *Fungal biology*, v. 118, n. 2, p. 222-227, 2014. DOI:10.1016/j.funbio.2013.11.

HADIBARATA, Tony; TACHIBANA, Sanro; ITOH, Kazutaka. Biodegradation of chrysene, an aromatic hydrocarbon by *Polyporus* sp. S133 in liquid medium. *Journal of hazardous materials*, v. 164, n. 2, p. 911-917, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.08.081>

HAMAMURA, Natsuko; WARD, David M.; INSKEEP, William P. Effects of petroleum mixture types on soil bacterial population dynamics associated with the biodegradation of hydrocarbons in soil environments. *FEMS microbiology ecology*, v. 85, n. 1, p. 168-178, 2013. <https://doi.org/10.1111/1574-6941.12108>

HAMILTON, Washington A. Sulphate-reducing bacteria and anaerobic corrosion. *Annual Reviews in Microbiology*, v. 39, n. 1, p. 195-217, 1985. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.39.100185.001211>

HANDBOOK, A. S. M. Volume 16: Machining. **ASM International Handbook Committee, ASM International, Electronic**, 1989. ISBN: 978-0-87170-022-3

HANDBOOK, Metals. vol. 16 Machining, “**Tapping**”(ASM International 1989), p. 255-267, 1989. ISBN: 978-0-87170-022-3

HARITASH, A. K.; KAUSHIK, C. P. Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review. *Journal of hazardous materials*, v. 169, n. 1, p. 1-15, 2009. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.03.137

HARKINS, W. D.; MATTOON, R. W.; CORRIN, M. C. (1946) Structure of Soap Micelles as Indicated by X-rays and Interpreted by the Theory of Molecular Orientation: II. The Solubilization of Hydrocarbons and Other Oils in Aqueous Soap Solutions. *Journal of Colloid Science* 1(1):105–126. [https://doi.org/10.1016/0095-8522\(46\)90010-4](https://doi.org/10.1016/0095-8522(46)90010-4)

HILL, E.C., AND TARIK AL-ZUBAIDY: Some health aspects of infections in oil and emulsions. *Tribol. Int.* 8:161–164 (1979).

HODGSON, M. J. et al Hypersensitivity pneumonitis in a metalworking environment. *Am. J. Ind. Med.* 2001;39(6):616 – 628. DOI: 10.1002/ajim.1061

HOLDOM, R. S. Microbial spoilage of engineering materials: Part 1: The power of the microbe. *TRIBOLOGY international*, v. 9, n. 4, p. 165-170, 1976. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(76\)90094-3](https://doi.org/10.1016/0301-679X(76)90094-3).

HOWES, T. D. et al. Environmental aspects of grinding fluids. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 40, n. 2, p. 623-630, 1991. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61138-](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61138-)

von HOLY, A. 1985. Microbial Corrosion. *International workshop on Industrial Biofouling and Biocorrosion*. Mulheim, Germany, September, 1997.

HOWELL, J. K.; LUCKE, W. E.; STEIGERWALD, J. C. 1996. Metalworking fluids: composition and use, p 13–20. In *Proceedings of the Industrial Metalworking Environment—Assessment and Control*, 13 to 16 November 1995, Dearborn, MI.

Van HOOK SJ, SCHATZ MF, SWIFT JB, MCCORMICK WD, SWINNEY HL (1997) Long-Wavelength Surface-Tension-Driven Benard Convection: Experiment and Theory. *Journal of Fluid Mechanics* 345:45–78. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112097006101>

HUNTER, R. J. Foundations of Colloid Science. Oxford Science Publications. volume II, 908-947, 1989. ISBN: 9780198505020

International Agency for Research on Cancer: Iron and Steel Founding. IARC Monographs on Carcinogenicity of Chemicals to Man Suppl 7, p. 224 (1987). https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjC7faSu82BAxU0pZUCHVdUDpIQFnoECBQQAQ&url=https%3A%2F%2Fpublications.iarc.fr%2F_publications%2Fmedia%2Fdownload%2F1575%2F8cd3218c7ae9e175a49941630a923b644fb0f881.pdf&usg=AOvVaw1FFxyq3abBGAW1AjeDzrjm&opi=89978449

International Agency for Research on Cancer: N-nitrosodi-ethanolamine (Group 2B). IARC Monographs on Carcinogenic Risk to Humans 77:403 (2000). https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiT37r5us2BAxXFnpUCHYYzA-wQFnoECBMQAQ&url=https%3A%2F%2Fpublications.iarc.fr%2F_publications%2Fmedia%2Fdownload%2F2537%2Ff8177da5af28d395fd8ea8d306f3167dfd47d51e.pdf&usg=AOvVaw14gadEunkfpU3w0iPreKqY&opi=89978449

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P.; BERGMAN, Theodore L. *Fundamentos de Transferência de Calor E de Massa*. Grupo Gen-LTC, 2000. ISBN-13: 978-8521636595

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 12185. Crude Petroleum and Petroleum Products Determination of Density Oscillating U-Tube Method. 1996. <https://www.iso.org/standard/21124.html>

IVERSON, Warren P. Microbial corrosion of metals. *Advances in applied microbiology*, v. 32, p. 1-36, 1987. [https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(08\)70077-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(08)70077-7)

JAWAHIR, I. S. et al. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 60, n. 2, p. 603-626, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.002>

JOKSCH, S. Waste-Free CrankShaft Manufacture. Care of Resources and Cost Optimization by Use of Multi-function Oils and Compatible Metalworking Fluids. *Tribologie und Schmierungstechnik* 2011;57(4):28–32.

JOHNSON, D. L.; PHILLIPS, M. L. UV disinfection of soluble oil metalworking fluids. *AIHA J.* 2002;63:178-183. DOI: 10.1080/15428110208984702

JOVÉ, P. et al. Fungal biodegradation of anthracene-polluted cork: A comparative study. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, v. 51, n. 1, p. 70-77, 2016. DOI: 10.1080/10934529.2015.1079114

KADRI, T. et al. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by fungal enzymes: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.08.023>

KAPOOR, R.; YADAV, J. S. Development of a rapid ATP bioluminescence assay for biocidal susceptibility testing of rapidly growing mycobacteria. *Journal of clinical microbiology*, v. 48, n. 10, p. 3725-3728, 2010. DOI: 10.1128/JCM.01482-10

KAPOOR, Renuka; YADAV, Jagjit S. Expanding the mycobacterial diversity of metalworking fluids (MWFs): evidence showing MWF colonization by *Mycobacterium abscessus*. *FEMS microbiology ecology*, v. 79, n. 2, p. 392-399, 2012. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2011.01227.x

KAWAMURA, M.; MORITANI, H.; ESAKI, Y.; FUJITA, K. (1986) The Mechanism of Synergism between Sulfur- and Phosphorus-Type EP Additives. *ASLE Transactions* 29(4):451–456. <https://doi.org/10.1080/05698198608981707>

KHAN, U. H. I.; YADAV, J. S. Real-time PCR assays for the genus-specific detection and quantification of culturable and non-culturable mycobacteria and pseudomonads in metalworking fluids. *Mol Cell Prob* 2004;18:67–73. DOI: 10.1016/j.mcp.2003.09.004

KINLOCH, A. J. *Adhesion and Adhesives - Science and Technology*, Chapman and Hall, 1987. DOI:10.1007/978-94-015-7764-9

KLIEN, S.; SURBERG, C. H.; STEHR, W. (2009) *Temperaturbedingte Schmierstoffmigration auf technischen Oberflächen*, 50. GfT-Fachtagung, Gesellschaft für Tribologie e.V.

KOCH T, RABENSTEIN A, KUVR J, WALTER A (2006) Mikrobiologie der wassergemischten Kühlschmierstoffe–Auswirkung auf Leistung und Standzeit. DOI: 10.36198/9783838551807

KOCH, T. Auswirkungen des mikrobiellen Befalls von wassergemischten Kühlschmierstoffen auf das Zerspanergebnis (Teil 3). *HTM Härtereitechnische Mitteilungen*, v. 63, n. 2, p. 115-132, 2008. DOI:10.3139/105.100442

KOCH, T.; PASSMAN, F.; RABENSTEIN, A. Comparative study of microbiological monitoring of water-miscible metalworking fluids. *International Biodeterioration & Biodegradation* 2015;98:19–25. doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.11.015

KORKUT, I. et al. Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel, *Materials & Design* 2004;25:303–305. DOI:10.1016/j.matdes.2003.10.011

KREISS, K.; COX-GANSER, J. Metalworking fluid-associated hypersensitivity pneumonitis: a workshop summary. *Am. J. Ind. Med.* 1997;32:423– 432. DOI: 10.1002/(sici)1097-0274(199710)32:4<423::aid-ajim16>3.0.co;2-5

KURAM, Emel; OZCELIK, Babur; DEMIRBAS, Erhan. Environmentally friendly machining: vegetable based cutting fluids. In: *Green manufacturing processes and systems*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. p. 23-47. DOI:10.1007/978-3-642-33792-5_2

LAWAL, S. A.; CHOUDHURY, I. A.; NUKMAN, Y. Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals—a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v. 52, n. 1, p. 1-12, 2012. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2011.09.003

LEE M, CHANDLER A. C. (1941) A study of the nature, growth and control of bacteria in cutting compounds. *J Bacteriol* 41(3):373–386 DOI: 10.1128/jb.41.3.373-386.1941

LEE, W. et al. Role of sulfate-reducing bacteria in corrosion of mild steel: A review. *Biofouling*, v. 8, n. 3, p. 165-194, 1995. ISSN0892-7014

LI, P. et al. Biodegradation of pyrene and phenanthrene in soil using immobilized fungi *Fusarium* sp. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, v. 75, n. 3, 2005. DOI: 10.1007/s00128-005-0773-1

LINGMANN, H.; SCHRITZER, W.; ORTH, R. Mikrobiologie von Tribologie und Kuhlsmierstoffen - hygienische Aspekte. *Schmierngstechnik*. 1980;27(4):113-118.

LIU, HUI-MING; LIN, YUN-HUA; TSAI, MIN-YI; Lin, Wen-Hai. Occurrence and characterization of culturable bacteria and fungi in metalworking environments. *Aerobiologia* (2010) 26:339–350 DOI:10.1007/s10453-010-9169-8

LODDERS, N., KÄMPFER, P., A combined cultivation and cultivation-independent approach shows high bacterial diversity in water-miscible metalworking fluids. *Syst. Appl. Microbiol.* 2012;35:246–252. DOI: 10.1016/j.syapm.2012.03.006

LONON, M. K.; ABANTO, M.; FINDLAY, R. H. A pilot study for monitoring changes in the microbiological component of metalworking fluids as a function of time and use in the system. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1999;60:480–485. DOI: 10.1080/00028899908984468

LUCCA, D. A.; BRINKSMEIER, E.; GOCH, G. Progress in assessing surface and subsurface integrity. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 47, n. 2, p. 669-693, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63248-X](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63248-X)

LUCCHESI, E. G.; EGUCHI, S. Y.; MORAES, A. M. Influence of a triazine derivative-based biocide on microbial biofilms of cutting fluids in contact with different substrate. *J Ind Microbiol Biotechnol.* 2012. doi:10.1007/s10295-017-1081-x

LUO, Lijuan et al. Removal and transformation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons in water by live and dead microalgae. *Process Biochemistry*, v. 49, n. 10, p. 1723-1732, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.06.026>

LUTEY, R. W.; Process cooling water. In: *Handbook of Biocide and Preservative Use*. Rossmore, H.W. Editora Blackic Academic & Professional, 1995:51-82. ISBN-10 9401045917

LYMAN, T. (Ed.) Metals Handbook: Forming, 8th ed. Vol. 4, *American Society for Metals*, Metals Park, OH, p. 25, 1979. ISBN-10 0871700638

MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M; SILVA, M. B. *Teoria da Usinagem dos Materiais*. 3. ed. São Paulo: EdgardBlücher. 2015. ISBN: 9788521208464

MACKERER, Carl R. Health effects of oil mists: a brief review. *Toxicology and Industrial Health*, v. 5, n. 3, p. 429-440, 1989. DOI: 10.1177/074823378900500304

MAGNANI, C. et al. Occupation and five cancers: a case-control study using death certificates. *Occupational and Environmental Medicine*, v. 44, n. 11, p. 769-776, 1987. doi: 10.1136/oem.44.11.769

MAILLARD, J.-Y. AND RUSSELL, A.D. (2000) Biocides: activity and resistance — present status. In *World Markets Series, Business Briefing: Global Health Care* ed. Cooper, E. and Gahan, E. pp. 98–103. London: World Markets Research Centre.

MAILLARD, J.-Y. Bacterial target sites for biocide action. *Journal of applied microbiology*, v. 92, n. s1, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.92.5s1.3.x>

MARCHAND, G. et al. Evaluation of bacterial contamination and control methods in soluble metalworking fluids. *J Occup Environ Hyg* 2010;7:358– 366. doi: 10.1080/15459621003741631.

MAO, J. et al. Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon-contaminated soil by a bacterial consortium and associated microbial community changes. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 70, p. 141-147, 2012. DOI:10.1016/j.ibiod.2012.03.002

MARCO-URREA, E.; GARCIA-ROMERA, I.; ARANDA, E. Potential of non-ligninolytic fungi in bioremediation of chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons. *New biotechnology*, v. 32, n. 6, p. 620-628, 2015. DOI: 10.1016/j.nbt.2015.01.005

MARINESCU, I. D. et al. *Tribochemistry of Abrasive Machining*. Tribology of Abrasive Machining Processes. 2. ed. 483–517. Capítulo 16. 2013. eBook ISBN: 9781437734683

MANG, T.; NEUMANN, W. Einige Gesichtspunkte bei der Beurteilung wassermischbarer Kühlschmierstoffe für die Zerspanung. *Mineraloeltechnik*, v. 15, n. 12/13, p. 1-41, 1970.

MANG, T.; FREILER, C.; HÖRN, D. Metalworking Fluids In: *Lubricants and Lubrication*. 2007;384–521.

MANOJKUMAR, K.; GHOSH, Amitava. Assessment of cooling-lubrication and wettability characteristics of nano-engineered sunflower oil as cutting fluid and its impact on SQL grinding performance. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 237, p. 55-64, 2016. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2016.05.030

MASSMANN, T. C. *Wirkmechanismen additiver Schmierstoffe in der Kaltumformung*. RWTH Aachen, Shaker Verlag, 2007. 18: 5–46. (Dr. -Ing. Dissertation). ISBN-10 : 3832264191

MARISCAL, A. et al. (2007) A fluorescent method for assessing the antimicrobial efficacy of disinfectant against *Escherichia coli* ATCC 35218 biofilm. *Appl Microbiol Bio-technol* 77:233 –240. DOI: 10.1007/s00253-007-1137-z

MARMUR, A. A. Guide to the Equilibrium Contact Angles Maze. In: (Ed.). *Contact Angle, Wettability and Adhesion*, Volume 6: CRC Press, 2009. P.3-18. ISBN 978-90-04-16932-6. ISBN 9780429088384

MATTSBY-BALTZER, I. et al. Microbial growth and accumulation in industrial metalworking fluids. *Appl Environ Microbiol*. 1989;55:2681–9. DOI: 10.1128/aem.55.10.2681-2689.1989

MCCLEMENTS, D. J. 1999. *Food emulsions: principles, practice and techniques*. Boca Raton: CRC Press. 392 p. ISBN-13: 978-1-4987-2669-6

MCCOY, J. S. Tracing the Historical Development of Metalworking Fluids. *Manufacturing engineering and materials processing*, v. 41, p. 1-1, 1994. ISBN 9781351228213

MCLAGGAN, D.; STEPHEN, J.; BOOTH, I. R. Regulation of cytoplasmic pH in bacteria. *Principles of medical biology*, v. 9, p. 65-77, 1998. doi: 10.1128/mr.49.4.359-378.1985

De MELLO, J. D. B., BINDER, R. A methodology to determine surface durability in multifunctional coatings applied to soft substrates, *Tribology International*. 39 (2006) 769–773. DOI:10.1016/j.triboint.2005.07.015

MENA, K. D.; GERBA, C. P. Risk assessment of *Pseudomonas aeruginosa* in water. In: *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Vol 201*. Springer US, 2009. p. 71-115. DOI: 10.1007/978-1-4419-0032-6_3

MESSIAS, J. M. et al. Screening *Botryosphaeria* species for lipases: Production of lipase by *Botryosphaeria ribis* EC-01 grown on soybean oil and other carbon sources. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 45, n. 6, p. 426-431, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2009.08.013>

MEYER, D. (2011) Online Monitoring of the Chemical and Microbial Properties of Metalworking Fluids the Electronic Nose. *Proceedings of the Fourth Symposium on Metal Removal Fluids*, 14–16.09.2011, Barcelona, Spain, 121–127. https://www.researchgate.net/publication/286276069_Online_Monitoring_of_the_Chemical_and_Microbial_Properties_of_Metalworking_Fluids_the_Electronic_Nose

MEYER, D. (2014) CoolArt: Bedarfsgerechter Einsatz von Kühlschmierstoffen in der Fertigung. Proceedings of the 9th Bremer KSS-Workshop, 25–26.03.2014, Bremen, Germany.

MEYER, Daniel; REDETZKY, Marvin; BRINKSMEIER, Ekkard. Microbial-based metalworking fluids in milling operations. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.019>

MILLS, B., REDFORD, A. H., 1983, *Machinability of Engineering Materials*, Applied Science Publications, London and New York; DOI: 10,1007/978-94-009-6631-4

MIRER, F. 2003. Updated epidemiology of workers exposed to metalworking fluids provides sufficient evidence for carcinogenicity. *Appl Occup Environ Hyg* 18:902–912. <https://doi.org/10.1080/10473220390237511>

MOORE, S. J. et al. Mycobacterial contamination of metalworking fluids: involvement of a possible new taxon of rapidly growing mycobacteria. *AIHA J* 2000;61:205–213. <https://doi.org/10.1080/15298660008984529>

MORRISON, I.; ROSS, S. (2002), *Colloidal Dispersions—Suspensions, Emulsions, and Foams*, John Wiley and Sons, Inc., New York, pp 383- 419. CRID 1130000796852168192.

MULLIS, S. N.; FALKINHAM 3rd, J.O., 2013. Adherence and biofilm formation of Myco- bacterium avium, Mycobacterium intracellulare and Mycobacterium abscessus to household plumbing materials. *J. Appl. Microbiol.* 115, 908e914. [http:// dx.doi.org/10.1111/jam.12272](http://dx.doi.org/10.1111/jam.12272).

MUNIZ, C A de S. *Novas formulações de fluidos de corte: otimização, propriedades e recuperação do óleo usado*. 2008. 177 f. Tese (Doutorado em Físico-Química; Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008. <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/17688>.

MURAT, J. B. et al. Factors influencing the microbial composition of metalworking fluids and potential implications for machine operator's lung. *Appl Environ Microbiol* 2012;78:34–41. <https://doi.org/10.1128/AEM.06230-11>

NARAYAN, R. A. O. S.; SATYANARAYANA, B.; VENKATASUBBAIAH, K. Experimental investigation of microbial contamination of nano cutting fluids with Cnt inclusion. *G J Res Eng* 2011;17. ISSN: 0975-5861

NAU, H. *Lebensmitteltoxikologie: Rückstände und Kontaminanten: Risiken und Verbraucherschutz; mit 43 Tabellen*. Georg Thieme Verlag, 2003. ISBN: 9783826333309, 3826333306

NEDIĆ, B.; PERIĆ, S.; VURUNA, M. Monitoring physical and chemical characteristics oil for lubrication. *Journal Tribology in industry*, v. 31, n. 3-4, p. 59-66, 2009. https://www.researchgate.net/publication/293416663_Monitoring_physical_and_chemical_characteristics_oil_for_lubrication

NEUGET, A. I.; WYLIE, P. (1987): Occupational cancers of the gastrointestinal tract. I. Colon, stomach, and esophagus. State of the Art Reviews: *Occup Med* 2:109–135. PMID: 3306970.

NIOSH — National Institute of Occupational Safety and Health (1998). Selected Potentially Hazardous Chemical Ingredients, Additives, and Contaminants. Criteria for a Recommended Standard: Occupational Exposure to Metalworking Fluids, U.S. Department of Health and Human Services. DHHS (NIOSH) Publication Number 98-102 (Chapter 4). <https://www.osha.gov/metalworking-fluids/manual>

NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. *Metalworking fluids: recommendation for chronic inhalation studies*. NIOSH, Cincinnati 2001. <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi2s-G7t82BAxUirZUCHXzCBUMQFnoECBQQAQ&url=https%3A%2F%2Fntp.niehs.nih.gov%2Fsites>

%2Fdefault%2Ffiles%2Fntp%2Fhtdocs%2Fchem_background%2Fexsumpdf%2Fmwfs_508.pdf&usg=AOvVaw1WZkOZelZpx_UzLadIUNr3&opi=89978449

NORRBY, T. Environmentally adapted lubricants—where are the opportunities? *Industrial lubrication and Tribology*, v. 55, n. 6, p. 268-274, 2003. <https://doi.org/10.1108/00368790310496400>

OLIVEIRA JÚNIOR, M. M. *Lubrificação sólida em meio fluido*. 2013, 94f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia - MG. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14940>

OLIVEIRA, J. F. G.; ALVES, S. M.; Adequação ambiental dos processos de usinagem utilizando Produção mais limpa como estratégia de gestão ambiental. *Produção (São Paulo. Impresso)*, v. 17, p. 129-138, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132007000100009>

OLIVEIRA, J. F. G.; ALVES, S. M. (2006) Development of Environmentally Friendly Fluid for CBN Grinding. *Annals of the CIRP—Manufacturing Technologies* 55(1):343– 346. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60431-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60431-4)

OLIVEIRA, R. C. G; FIGUEIREDO, A. M. P. *Estado da arte sobre o processamento de tratamento eletrostático de emulsões de petróleo e derivados*. Rio de Janeiro: PETROBRAS, CENPES, DIPLOT, 1989, 107 f. (Relatório DIPLOT 674-12978).

PETTERSON, A. (2006) Environmentally Adapted Lubricants—Properties and Performance, Lulea University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering. (Doctoral Thesis). URN:NBN:SE:LTU:diva-26347

ORTIZ, C.; GUIAMET, P. S.; VIDELA, H. A. Relationship between biofilms and corrosion of steel by microbial contaminants of cutting-oil emulsions. *International Biodeterioration*, v. 26, n. 5, p. 315-326, 1990. [https://doi.org/10.1016/0265-3036\(90\)90024-2](https://doi.org/10.1016/0265-3036(90)90024-2)

PADAN, Etana; ZILBERSTEIN, Dan; ROTTENBERG, Hagai. The proton electrochemical gradient in *Escherichia coli* cells. *The FEBS Journal*, v. 63, n. 2, p. 533-541, 1976. <https://doi.org/10.1021/bi00571a018>

PADAN, Etana; ZILBERSTEIN, Dan; SCHULDINER, Shimon. pH homeostasis in bacteria. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Reviews on Biomembranes*, v. 650, n. 2-3, p. 151-166, 1981. [https://doi.org/10.1016/0304-4157\(81\)90004-6](https://doi.org/10.1016/0304-4157(81)90004-6)

PALMOWSKI, B., et al. Identification of marker substances for the efficient online monitoring of metal working fluids. In: Proceedings of 4th Conference and Exhibition on Lubrication, Maintenance and Tribotechnology (LUBMAT). Manchester, UK: June. 2014. p. 25-27.

PARK, D. U. et al. (2008). Association between use of synthetic metalworking fluid and risk of developing rhinitis-related symptoms in an automotive ring manufacturing plant. *Journal of Occupational Health*, 50(1), 212–220. <https://doi.org/10.1539/joh.O7006>

PASSMAN, F. J. 1988. Starting from scratch: microbial problems in metalworking fluid. *Lubr. Eng.* 44, 431–433.

PASSMAN, F. J.; ROSSMOORE, H. W.; Reassessing the health risks associated with employee exposure to MWF microbes. *Lubrication. Engineers.* v. 58, p. 30-38, 2002. https://www.researchgate.net/publication/279714781_Reassessing_The_Health_Risks_Associated_With_Employee_Exposure_To_Metalworking_Fluid_Microbes

PASSMAN, Frederick J. Microbial problems in metalworking fluids. *Tribology & lubrication technology*, v. 60, n. 4, p. 24-27, 2004. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=231859f80d2e8513cc1bf7aa5589d326e5661d15>

PASSMAN, Frederick J. Microbiology of metalworking fluids. *Manufacturing engineering and materials processing*, v. 71, p. 195, 2006. ISBN 9781351228213

PASSMAN, F. J. et al. Real-time testing of bioburdens in metalworking fluids using adenosine triphosphate as a biomass indicator. *Tribology Transactions*, v. 52, n. 6, p. 788-792, 2009. <https://doi.org/10.1080/10402000903097486>

de PAULA, A. M. *Ressourcenschonender Einsatz von Khlsch-mierstoffen*, Ph.D. Thesis, University of Bremen, Bremen, Germany, 2005.

PAWLAK, Z. *Tribochemistry of lubricating oils*. Tribology and interface engineering, 45.2003 368p. ISBN: 9780080543260, 008054326X

PEREIRA, F. A. R. *Escoamento laminar de líquidos não-Newtonianos em seções anulares: estudo de CFD e abordagem experimental*. 229 f. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Química).

Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15099>

PERKINS, S. D.; ANGENENT, L. T. Potential pathogenic bacteria in metalworking fluids and aerosols from machining facility. *FEMS Microbiol Ecol* 2010;74:643–654.
<https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00976.x>

PETTERSON, A. (2006) *Environmentally Adapted Lubricants—Properties and Performance*, Lulea University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering. (Doctoral Thesis). URN:NBN:SE:LTU:diva-26347

PETTERSSON, A. High-performance base fluids for environmentally adapted lubricants. *Tribology international*, v. 40, n. 4, p. 638-645, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.11.016>

PIVNICK H, FABIAN FW (1954) Coliform bacteria in soluble oil emulsions. *Appl Environ Microbiol* 2(2):107–110. DOI: <https://doi.org/10.1128/am.2.2.107-110.1954>

PHAM, M.-Q. et al. Evaluation of ionic liquids as lubricants in micro milling—process capability and sustainability. *Journal of cleaner production*, v. 76, p. 167-173, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.055>

RABENSTEIN, A. et al. Microbial degradation of water miscible metal working fluids. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 2009;63:1023–1029. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.07.005>

RAKIC, R.; RAKIC, Z. The influence of metal working fluids on machine tool failures. *Wear* 2002;252:438–444. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00890-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00890-0)

RAO, D. N.; SRIKANT, R. R. Influence of emulsifier content on cutting fluid properties. *Journal of Engineering Manufacture* 2006;220:1803-1806. doi.org/10.1243/09544054JEM564

RAVE, A.; JOKSCH, S. Monitoring metalworking fluids. In: *Metalworking fluids (Mwfs) for cutting and grinding: fundamentals and recent advances*. Elsevier, 2012;317-337. ISBN: 9780857095305, 0857095307

REDETZKY, M.; RABENSTEIN, A.; PALMOWSKI, B.; BRINKSMIEIER, E. Microorganisms as a Replacement for Metal Working Fluids. *Advanced Materials Research*. 2014;966–967:357–364.
doi.org/10.4028

REDETZKY, M. et al. The Influence of Cell Counts, Cell Size, EPS and Microbial Inclusions on the Lubrication Properties of Microorganisms. *Production Engineering Research and Development* 2015;9(2):149–159. doi.org/10.1007/s11740-014-0592-5

REHBINDER, P. Verminderung der Ritzhärte bei Adsorption grenzflächenaktiver Stoffe. *Zeitschrift fuer Physik*. 1931 Mar 1;72(3-4):191-205. doi.org/10.1007/BF01341906

REHBINDER, P. A.; LICHTMAN, V. Effect of surface active media on strain and rupture in solids. In: *Proceedings of the Second International Congress of Surface Activity*. Buttersworths, 1957. p. 563-580.

REHBINDER, P.; WENSTRÖM, E. Stabilisierende Wirkung von Adsorptionsschichten grenzflächenaktiver Stoffe auf disperse Systeme. II. Stabilität von Blasen und Tropfen an Trennungsflächen. *Colloid & Polymer Science*. 1930 Nov 3;53(2):145-58. doi.org/10.1007/BF01428556

ROBERTSON, A. S.; WEIR, D. C.; SHERWOOD BURGE, P. Occupational asthma due to oil mists. *Thorax* 1988;43:200–205. http://dx.doi.org/10.1136/thx.43.3.200

RHODES, G. et al. Implementation of a quantitative real-time PCR assay for the detection of *Mycobacterium immunogenum* in metalworking fluids. *J Occup Environ Hyg* 2011;8:478–483. DOI: 10.1080/15459624.2011.590737

RÖCK, F.; BARSAN, N.; WEIMAR, U. (2008) Electronic Nose: Current Status and Future Trends. *Chemical Review* 108:705–725. (2008). https://doi.org/10.1021/cr068121q

ROCKER, M. (2010) *Kompendium Kühlschmierstoffe: Normen, Richtlinien und Regelwerke*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin 70–74. ISBN: 9783410203582

ROSENMAN, Kenneth D. Asthma, hypersensitivity pneumonitis and other respiratory diseases caused by metalworking fluids. *Current opinion in allergy and clinical immunology*, v. 9, n. 2, p. 97-102, 2009. doi: 10.1097/ACI.0b013e3283229f96.

ROSSI, C. G. F. T. et al. Microemulsões: uma abordagem básica e perspectivas para aplicabilidade industrial. *Rev Univ Rural Ser Cienc Exatas Terra*, v. 26, p. 45-66, 2007.

ROSSMOORE, H. W.; ROSSMOORE, L. A.; YOUNG, C. E. Microbial Ecology of an Automotive Engine Plant. *Biodeterioration Research* (1987) 1:255–268. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0949-9_27

ROSSMOORE, L. A.; ROSSMOORE, H. W. Metalworking fluid microbiology. In: Byers, editor. *Metalworking fluids*. New York: Marcel Decker Inc.; 1994;247–71.

ROSSMOORE, H. W. The Microbiology of metalworking fluids: deterioration, disease and disposal. *J Soc Tribol Lub Eng* 1995;51:172–178. DOI 10.1007/s00253-012-4055-7

ROSSMORE, H. W. (1974) Microbiological Causes of Cutting Fluid Deterioration. Dear born Michigan: Societ y of Manufacturing Engineers Technical Paper, pp. 1–15.

ROSSMOORE, H. W. (1989) Microbial degradation of water-based metalworking fluids. In: Moo-Young M, Cooney CL, Humphrey AE (eds) *Comprehensive biotechnology*, vol 3, chap 14. Pergamon Press, Oxford, pp 249–269

RUDNICK, L. R. (Ed.). *Synthetics, mineral oils, and bio-based lubricants: chemistry and technology*. CRC press, 2013. ISBN 9781138068216

SABINA, L. R.; PIVNICK, H. (1956) oxidation of soluble oil emulsions and emulsifiers by *Pseudomonas oleovorans* and *Pseudomonas formicans*. *Appl Microbiol* 4:171–175. doi: 10.1128/am.4.4.171-175.1956.

SAHA, R.; DONOFRIO, R.; BAGLEY, S. Quantitative real-time PCR detection of *Pseudomonas oleovorans* subsp. *lubricantis* using TaqMan-MGB assay in contaminated metalworking fluids. *Int Biodeterior Biodegrad* 2011;65:460–464. DOI:10.1016/j.ibiod.2010.10.013

SAHA, R.; DONOFRIO, R. S., The microbiology of metalworking fluids. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2012;94:1719–1730. <http://dx.doi.org/10.1007/s00253-012-4055-7>.

SALAGER, J.L. *Emulsion phase inversion phenomena*. In: JÖBLOM, J. (ed) *Emulsions and Emulsion Stability*, 2 ed, chapter 4, Boca Raton, CRC Press, 2006. eBook ISBN 9780429113918

SALES, W.F. et al. Utilização da esclerometria pendular no estudo da performance de fluidos de corte, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999.

SALES, W. F.; DINIZ, A. E.; MACHADO, A. R., Application of Cutting Fluids in Machining Process, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, RBCM, vol. 23, nº 2, 2001, pp 227-240. <https://doi.org/10.1590/S0100-73862001000200009>

SALMON, S. C. Metal Cutting Processes. In: Byers, J. (Ed.), *Metalworking Fluids*, second ed. CRC Press, Boca Raton, 2006:47–73.

SALTON, Milton RJ; OWEN, Peter. Bacterial Membrane Structure. **Annual Reviews in Microbiology**, v. 30, n. 1, p. 451-482, 1976. DOI:10.1146/ANNUREV.MI.30.100176.002315

SANDIN, M.; ALLENMARK, S.; EDEBO, L. Selective toxicity of alkanolamines. *Antimicrob Agents Chemother* 1990;34:491–493. doi: 10.1128/aac.34.3.491

SANDIN, Michael; MATTSBY-BALTZER, Inger; EDEBO, Lars. Control of microbial growth in water-based metal-working fluids. *International Biodeterioration*, v. 27, n. 1, p. 61-74, 1991. [https://doi.org/10.1016/0265-3036\(91\)90024-L](https://doi.org/10.1016/0265-3036(91)90024-L)

SANTOS, José Carlos Oliveira et al. Thermoanalytical and rheological characterization of automotive mineral lubricants after thermal degradation. **Fuel**, v. 83, n. 17, p. 2393-2399, 2004. DOI:10.1016/j.fuel.2004.06.016

SCHEY, John. *Introduction to Manufacturing Processes*. McGraw-Hill Book Co, 1221 Avenue of the Americas, New York, New York 10020, USA, 1987., 1987. ASIN:B01F822P8Y

SCHUBERT, H. *Emulgiertechnik: Grundlagen, Verfahren und Anwendungen*, Behrs, Hamburg, Germany 2010. ISBN: 9783899470864, 3899470869

SCHULZ, J.; HOLWEGGER, W. *Wechselwirkung von Additiven mit Metalloberflächen*, vol. 2010. Expert-Verlag, Hamburg. ISBN 978-3-8169-3543-8

SELVARAJU, S. B.; KHAN, I. U. H.; YADAV, J. S. Biocidal activity of formaldehyde and nonformaldehyde biocides toward *Mycobacterium immunogenum* and *Pseudomonas fluorescens* in pure and mixed suspensions in synthetic metalworking fluid and saline. *Appl Environ Microbiol* 2005;71:542–546. doi: 10.1128/AEM.71.1.542-546.2005

SELVARAJU, S. B.; KAPOOR, R.; YADAV, J. S. Peptide nucleic acid-fluorescence in situ hybridization (PNA-FISH) assay for specific detection of *Mycobacterium immunogenum* and DNA-FISH assay for analysis of pseudomonads in metalworking fluids and sputum. *Molec Cell Probes* 2008a;22:273–280. DOI: 10.1016/j.mcp.2008.06.002

SELVARAJU, S. B.; KHAN, I. U. H.; YADAV, J. S. Differential biocide susceptibility of the multiple genotypes of *Mycobacterium immunogenum*. *J Ind Microbiol Biotechnol* 2008b;35:197–203. DOI: 10.1007/s10295-007-0286-5

SELVARAJU, S. B.; KHAN, I. U. H.; YADAV, J. S. Susceptibility of *Mycobacterium immunogenum* and *Pseudomonas fluorescens* to formaldehyde and non-formaldehyde biocides in semi-synthetic metalworking fluids. *Int. J. Mol. Sci.* 2011;12:725–741. <https://doi.org/10.3390/ijms12010725>

SILLIMAN, J. D. (Ed.). *Cutting and grinding fluids: selection and application*. Society of manufacturing engineers, 1992. ISBN: 0-87263-423-X

SIMPSON, A. T. et al. Mineral oil metal working fluids (MWFs)—development of practical criteria for mist sampling. *Annals of occupational hygiene*, v. 44, n. 3, p. 165-172, 2000. DOI: 10.1016/s0003-4878(99)00085-x

SINGH, P.; PARMAR, D.; PANDYA, A. Parametric Optimization of Media for the Crude Oil Degrading Bacteria Isolated from Crude Oil Contaminated Site. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, v. 4, n. 2, p. 322-328, 2015. ISSN: 2319-7706

SHELTON, B. G.; FLANDERS, W. D.; MORRIS, G. K. *Mycobacterium* sp. as a possible cause of hypersensitivity pneumonitis in machine workers. *Emerging infectious diseases*, v. 5, n. 2, p. 270, 1999. DOI 10.3201/eid0502.990213

SHEN, L.; HAUFE, J.; PATEL, M. K. Product overview and market projection of emerging bio-based plastics PRO-BIP 2009. *Report for European polysaccharide network of excellence (EPNOE) and European bioplastics*, v. 243, p. 1-245, 2009. https://www.researchgate.net/publication/216092211_Product_overview_and_market_projection_of_emerging_bio-based_plastics_PRO-BIP_2009

SHENG, P. S.; OBERWALLENEY, S. Life-cycle planning of cutting fluids—a review. *Journal of manufacturing science and engineering*. 1997 Nov 1;119(4B):791-800. DOI:10.1115/1.2836826

SHELL, *Curso de Lubrificação Industrial – Fluidos de corte*, Centro de treinamento Shell do Brasil, Divisão Petróleo, Imp. Metodista, 1991. 40p.

SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012;57:83-101. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.02.002>

SHOKRANI CHAHARSOOGHI, Alborz; DHOKIA, Vimal; NEWMAN, Stephen. A techno-health study of the use of cutting fluids and future alternatives. In: *24th international conference on flexible automation and intelligent manufacturing (FAIM 2014)*. University of Bath, 2014. DOI:10.13140/2.1.1628.8327

SHVEDOVA, A. A. et al., (2001) Elevated oxidative stress in skin of B6C3F1 mice affects dermal exposure to metal working fluid. *Toxicol Ind Health* 16, 267–276. <https://doi.org/10.1177/074823370001600703>

SINGER, S. J.; NICOLSON, G. L. The fluid mosaic model of the structure of cell membranes. *Science*, v. 175, n. 4023, p. 720-731, 1972. DOI: 10.1126/science.175.4023.720

SLONCZEWSKI, Joan L. et al. pH homeostasis in Escherichia coli: measurement by ³¹P nuclear magnetic resonance of methylphosphonate and phosphate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 78, n. 10, p. 6271-6275, 1981. <https://doi.org/10.1073/pnas.78.10.6271>

SLOYER, J. L.; NOVITSKY, T. J.; NUGENT, S. Rapid bacterial counts in metalworking fluids. *J Ind Microbiol Biotechnol* 2002;29:323–324. <https://doi.org/10.1038/sj.jim.7000305>

SOKOVIC, M.; MIJANOVIC. K. Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes, *Journal of Materials Processing Technology* 109 (2001) 181-189 [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00794-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00794-9)

SOMAYAJI, Anuradha. *A study of the antiwear behavior and oxidation stability of fluorinated zinc dialkyl dithio phosphate in the presence of antioxidants*. 2008. Tese de Doutorado. The University of Texas at Arlington. <http://hdl.handle.net/10106/1006>

de SOUSA, J. A. G.; SANTOS, A. F. M.; MACHADO, Á. R. *Investigação da incerteza de medição da profundidade de furos através do ensaio de usinabilidade por pressão constante*. 2015. ISSN 2236-0395

SPIKES, H. A. (1989) Additive-Additive Interaction and Additive-Surface Interaction in Lubrication. *Lubrication Science* 2(1):3–23. <https://doi.org/10.1002/lis.3010020102>

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. (2005) *Engineering Tribology*, Elsevier, Butterworth Heinemann: 832. ISBN: 9780750678360

STACHOWIAK, G.; BATCHELOR, A. W. (2014) *Boundary and Extreme Pressure Lubrication*, fourth ed. *Engineering Tribology*: 371–428. (Chapter 8). ISBN 978-0-12-397047-3

STOLTE, Stefan et al. Ionic liquids as lubricants or lubrication additives: an ecotoxicity and biodegradability assessment. *Chemosphere*, v. 89, n. 9, p. 1135-1141, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.102>

STOODLEY, Paul et al. Biofilms as complex differentiated communities. **Annual review of microbiology**, v. 56, n. 1, p. 187-209, 2002. DOI: 10.1146/annurev.micro.56.012302.160705

SULLIVAN, Patricia A. et al. Mortality studies of metalworking fluid exposure in the automobile industry: VI. A case-control study of esophageal cancer. *American journal of industrial medicine*, v. 34, n. 1, p. 36-48, 1998. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0274\(199807\)34:1<36::AID-AJIM6>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0274(199807)34:1<36::AID-AJIM6>3.0.CO;2-O)

SUN, K. et al. Isolation, plant colonization potential, and phenanthrene degradation performance of the endophytic bacterium *Pseudomonas* sp. Ph6-gfp. *Sci. Rep.*, v. 4, n. 5462, p. 10.1038, 2014. DOI: 10.1038/srep05462

SUURONEN, K. et al. Occupational dermatitis and allergic respiratory diseases in Finnish metalworking machinists. *Occup. Med. (Lond.)* 2007;57:277–283. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqm011>

TADROS, T. Application of rheology for assessment and prediction of the long-term physical stability of emulsions. **Advances in colloid and interface science**, v. 108, p. 227-258, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2003.10.025>

TADROS, T. F. *Emulsion science and technology: a general introduction*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. DOI:10.1002/9783527626564

TANT, C. O.; BENNETT, E. O. (1958) The growth of aerobic bacteria in metal-cutting fluids. *Appl Microbiol* 6:388–391 doi: 10.1128/am.6.6.388-391.1958

TANT, C. O.; BENNETT, E. O. (1956) The isolation of pathogenic bacteria from used emulsion oils. *Appl Environ Microbiol* 4(6):332–338. doi: 10.1128/am.4.6.332-338.1956

TAYLOR, F.W., 1907 “On the Art of Cutting Metals”, Pub. by ASME.

THEAKER, D.; THOMPSON, I. The industrial consequences of microbial deterioration of metal-working fluid. In: *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 2641-2650. DOI 10.1007/978-3-540-77587-4_196

THOMPSON, I. P.; VAN DER GAST, C. J. Pathogens in Metal Working Fluids. *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*. 2010. Part 29, p. 3305-3309. DOI 10.1007/978-3-540-77587-4_251

THORNE, P. S.; DEKOSTER, J. A. Pulmonary effects of machining fluids in guinea pigs and mice. *Am Ind Hyg Assoc J* 1996;57:1768–1772. <https://doi.org/10.1080/15428119691014297>

THORNE, P. S. Inhalation toxicology models of endotoxin- and bioaerosol-induced inflammation. *Toxicology* 2000;152:13–23. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(00\)00287-0](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(00)00287-0)

THORNE, P. S. et al. Metalworking fluid with mycobacteria and endotoxin induces hypersensitivity pneumonitis in mice. *Am J Respir Crit Care Med* 2006;173:759–768. <https://doi.org/10.1164/rccm.200405-627OC>

TOMS, A. et al. A Study on Instrumentation Techniques Available for the Early Detection of ‘BURNT OIL’ in F100-PW-100/200/220/229 ENGINES, Part II, **JOAP-TSC-TR-97-01**, 18 Feb 1997. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:109381357>

TOMS, A.; TOMS, L. (2010) Oil Analysis and Condition Monitoring. in Mortier RM, Fox MF, Orszulik ST, (Eds.) *Chemistry and Technology of Lubricants*, Springer, pp. 459–495(Chapter 16). ISBN: 140208661X / 9781402086618

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. *Microbiology: An Introduction*. Pearson Education. 2008. ISBN: 0321733606, 9780321733603

TRABULSI, Luiz Rachid; ALTERTHUM, Flávio. Microbiologia 6 a Edição. **Atheneu (Biblioteca Biomédica), São Paulo**, 2015. ISBN: 8538806777

TRAFNY, E. A. Microorganisms in metalworking fluids: Current issues in research and management. *International journal of occupational medicine and environmental health*, v. 26, n. 1, p. 4-15, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2478/S13382-013-0075-5>

TRAFNY, E. A. et al. Microbial contamination and biofilms on machines of metal industry using metalworking fluids with or without biocides. *International Biodeterioration & Biodegradation* 2015;99:31-38. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.12.015>

TRAPP, I. (2001) *Kühlschmierstoff-Analytik: Screening von Aerosolen und Dämp-fen sowie Quantifizierung toxikologisch relevanter Additive in Arbeitsplatzluft und Gebrauchslösung*, Technische Universität, Herbert Utz Verlag, München. (Dr. -Ing. Dissertation). ISBN 3-8316-0078-3

TRENT, E. M. *Metal Cutting*, 3rd Edition, Butterworths-Heinemann Ltd, 1991 273p. eBook ISBN: 9781483292014

TRIAS, Joaquim; BENZ, Roland. Permeability of the cell wall of Mycobacterium smegmatis. *Molecular microbiology*, v. 14, n. 2, p. 283-290, 1994. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2958.1994.tb01289.x>

TUCKER, K. H. 5 Metalforming Applications. *Metalworking Fluids*, p. 103, 2006. ISBN-13 978-1-4200-1773-1.

UENO, S.; SHIOMI, Y.; YOKOTA, K. (2002). Metalworking fluid hand dermatitis. *Industrial Health*, 40, 291–293. <https://doi.org/10.2486/indhealth.40.291>

VAN DER GAST, C. J. et al. Identification and characterisation of bacterial populations of an in-use metal-working fluid by phenotypic and genotypic methodology. *International biodeterioration & biodegradation*, v. 47, n. 2, p. 113-123, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(01\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(01)00036-1)

VAN DER GAST, Christopher J. et al. Bacterial community structure and function in a metal-working fluid. *Environmental Microbiology*, v. 5, n. 6, p. 453-461, 2003. <https://doi.org/10.1046/j.1462-2920.2003.00428.x>

VAN DER GAST, Christopher J.; WHITELEY, Andrew S.; THOMPSON, Ian P. Temporal dynamics and degradation activity of an bacterial inoculum for treating waste metal-working fluid. *Environmental Microbiology*, v. 6, n. 3, p. 254-263, 2004. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2004.00566.x>

VANA EI, H. R.; ESLAMI A.; EGBEWANDE, A. A review on pipeline corrosion, in-line inspection (ILI), and corrosion growth rate models *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2017;149:43-54. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.11.007>

VEILLETTE, M. et al. Six month tracking of microbial growth in a metal removal fluid after system cleaning and recharging. *Ann. Occup. Hyg.* 2004;48:541–546. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meh043>

VELARDE, M. G.; ZEYTOURIAN, R. K. (2003) *Interfacial Phenomena and the Marangoni Effect*, vol. 2003. Springer-Verlag Wien GmbH. ISBN: 978-3-211-83696-5

VENKATESAGOWDA, B. et al. Diversity of plant oil seed-associated fungi isolated from seven oil-bearing seeds and their potential for the production of lipolytic enzymes. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, v. 28, n. 1, p. 71-80, 2012.

VENZLAFF, H. et al. Accelerated cathodic reaction in microbial corrosion of iron due to direct electron uptake by sulfate-reducing bacteria. *Corrosion Science*, v. 66, p. 88-96, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.09.006>

VIRJI, M. A. et al. Identifying the determinants of viable microorganisms in the air and bulk metalworking fluids. *AIHA J* 2000;61:788–797. <https://doi.org/10.1080/15298660008984588>

VOET, D.; VOET, J. G.; PRATT, C. W. *Fundamentos de Bioquímica*. Porto Alegre: Artmed, 2002. ISBN-10 8582710658

ZISMAN, W. A. Influence of constitution on adhesion. *Industrial & Engineering Chemistry*, v. 55, n. 10, p. 18-38, 1963. <https://doi.org/10.1021/ie50646a003>

ZISMAN, Wm A. Relation of the equilibrium contact angle to liquid and solid constitution. *Advances in Chemistry* 43:1–51. 1964. DOI: 10.1021/ba-1964-0043.ch001

XU, D.; HUANG, W.; RUSCHAU, G.; HORNE MANN, J.; WEN, J.; GU T. Laboratory investigation of MIC threat due to hydro test using untreated seawater and subsequent exposure to pipeline fluids with and without SRB spiking. *Eng Fail Anal* 2013;28:149-59. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.10.006>

ZIMMERMAN, Julie B.; HAYES, Kim F.; SKERLOS, Steven J. Influence of ion accumulation on the emulsion stability and performance of semi-synthetic metalworking fluids. *Environmental science & technology*, v. 38, n. 8, p. 2482-2490, 2004. <https://doi.org/10.1021/es0340477>

ZHAO, Y. P.; TURAY, R.; HUNDLEY, L. Monitoring and Predicting Emulsion Stability of Metalworking Fluids by Salt Titration and Laser Light Scattering Method, *Tribology Transactions* 2006;49:1, 117-123, DOI: 10.1080/05698190500526939

WAKABAYASHI, T. et al. Tribological characteristics and cutting performance of lubricant esters for semi-dry machining. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 52, n. 1, p. 61-64, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60531-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60531-9)

WALLACE, J. R. et al. Presence of a single genotype of the newly described species *Mycobacterium immunogenum* in industrial metalworking fluids associated with hypersensitivity pneumonitis. *Appl Environ Microbiol* 2002;68:5580–5584. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.68.11.5580-5584.2002>

WALTER, A.. **Tribophysikalische und tribochemische Vorgänge in der Kontaktzone bei der Zerspanung**. 2002, Shaker Verlag. (Dr. -Ing. Dissertation RWTH Aachen). ISBN: 978-3-8322-0624-6

WANG, Jianli; YE, Zhibin; ZHU, Shiping. Topology-engineered hyperbranched high-molecular-weight polyethylenes as lubricant viscosity-index improvers of high shear stability. *Industrial & engineering chemistry research*, v. 46, n. 4, p. 1174-1178, 2007. <https://doi.org/10.1021/ie0613624>

WATT, W. D. Observations on the relationship between triazines and mycobacteria in metal removal fluids. *Appl. Occup. Environ. Hyg.* 2003;18:961–965. <https://doi.org/10.1080/10473220390237692>

WEINERT, K.; INASAKI, I.; SUTHERLAND, J. W.; WAKABAYASHI T. Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. *Annals of the CIRP—Manufacturing Technologies* 2004;53(2):517–537. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60027-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60027-4)

WEINHOLD, M. X. et al. Thöming J. In-situ sampling method (HSSE-TDS-GC-MS) during MVOC (microbial volatile organic compounds) measurements of metalworking fluids (MWF). *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*. 2012;67(4):265-71. <https://doi.org/10.3139/105.110159>

WHITTAKER, Stephen George. *Metalworking Fluids: A Resource for Employers and Health & Safety Personnel in Washington State*. Safety and Health Assessment and Research for Prevention, Washington State Department of Labor & Industries, 1997.

WILLIS, A. J.; BOTT, T. R. Inhibition of *Pseudomonas fluorescens* biofilm development by hydrogen peroxide. *Understanding heat exchanger fouling and its mitigation*, p. 171-175, 1999. DOI: 10.1128/AAC.02984-15

WILSON, R. W. et al. *Mycobacterium immunogenum* sp. nov., a novel species related to *Mycobacterium abscessus* and associated with clinical disease, pseudo-outbreaks and contaminated metalworking fluids: an international cooperative study on mycobacterial taxonomy. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 2001;51:1751–1764. <https://doi.org/10.1099/00207713-51-5-1751>

WINTER, M.; BOCK, R.; HERRMANN, C. Investigation of a new ecologically benign metalworking fluid in abrasive machining processes to substitute mineral oil based fluids. *Procedia CIRP*, v. 1, p. 393-398, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.070>

WINTER, Marius et al. Technological evaluation of a novel glycerol based biocide-free metalworking fluid. *Journal of Cleaner Production*, v. 35, p. 176-182, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.048>

WINTER, M.; BOCK, R.; HERRMANN, C. (2013) Investigation of a New Polymer-Water Based Cutting Fluid to Substitute Mineral Oil Based Fluids in Grinding Processes. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, v. 6, n. 4, p. 254-262, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2013.07.003>

WU, S. Calculation of Interfacial Tension in Polymer Systems. *Journal of Polymer Science* 1971;34:19–30. (XI.: Part C). <https://doi.org/10.1002/polc.5070340105>

YANG, C. C. Effects of water hardness in the lubricity of a semi-synthetic cutting fluid. *Lubrication Engineering*, 1979, 35(3), 133–136. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCAL7900303368>

YOUNG, D. et al. Degradation of Bunker C Fuel Oil by White-Rot Fungi in Sawdust Cultures Suggests Potential Applications in Bioremediation. *PloS one*, v. 10, n. 6, p. e0130381, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130381>

YUAN, Y.; LEE, T. R. Contact Angle and Wetting Properties. In BRACCO, G.; HOLST, B. (Ed.). *Surface Science Techniques*: Springer Berlin Heidelberg, 2013;51:3-34. (Springer Series in Surface Sciences). ISBN 978-3-642-34242-4. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-34243-1>